

**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**

**2016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 28 年度報告書刊行にあたって

プロジェクト代表 池田 輝之

2015 年 12 月にパリで行われた COP21 (国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議) において、「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」ことが決定され、そのための取り組みとして、「今世紀後半に人為的な温室効果ガスの排出と吸収による除去の均衡を達成するために、最新の科学に従って早期削減を行う」ことを念頭に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開始されつつあります。しかし、世界のエネルギー消費量はこれまで増加の一直線を辿ってきた現状 (例えば、資源エネルギー庁「平成 27 年度エネルギーに関する年次報告」) 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の達成は、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しめるのは、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。

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。いずれも、温室効果ガスの削減に大きく寄与しうる分野にあり、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ナノ構造化熱電材料及び多孔質化熱電材料の創製
- 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) 超伝導デバイスに微小なアンテナを集積化した中赤外光検出器の作製とそのアンテナ特性の評価
- 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 15 編、国内外における研究発表 48 件 (うち、国際会議 9 件) などで発表して参りました。また、我々が研究代表機関として遂行している国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の研究プログラム (「エネルギー・環境新技術先導プログラム」) による研究プロジェクト「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」が、平成 29 年度まで延長されることが決定したのをはじめ、8 件の競争的外部資金 (科研費以外) 及び 9 件の科学研究費補助金を獲得し、鋭意推進しております。

H29 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。

# －目次－

## 1. 活動概要

－1－

## 2. 研究報告

1. 「高性能熱電材料の開発」  
(池田 輝之)

－11－

2. 「物性顕微鏡を用いた界面熱抵抗測定」  
(西剛史, 大川萌里, 太田弘道, 羽鳥仁人)

－16－

3. 「低消費電力磁気メモリの開発」  
(小峰 啓史)

－19－

4. 「Mg<sub>2</sub>Si 合金における Si 析出相の成長過程の応力依存性」  
(劉 濱, 池田 輝之, 篠嶋 妥)

－21－

5. 「超伝導デバイス開発研究」  
(島影 尚)

－24－

6. 「センサ出力によりアンテナ特性を直接変化させる  
バッテリーレス傾斜/振動センサタグ」  
(武田 茂樹)

－27－

## 3. プロジェクト業績

1. 活動実績

－33－

2. 業績一覧

－34－

## 1.活動概要

## グリーンデバイス教育研究センター 平成28年度活動計画・実施結果調査

### 1. 研究開発・資金獲得計画

○実施計画(年度当初に、個人の活動以外の、センターとして実施する技術・研究開発に関する活動計画について、計画名・実施概要・実施予定時期・実施体制を記載してください。)

#### 1. 新しいコンセプトの応力緩和機能を有する接合技術

- (1)実施概要: SiC 半導体の性能を生かした低損失インバータ実現のため新しいコンセプトの応力緩和機能を有する接合技術の開発と緩和機構の明確化
- (2)実施予定時期: H28 年4月～29年3月
- (3)実施体制(注:外部の人も含む)
  - ・ 責任者: 大貫 仁
  - ・ メンバ: 篠嶋 妥、玉橋邦裕、川上三雄(茨城大学)、川又勇司、豊田良孝、芹沢弘二、坂本健志(千住金属)
- (4)資金獲得計画: 科研費基盤 S(複数可)
- (5)実施における課題: 特になし

#### 2. 高性能熱電材料

- (1)実施概要: 高性能熱電材料
- (2)実施予定時期: 2016 年 4 月～2017 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:
  - ・ NEDO 関係の研究プログラムに応募
  - ・ 科学技術振興機構「さがけ」あるいは「CREST」に応募
  - ・ 科学研究費補助金
- (5)実施における課題: 特になし

#### 3. 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: H28 年 4 月～H29 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

#### 4. 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: H28 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。

#### 5. 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: H28 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。

○実施結果(中間報告時と年度末に、実施結果を記載してください。)

1. 新しいコンセプトの応力緩和機能を有する接合技術

- (1) 実施結果: Al-Zn はんだ接合部を用いたSBDおよびMOSを作製し、RT~300°Cで1000~10000 サイクルの信頼性試験を実施。外観上の問題点は見当たらない。デバイス特性は4月中に評価予定。
- (2) 資金獲得の結果: 現状では不明(3月20日頃までに連絡無ければ不可)
- (3) 特筆すべき事項: パワーデバイスの国際会議 ISPSD で6月に講演予定。採択率は20%。

2. 高性能熱電材料

- (1) 実施結果: 20nm 以下の孔をもつナノ石英硝子テンプレートの作製, 巨大ゼーベック効果の観測など。
- (2) 資金獲得の結果: NEDO エネルギー・環境新技術先導プログラムのステージゲート審査を経て, 2017年10月まで1年間の延長が決定。高性能熱電材料関連のプロジェクトを科研費への申請中。
- (3) 特筆すべき事項: 巨大ゼーベック効果の観測。「産総研と工学部・小峰 啓史 准教授ら共同でナノワイヤーの新たな評価技術を開発」, プレスリリース, 掲載日:2016/12/12

3. BSCCO 超伝導体を用いたテラヘルツ発振器の研究

- (1) 実施結果: 超伝導デバイスに微小なアンテナを集積化した中赤外光検出器の作製とそのアンテナ特性の評価
- (2) 資金獲得の結果: 文部科学省 平成29年度 基盤研究(C), 「高温動作を実現する局部発振器内蔵型テラヘルツ帯超伝導ヘテロダイン受信機の開発」, 3,700千円, 2017年度~2019年度, 研究代表者:島影尚
- (3) 特筆すべき事項: 特になし

4. 電界効果による磁壁移動型デバイス的高速化

- (1) 実施結果: 電界効果を引き出すためのゲート絶縁膜の作製, リソグラフィ及び素子作製検討を行った
- (2) 資金獲得の結果: 科学研究費補助金基盤研究(B), テレコム助成センター, 御器谷財団など, 2,000万円/4年の外部資金を頂いた。
- (3) 特筆すべき事項: スピントロニクス拠点形成事業について, 北大, 東北大から, 共同研究3件の依頼があった

5. 電界, 磁界を利用した新規熱電素子の創成

- (1) 実施結果: 磁性体を利用した熱電効果の検討を行い, 磁性体におけるネルンスト効果を理論的に明らかにした
- (2) 資金獲得の結果: スズキ財団, 中部電気利用基礎研究振興財団など合計300万円/1年の研究助成を頂いた
- (3) 特筆すべき事項: 現在, この素子の基本原理について特許申請を準備中

その他(参考資料、報告書など)

業績一覧

【原著論文】

- 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, Thermal effusivity measurement based on analysis of 3D heat flow by modulated spot heating using a phase lag matrix with a combination of thermal effusivity and volumetric heat capacity, Measurement Science and Technology, **27**, 115002, 1, (2016)
- 2) T. Nishi, H. Hayashi, T. Sato, M. Takano, Self-irradiation effect on thermal conductivity of  $Zr_{0.70}Pu_{0.25}Cm_{0.05}N$  solid solution, Journal of Nuclear Materials, **486**, 167-171, (2017)
- 3) M. Murata, A. Yamamoto, Y. Hasegawa, T. Komine, "Experimental and theoretical evaluations of the

- galvanomagnetic effect in an individual bismuth nanowire", *Nano Lett.*, 17 (1), pp 110–119, 2017.
- 4) M. Murata, A. Yamamoto, Y. Hasegawa, T. Komine, A. Endo, "Theoretical modeling of electrical resistivity and Seebeck coefficient of bismuth nanowires by considering carrier mean free path limitation", *J. Appl. Phys.* Vol. 121, 014303, 2017.
  - 5) T. Komine and T. Aono, "Micromagnetic analysis of current-induced domain wall motion in a bilayer nanowire with synthetic antiferromagnetic coupling", *AIP Advances* Vol. 6, 056409/pp. 1-7, 2016.
  - 6) 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.
  - 7) T. Misawa, S. Mori, T. Komine, M. Fujioka, J. Nishii, H. Kaiju, "Structural and magnetic properties of Ni<sub>78</sub>Fe<sub>22</sub> thin films sandwiched between low-softening-point glasses and application in spin devices", *Appl. Surf. Sci.* Vol. 390, pp. 666–674, 2016.
  - 8) T. Aono and T. Komine, "Giant thermoelectric figure of merit in a non-interacting quantum dot system with massless Dirac fermions", *Phys. Rev. B*, Vol. 94, 165311, 2016.
  - 9) R.Hara, K.Hayakawa, K.Ebata, R.Sugita, Effect of aging and annealing on perpendicular magnetic anisotropy of ultra-thin CoPt films, *AIP Advances*, **6**, 056117-1-056117-7 (2016.5).
  - 10) Ahmad Ehsan Mohd Tamidi and Yasushi Sasajima, "The Relationship between Nanocluster Precipitation and Thermal Conductivity in Si/Ge Amorphous Multilayer Films: Effects of Cu Addition", *Journal of Nanomaterials*, Volume **2016**, Article ID 8017814, 7 pages (2016).
  - 11) Bin Liu, Teruyuki Ikeda and Yasushi Sasajima, "Simulation of the Si precipitation process in Mg<sub>2</sub>Si using a phase-field kinetic model", *Materials Transactions*, Vol. **57** (6) pp. 922-926 (2016).
  - 12) 永野 隆敏, 篠嶋 妥, 伊藤 吾朗, "第一原理計算による Al-Zn-Mg 合金中の水素の存在位置の解析", *軽金属* 第 **66** 卷 (7), pp. 1 - 6 (2016).
  - 13) リュウ ビン, 篠嶋 妥, 岩瀬 彰宏, "熱的照射下にある Al-Cu 合金における  $\theta'$  析出相の成長過程のフェーズフィールドシミュレーション", *日本金属学会誌*, 第 **80** 卷(8), pp. 497-502 (2016).
  - 14) 清水隆行, 鈴木貴之, 武田茂樹, 鹿子嶋憲一, 梅比良正弘, 移動体通信用逆 L 型プローブ給電水平偏波無指向性アンテナ, *信学論 B*, vol.J99-B, no.9, pp.693-704, (2016).
  - 15) 小林有理, 馮東方, 武田茂樹, 鹿子嶋憲一, 梅比良正弘, バッテリーレス UHF 帯無線傾斜/振動センサタグラの提案, *土木学会論文集 F3(土木情報学)*, March (2017).

【国際会議論文】

- 1) T. Nishi, J. Ojima, Y. Kuroda, H. Ohta, S. Sukenaga, H. Shibata, H. Kawashima, Thermal conductivity of borosilicate melt, *Proceedings of the 10th international conference on molten slags, Fluxes and Salts (MOLTEN16)*, 519-524, (2016)
- 2) A. Kawakami, H. Shimakage, J. Horikawa, M. Hyodo, S. Saito, S. Tanaka, Y. Uzawa, Superconducting hot-electron bolometers with a twin-slot nano-antenna for mid-infrared operation, *Proc. of 1st Asia ICMC and CSSJ 50th Anniversary Conference*, (2016)
- 3) K. Kagoshima, M. Uchida, S. Takeda and M. Umehira, Investigation on the reactance loading and EM coupling feed for a design of a dual frequency planar antenna, *Proc. IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications*, pp.30-33, (2016)

【学会発表 (国内、国際)】

- 1) 橋本康孝,西 剛史,太田弘道,溶融 Sn-Ag-Cu 合金の粘度測定システムの開発,日本金属学会 2016 年秋期講演大会,2016/9/21
- 2) 田中健登,菱沼洋平,太田弘道,西 剛史,鋳鉄用冷やし金の熱拡散率分布測定,日本金属学会 2016 年秋期講演大会,2016/9.21
- 3) 西 剛史,池田輝之,太田弘道,山本 俊,大川萌里,羽鳥仁人,熱物性顕微鏡を用いた Pb30-Sb10Ag10Te50 熱電材料の局所熱浸透率測定,日本金属学会 2016 年秋期講演大会,2016/9/22
- 4) Y. Hashimoto, H. Ohta, T. Nishi, Viscosity Measurements of Liquid Sn-Ag-Cu Alloys, ATPC 2016 Japan Yokohama,2016/10/3
- 5) T. Nishi, Y. Hishinuma, K. Tanaka, H. Ohta, Determination of thermal conductivity distribution in chillers for casting ATPC 2016 Japan Yokohama,2016/10/5
- 6) 菱沼洋平,田中健登,西 剛史,太田弘道,冷やし金の熱拡散率とスリーブ材発量測定,第 37 回日本熱物性シンポジウム,2016/11/28
- 7) 大川萌里,西 剛史,太田弘道,羽鳥仁人,熱物性顕微鏡を用いた界面抵抗測定のアプローチ,第 37 回日本熱物性シンポジウム,2016/11/28
- 8) 篠原貴洸,太田弘道,西 剛史,羽鳥仁人,野口秀則,栗野孝昭,神田昌枝,西 義武,サーモウェブアナライザを用いた複合材料の熱拡散率異方性に関する検討,第 37 回日本熱物性シンポジウム,2016/11/30
- 9) T. Komine, T. Aono, M. Murata, Y. Hasegawa, "Numerical analysis of surface states in Bi nanostructure" (P280), 35th annual international conference on thermoelectrics & 1st Asian conference on thermoelectrics (ICT & ACT 2016), Wuhan, China, May 29 - June 2, 2016.
- 10) M. Murata, A. Yamamoto, Y. Hasegawa, T. Komine, "Nano-scale electrical contact onto 110 nm Bi nanowire encapsulated in quartz template utilizing FIB-SEM" (P281), 35th annual international conference on thermoelectrics & 1st Asian conference on thermoelectrics (ICT & ACT 2016), Wuhan, China, May 29 - June 2, 2016.
- 11) 村田正行,山本淳,長谷川靖洋,小峰啓史, "直径 110 nm Bi ナノワイヤーの熱電物性測定", 第十三回日本熱電学会学術講演会(TSJ2016),東京理科大学葛飾キャンパス,2016年9月5-7日.
- 12) 小峰啓史,安藤亮,金田真悟,佐藤汐莉,原嘉昭, "フェリ磁性 TbFeCo 薄膜における異常ホール効果の強磁場特性" [13p-P8-3], 第 77 回 応用物理学会秋季学術講演会,朱鷺メッセ(新潟),2016年9月13-16日.
- 13) 小峰啓史,青野友祐,村田正行,長谷川靖洋, "ビスマスの格子変形が輸送特性に及ぼす影響" [14p-P22-3], 第 77 回 応用物理学会秋季学術講演会,朱鷺メッセ(新潟),2016年9月13-16日.
- 14) 村田正行,山本淳,長谷川靖洋,小峰啓史, "石英ガラス中の直径 110 nm Bi ナノワイヤーへの端部電極形成" [15a-A35-8], 第 77 回 応用物理学会秋季学術講演会,朱鷺メッセ(新潟),2016年9月13-16日.
- 15) 三澤貴浩,森澄人,小峰啓史,星野哲久,芥川智行,藤岡正弥,海住英生,西井準治, "薄膜エッジを利用した Ni<sub>78</sub>Fe<sub>22</sub>/Alq<sub>3</sub>/Ni<sub>78</sub>Fe<sub>22</sub> ナノ接合の作製とその構造・電気伝導特性", [16p-P6-21] 第 77 回 応用物理学会秋季学術講演会,朱鷺メッセ(新潟),2016年9月13-16日.
- 16) T. Komine, and T. Aono, "Influence Of Structural Inversion Asymmetry On Current-induced Domain Wall Motion In Bilayer Nanowires With Ferro- and Antiferromagnetic Coupling" (ET-11) 61th Annual Magnetism and Magnetic Materials (MMM) Conference, New Orleans, Louisiana, Oct.31-Nov. 4, 2016.
- 17) 安藤亮,小峰啓史,佐藤汐莉,金田真悟,原嘉昭, "フェリ磁性 TbFeCo 薄膜における異常ホール効果の

- 膜厚依存性" [14p-P10-69], 第 64 回 応用物理学会春季学術講演会, パシフィコ横浜(神奈川県), 2017 年 3 月 14-17 日.
- 18) 小峰啓史, 青野友祐, 村田正行, 長谷川靖洋, "ビスマスの格子変形がバンド構造および輸送特性に及ぼす影響" [16a-P6-14], 第 64 回 応用物理学会春季学術講演会, パシフィコ横浜(神奈川県), 2017 年 3 月 14-17 日.
- 19) 青野友祐, 川村稔, 大野圭司, Peter Stano, 小峰啓史, "磁場中の量子ポイントコンタクトにおける電子状態と電気伝導 II" 17pA21-1, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 大阪大学 豊中キャンパス(大阪), 2017 年 3 月 17-20 日.
- 20) 川上 彰、島影 尚、堀川 隼世、兵頭 政春、齋藤伸吾、田中秀吉、鶴澤佳徳, 中赤外超伝導ホットエレクトロンボロメータミキサの検討, 電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会, 2017/1/19
- 21) 川上 彰、入交 芳久、落合 啓、島影 尚、堀川 隼世、兵頭 政春、齋藤伸吾、田中秀吉、鶴澤佳徳、竇迫巖, 3THz 帯及び中赤外超伝導ホットエレクトロンボロメータの開発, 日本学術振興会超伝導エレクトロニクス146委員会 第 9 回センシングシステム分科会 第 13 回通信・情報処理分科会 合同研究会, 2016/11/24
- 22) 堀川 隼世、川上 彰、兵頭 政春、島影 尚, 超伝導中赤外光検出器用アンテナの検討 I, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016/9/14
- 23) 後藤 隆志、木村 寛太、島影 尚、武田 正典, YBCO 薄膜を用いたパラメトリック増幅器の検討, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016/9/14
- 24) 日渡 涼、田村 幸英、島影 尚, ジョセフソン接合からのカオス発生シミュレーションにおける素子パラメータ依存性, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016/9/14
- 25) 大内 琢郎、日澤 光紘、島影 尚, IJJ 素子からのテラヘルツ波放射観測実験, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016/9/14
- 26) 川上彰、島影尚、堀川隼世、兵頭政春、齋藤伸吾、田中秀吉, ツインスロットアンテナを用いた 60THz 帯超伝導ホットエレクトロンボロメータ, テラヘルツ応用システム研究会, 2016/7/15
- 27) 杉田龍二, 原竜大, CoPt 垂直磁気異方性膜の熱安定性, スピニクス特別研究会, 16-4-11 (2016).
- 28) T. Ikeda, Microstructural size and morphology control of Si base thermoelectric composites, TMS 2017 146rd Annual Meeting & Exhibition, San Diego, California, USA, February 26-March 2, 2017. (Invited)
- 29) T. Adachi, T. Ikeda, G. Jeffrey Snyder, Nanostructuring of  $Mg_2Si$  and its thermoelectric properties, The International Symposium of Quantum Beam Science at Ibaraki University, Mito, Japan, November 18-20, 2016.
- 30) Kosuke Watanobe, Ye Hong, Tetsuya Adachi, Takashi Inozaki, Yasuharu Saruta, Naotoshi Uchida, Teruyuki Ikeda, Nanostructuring thermoelectric materials and its functions in various aspects, The 35th International Conference & The 1st Asia Conference on Thermoelectrics, Wuhan, China, May 29-June 2, 2016.
- 31) Teruyuki Ikeda, Takafumi Kojima, Hiromi Kawaguchi, Takuya Ide, Hideo Nakajima, Fabrication of porous thermoelectric materials with unidirectionally elongated pores, The 35th International Conference & The 1st Asia Conference on Thermoelectrics, Wuhan, China, May 29-June 2, 2016.
- 32) 劉濱, 篠嶋妥, 池田輝之, 応力下における  $Mg_2Si$  合金の Si 析出相の成長過程のシミュレーション, 軽金属学会第 131 回秋期大会, 2016 年 11 月 5-6 日, 茨城大学水戸キャンパス
- 33) 渡部紘介, 池田輝之, ギブズ-トムソン効果によるバルクシリコンの固溶度の変化, 第 13 回 ヤングメタラジスト研究交流会, 2016 年 10 月 21 日, 東京大学本郷キャンパス 山上会館
- 34) 渡辺英和, 池田輝之, 粉体焼結における高密度 Si 焼結体の作製とナノ構造化, 第 13 回 ヤングメタラジ

スト研究交流会, 2016年10月21日, 東京大学本郷キャンパス 山上会館

- 35) 児島孝文, 池田輝之, 中嶋英雄, 井手拓哉, 川口裕美, 一方向に伸びた孔をもつ熱電材料の創製, 第13回 ヤングメタラジスト研究交流会, 2016年10月21日, 東京大学本郷キャンパス 山上会館
- 36) 西 剛史, 池田 輝之, 太田 弘道, 山本 俊, 大川 萌里, 羽鳥 仁人, 熱物性顕微鏡を用いた  $Pb_{30}Sb_{10}Ag_{10}Te_{50}$  熱電材料の局所熱浸透率測定, 日本金属学会秋期講演大会, 2016年9月21-23日, 大阪大学豊中キャンパス
- 37) Babak ALINEJAD, Teruyuki IKEDA, "Fabrication of silicon-alumina nano-composite via ball milling-SPS method for thermoelectric applications", 日本金属学会秋期講演大会, 2016年9月21-23日, 大阪大学豊中キャンパス
- 38) 渡辺 英和, 池田輝之, シリコン熱電材料の焼結性及びナノ構造制御, 日本金属学会秋期講演大会, 2016年9月21-23日, 大阪大学豊中キャンパス
- 39) 池田輝之, 組織制御熱電材料の現状とこれから, 応用物理学会秋季学術講演会, 2016年9月13-16日, 朱鷺メッセ, 新潟市 (特別講演)
- 40) 渡部紘介, 池田輝之, バルクシリコンのナノ構造化とドーパント固溶度, 日本熱電学会, 2016年9月5日~7日, 東京理科大学葛飾キャンパス
- 41) Hong Ye, Teruyuki Ikeda, Boron (phosphorus) doping of silicon by high-energy ball milling, 日本熱電学会, 2016年9月5日~7日, 東京理科大学葛飾キャンパス
- 42) Babak Alinejad, Takashi Inozaki, Akiko Saitoh, Teruyuki Ikeda, Low dimensional approach to improved thermoelectric performance via powder metallurgy and crystal growth method, 日本熱電学会, 2016年9月5日~7日, 東京理科大学葛飾キャンパス
- 43) 児島孝文, 山崎拓矢, 池田輝之, 中嶋英雄, 井手拓哉, 川口裕美, 一方向に伸びた孔をもつ熱電材料の創製と新しい熱電発電デバイスの可能性, 日本熱電学会, 2016年9月5日~7日, 東京理科大学葛飾キャンパス
- 44) リュウ ビン, 池田輝之 篠嶋 妥,  $Mg_2Si$  合金における Si 析出相の成長過程に及ぼす外部応力の影響, 軽金属学会関東支部総会・講演会, 2016年8月29日, 東工大蔵前会館 くらまえホール
- 45) 池田輝之, 燃焼ガス透過性多孔質熱電材料を用いた新しい熱発電, 都市ガスシンポジウム 2016年 2016, 6月1日, イイノホール&カンファレンスセンター
- 46) リュウ ビン, 池田 輝之, 篠嶋 妥, “ $Mg_2Si$  合金における Si 析出相の成長過程に及ぼす外部応力の影響”, 軽金属学会第129回秋期大会(講演番号 P19) H28.11.5
- 47) 江口 遼, 篠嶋 妥, Ahmad Ehsan, “Si 系熱電材料の性能向上のための計算機実験”, 第26回日本 MRS 年次大会 (講演番号 D4-P19-019) H28.12.19
- 48) 神永 龍一, 篠嶋 妥, 石川 法人, “ $CeO_2$  の照射による半球状物体形成過程の計算機実験”, 第26回日本 MRS 年次大会 (講演番号 D4-P19-009) H28.12.19

#### 【受賞等】

- 1) 受賞者名: 三澤貴浩, 森澄人, 小峰啓史, 星野哲久, 芥川智行, 藤岡正弥, 海住英生, 西井準治, 受賞名: Poster Award, 授与者: 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 受賞日: 2016/9/16
- 2) 受賞者名: 児島孝文, 受賞名: 第13回日本熱電学会優秀ポスター賞, 授与者: 日本熱電学会, 受賞日: 2016年9月7日
- 3) アンテナ・伝播研究専門委員会 優秀論文賞(AP研論文賞) 受賞日: 2016/12

4) YEP Award 2016 受賞日: 2017/3/6

【特許】

- 1) 発明者: 大貫 仁、篠嶋 妥、永野 隆敏、玉橋 邦裕、千葉 秋雄, 出願人: 国立大学法人茨城大学, 発明の名称: 「半導体集積回路装置及びその製造方法、並びに該半導体集積回路装置に使用する低抵抗率銅配線の探索方法」, 特許第 6080009 号, 平成29年1月27日登録.

【新聞報道等】

- 1) 「産総研と工学部・小峰 啓史 准教授ら共同でナノワイヤーの新たな評価技術を開発」, プレスリリース, 掲載日: 2016/12/12

【競争的資金獲得】

1. 申請した競争的資金等の外部資金

- 1) マツダ研究助成 自動車の高精度な大量生産を目指した複合材料の界面熱抵抗の実測に向けたアプローチ, 1,000 千円, 平成29年度～平成29年度, 研究代表者: 西剛史
- 2) 耐火物協会研究助成金 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, 500 千円, 平成29年度, 研究代表者: 西剛
- 3) サポイン (中小企業経営支援等対策費補助金(戦略的基盤技術高度化支援事業)), 革新的冷却部材の最適化量産製造プロセスの開発, 2,139 千円, 2016 年 10 月～2017 年 3 月, 研究分担者: 池田輝之
- 4) 住友財団, 環境研究助成, 5,000 千円, 流体透過性熱電材料による超高効率廃熱回収, 研究代表者: 池田輝之
- 5) 平成 27 年度エネルギー・環境新技術先導プログラム, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 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, 149,909 千円, 平成 27 年 10 月～平成 29 年 10 月, 研究代表者: 池田輝之

2. 申請した科学研究費補助金

- 1) 文部科学省 平成29年度 挑戦的研究(萌芽), 「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」, 4,750 千円, 2017 年度～2030 年度, 研究代表者: 太田弘道
- 2) 文部科学省 平成29年度 基盤研究(B), 「放射性廃棄物ガラススコア体の膨張と伝熱」, 18,840 千円, 2017 年度～2030 年度, 研究代表者: 太田弘道
- 3) 文部科学省 平成 29 年度 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」, 20,000 千円, 2017 年度～2019 年度, 研究代表者: 池田輝之
- 4) 文部科学省 平成 29 年度 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」, 20,000 千円, 2017 年度～2019 年度, 研究分担者: 池田輝之
- 5) 文部科学省 科学研究費 基盤研究(C) 「歪エネルギー駆動による超微細 Cu 配線の結晶粒粗大化プロセス開発」, 3,200 千円, 平成 28 - 30 年度, 研究代表者: 篠嶋 妥

3. 採択された競争的資金等の外部資金

- 1) 受託研究 廃棄物に応じたガラス固化体の高温特性評価, 5,181 千円, 2017 年度, 研究代表者: 太田弘道
- 2) 受託研究 球状黒鉛鋳鉄の品質向上に関する研究, 1,500 千円, 2016 年度～2018 年度, 研究代表者: 太田弘

道

- 3) 受託研究 溶融ステンレス鋼-B4C の粘度に関する研究,25,186 千円,2016 年度,研究代表者:西剛史
- 4) NEDO 「エネルギー・環境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」,(ステージゲート審査), 50,000 千円, 2017 年度, 研究代表者:池田輝之
- 5) 電気通信普及財団研究助成,「高温超伝導ジョセフソン素子からのカオス発生を利用した乱数発生回路の研究」, 1,000 千円 , 2019 年度, 研究代表者:島影尚
- 6) サポイン (中小企業経営支援等対策費補助金(戦略的基盤技術高度化支援事業)), 革新的冷却部材の最適化量産製造プロセスの開発, 2,139 千円, 2016 年 10 月～2017 年 3 月, 研究分担者: 池田輝之.
- 7) JFE21 世紀財団, 地球環境・地球温暖化防止技術研究, 2,000 千円, ガス透過型熱電デバイスの創製と新しい熱エネルギー回収, 平成 27 年 1 月～平成 28 年 12 月, 研究代表者: 池田輝之

#### 4.採択された科学研究費補助金

- 1) 文部科学省 平成28年度 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度化」, 16,770 千円, 2016 年度～2019 年度, 研究代表者:小峰啓史
- 2) 文部科学省 平成 28 年度 基盤研究(B),「高エネルギー非平衡状態を利用した熱電材料のナノ構造化と新機能」, 13,100 千円, 2014 年度～2016 年度, 研究代表者: 池田輝之
- 3) 文部科学省 2016 年度 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」, 2,860 千円 , 2016 年度～2018 年度, 研究代表者:西剛史
- 4) 文部科学省 2016 年度 基盤研究(C),「酸化物系ランダム構造の領域分割と物性理解」, 1,000 千円 , 2016 年度～2018 年度, 研究分担者:太田弘道
- 5) 文部科学省 平成 29 年度 基盤研究(C),「高温動作を実現する局部発振器内蔵型テラヘルツ帯超伝導ヘテロダイン受信機の開発」, 3,700 千円, 2017 年度～2019 年度, 研究代表者:島影尚
- 6) 文部科学省 科学研究費 基盤研究(C)「歪エネルギー駆動による超微細 Cu 配線の結晶粒粗大化プロセス開発」,1,400 千円, 平成 28 年度, 研究代表者: 篠嶋 妥
- 7) 文部科学省 科学研究費 基盤研究(C)「高速重イオン照射によって形成された表面ナノ構造の直接観察」 1,00 千円, 平成 28 年度, 研究代表者: 石川 法人
- 8) 文部科学省 平成 28 年度 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」, 1,600 千円, 2016年度～2017年度, 研究代表者: 池田輝之
- 9) 文部科学省 平成 28 年度 基盤研究(C),「多様性が求められる大規模災害時の市民への情報伝達と安否確認の一手法」,4,810 千円, 2016 年度～2018 年度, 研究代表者: 武田茂樹

(注)このページに収まらない場合は、必要に応じてページを追加する。

## 2. 人材育成

○実施計画(年度当初に、個人の活動以外の、センターとして実施する人材育成に関わる活動計画について、計画名・実施概要・実施予定時期・実施体制を記載してください。)

### 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: 2016年4月～2017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: 2016年4月～2017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: 2016年4月～2017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(中間報告時と年度末に、実施結果を記載してください。)

### 1. 研究資金獲得を目指したミーティング

- (1)実施結果: 月に一回程度の頻度で、外部研究者を含めてミーティングを行った。
- (2)資金獲得計画: 将来の国家プロジェクトを見据えて戦略を検討中
- (3)特筆すべき事項: NEDO エネルギー・環境新技術先導プログラムの1年間の延長につながった。

### 2. Bi研究会

- (1)実施結果: 2016年5月13日及び11月9日に埼玉大学東京ステーションにて開催。先端研究情報の交換、議論を行うとともに、学生の研究発表により学生の教育に供した。次回は2017年4月の予定。
- (2)資金獲得計画: 特になし
- (3)特筆すべき事項: 特になし

### 3. セミナーの開催

- (1)実施結果:  
2016年7月26日に九州大学稲盛フロンティア研究センター教授の山崎仁丈先生をお招きしセミナーを開催し、イオニクスや水素生成の先端研究を講演頂いた。また、学生に各々の研究についてディスカッションして頂いた。  
2017年2月22日に京都大学大学院工学研究科材料工学専攻准教授の野瀬嘉太郎先生をお招きしセミナーを開催し、太陽電池材料の先端研究についてお話いただいた。また、学生に各々の研究についてディスカッションして頂いた(2月22日～23日)。

(2) 資金獲得計画: 特になし  
(3) 特筆すべき事項: 特になし

その他(参考資料、報告書など)

(注)このページに収まらない場合は、必要に応じてページを追加する。

## 2.研究報告

## 高性能熱電材料の開発

Developments of high performance thermoelectric materials

池田 輝之

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

Teruyuki Ikeda

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

### 1. 概要

エネルギー問題の解決の一助とするため、ゼーベック効果を利用した排熱発電の大規模普及を目指し、複数の観点から高効率の熱発電デバイスの実現を目的とする研究を行っている。

### 2. ガス透過型熱電デバイスの創製

#### 2.1. はじめに

科学技術の発達により私たちの生活は便利になり豊かになったが、その一方で化石燃料等の資源枯渇といった地球環境問題に直面している。低エネルギー消費や再生可能エネルギーなどで対策は立てられているが、エネルギーという点に着目してみると多くの熱エネルギーが利用されないまま捨てられている現状にある。この熱エネルギーを再利用する技術の一つとして、熱電効果を利用した熱電発電が挙げられる。

熱電効果とはゼーベック効果、ペルチェ効果、トムソン効果に分類できる。ゼーベック効果とは、2種類の異なる金属または半導体を接合し両端に温度差を与えると起電力が生じる現象である。ペルチェ効果はゼーベック効果とは逆に接触面を通して電流を流すと発熱または吸熱が発生する現象であり、トムソン効果とは一つの金属上で温度差がある2点間に電流を流すと熱を吸収または発生する効果である [1]。熱電発電ではこのゼーベック効果を利用し、熱エネルギーを電気エネルギーに変換している。

このように熱電変換材料は廃熱の熱エネルギーを電気エネルギーに変えることができ、エネルギー問題の解決が期待されているが、現在のところ、宇宙探査機やペルチェ冷却を利用した小型冷蔵庫などにしか使用されておらず、普及していない。

その理由としては変換効率の低さが挙げられる。熱電変換効率は無次元性能指数  $zT = S^2 \sigma T / \kappa$  ( $S$ : ゼーベック係数,  $\sigma$ : 電気伝導率) に依存し、 $zT$  の値が高いほど高い。熱伝導率は格子による成分 ( $\kappa_L$ ) と、キャリアによる成分 ( $\kappa_E$ ) の和で成り立つ ( $\kappa = \kappa_L + \kappa_E$ )。つまり高い電気伝導率を維持したまま、格子熱伝導率を低下させることが変換効率の向上につながる。

ところで、熱伝導率はなぜ低い必要があるだろうか。これは、熱伝導率が低くなければ短い距離で大きい温度差、すなわちゼーベック効果による大きい熱起電力が

得られないためである。熱伝導率が高くても長い距離では温度差は大きくなり得るが、その場合は素子自身の電気抵抗によるジュール熱の発生がエネルギー損失になる。

本研究は、熱電材料の多孔質化により比表面積、ひいては実効的熱伝達係数を高め、熱源、冷熱源との熱伝達を促進することにより、素子中に強制的温度勾配をあたえることにより効率を高められないか、との発想の下に行った。1993年に東京工業大学の越後ら[2]が構想を発表した、デバイスの中に燃焼ガスを流し、燃焼により大きな温度差を得るといったデバイス (図1) もその一つの形である。

そのようなデバイスを作るにあたり、素子材料に求められる条件としては以下の点が挙げられる。まず熱電特性 (特に出力因子) が優れていること。また、効率よく熱交換を行うため大きな比表面積の貫通孔を有している。そして、デバイス化のため優れた機械的性能をもつということである。したがって、これらの条件を満たす一方向に孔の揃った多孔質熱電材料の作製を目指した。一方向に孔の揃った多孔質金属は液相と固相の間の溶解度ギャップを利用し作製される [3]。すなわち、まず金属を水素雰囲気中で溶解した後、凝固させる。すると高温液体に溶け込んでいる水素のうち、固相に溶けきれない分が凝固時に気体として放出される。これを利用して放出される水素 (気相) と金属 (固相) の二相組織が得られる。凝固方向を一方向に制御すれば、一方向に孔の伸びた多孔質金属となるのである。

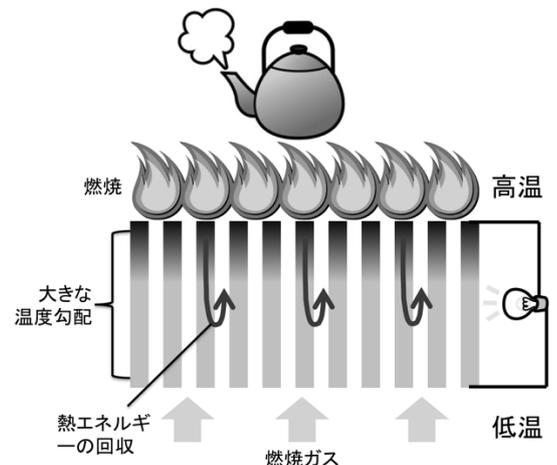


図1. 多孔質熱電材料を用いた燃焼発電デバイス [2]

シリコンについては、中畑ら[4]によってこの原理により多孔質化可能であることが報告されている。しかし、前述のようなデバイスへの応用を考えると熱電材料としての性質を知る必要がある。そこで、本研究ではドーピングする元素が孔の形成に及ぼす影響を調べた。また、本方法で作製するシリコンには水素が固溶していると考えられ、それが熱電特性に影響を及ぼす可能性がある。そこで、固溶水素が熱電特性に及ぼす影響を評価した。さらに、多孔質シリコンを熱電デバイスに使用する際に必要な金属電極の接合実験を行った。

熱電材料としてはシリコンの他に上述の方法で多孔質化された例はない。そこで、シリコンより低温での特性がよい  $Mg_2Si$  及びコンスタンタンの多孔質化を試みた。

## 2.2. 実験方法

### 2.2.1. 多孔質熱電材料の作製

一方向に孔の揃った多孔質シリコンの作製は、中畑のロータス型ポーラスシリコンを作製した方法 [4] と同様の方法で行った。シリコンにドーピングする元素にはボロンを選定し、Si-1at.%B の組成で実験を行った。アルミナタンマン管(材質:NC((株)ニッカトー))にシリコン (純度 99.999%) およびボロン (純度 99%) を入れ、一定圧力下 (0.3MPa)の水素雰囲気中で誘導加熱コイルにより 1560℃ で溶融した。溶融した試料は、水を循環させ冷却された銅板の上に置かれた型 (直径 30mm) に流し込み凝固させた。型の側面は金属の薄い板を円筒状に丸めて作製されており熱容量が小さいため、凝固時に熱の側面に向けての熱流は小さい。したがって、試料は底から上方に向かって一方向に凝固する。作製したポーラスシリコンインゴットはロースピードダイヤモンドカッターにより凝固方向に平行に均等に切断し、その後得られた試料の一つを凝固方向に垂直に冷却面から 4 mm 間隔で切断した。凝固方向に対して垂直な断面での気孔率および平均直径を画像解析によって評価した。試料のキャリア濃度はホール効果測定により評価した。 $Mg_2Si$  及びコンスタンタンについても同様の方法で実験を行った。

### 2.2.2. シリコンと金属電極の接合

シリコンとの接合金属として、Cu と Ag を選定し実験を行った。接合実験は、シリコンと金属試料の接合面を接触させ、ジグ中に挟み込み加熱する方法と、圧力を制御しながら加熱する方法の二通りで行った。

## 2.3. 結果と考察

### 2.3.1. 一方向に孔の揃った多孔質シリコンの作製

実験で得られた試料を凝固方向に対して垂直に切断した断面の概観を図 2(a)に、平行に切断した断面の概観を図 2 (b)に示す。垂直断面図において気孔は円形であり、平行断面図において気孔は凝固方向に成長し

ていることが確認できた。

次に冷却面から 4 mm ごとに切断し、それぞれ画像解析した結果を図 3 に示す。気孔の平均直径は冷却面から離れるほど大きくなり、気孔率も高くなっている。これは上端部分では冷却の効果が薄まっているためと考えられる。また Si と Si-B を比較するとわずかに Si-B が低い値をとっている。しかし、図の試料作製時の誤差から考えると Si および Si-B の間に大きな違いはないと考えてよい。

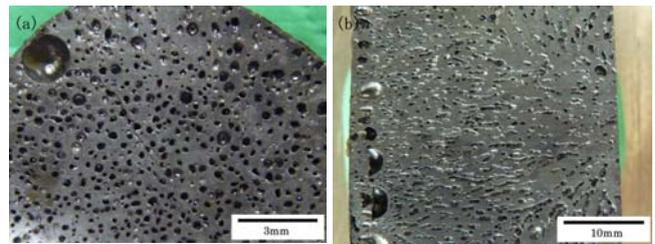


図 2. 水素雰囲気 (0.3 MPa) 下での一方向凝固法により作製した多孔質 Si の凝固方向に垂直な断面 (a) (冷却面から 8mm 部分) 及び平行な断面 (b)。

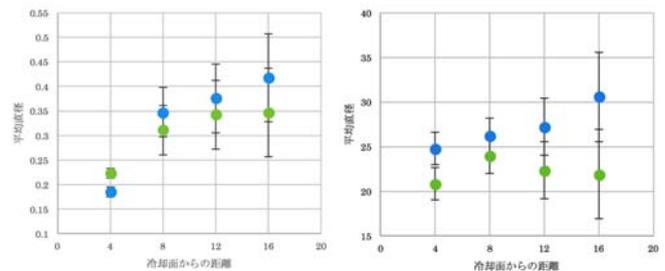


図 3. 冷却面からの距離と平均直径 (左図) および気孔率 (右図) との関係

### 2.3.2. 固溶水素のキャリア濃度に対する影響

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をドーピングしたシリコンは、ボロンをドーピングしていないシリコンに比べ、2-3 桁キャリア濃度が高く、ドーピングしたボロンがキャリアとして活性化していることが確認できた。

また同じ試料内において冷却面から 4 mm 間隔で切断し、それぞれホール効果測定を行った結果を表 2 に示す。表 2 から試料内においてキャリア濃度にばらつき

表 1. 多孔質および無垢の Si・Si-B 試料のキャリア濃度

	キャリア濃度 ( $cm^{-3}$ )	
	多孔質 (水素固溶あり)	無垢 (水素固溶なし)
Bドーピングなし	$1.3 \times 10^{18}$	$4.7 \times 10^{18}$
Bドーピング(1at.%)	$1.5 \times 10^{21}$	$1.4 \times 10^{20}$

があるのが確認できた。試料作製は一方向凝固によるが、凝固時のマクロな偏析によるボロン分布の偏りが原因の可能性があり、今後の課題であると言える。このように、得られた多孔質シリコンのキャリア濃度にはある程度ばらつきがあることを考慮すると、表 1 における多孔質シリコン（水素雰囲気中で作製されるため水素が固溶していると考えられる）と無垢のシリコン（アルゴン中で作製するため水素は固溶していないと考えられる）のキャリア濃度の差は小さい。このことより、固溶水素が熱電特性に与える影響は小さいと考えられる。

表 2. Si-B 試料における B 濃度の分布

冷却面からの距離(mm)	キャリア濃度( $\text{cm}^{-3}$ )
4	$5.19 \times 10^{20}$
8	$8.22 \times 10^{21}$
12	$1.46 \times 10^{21}$
16	$3.01 \times 10^{20}$

### 2.3.3. 多孔質 $\text{Mg}_2\text{Si}$ 及びコンスタンタンの作製

水素雰囲気下での溶解、凝固により作製した  $\text{Mg}_2\text{Si}$  およびコンスタンタンの切断面を図 4 に示す。

$\text{Mg}_2\text{Si}$  (a) 並びにコンスタンタン (b) のいずれにおいても孔が生成しており、原理的に本方法で多孔質化が可能であることが確認された。

$\text{Mg}_2\text{Si}$  (a) は冷却面近傍 (5 mm 程度) に多くの微細な孔が生成し、それらは冷却面から上方に向け孔の

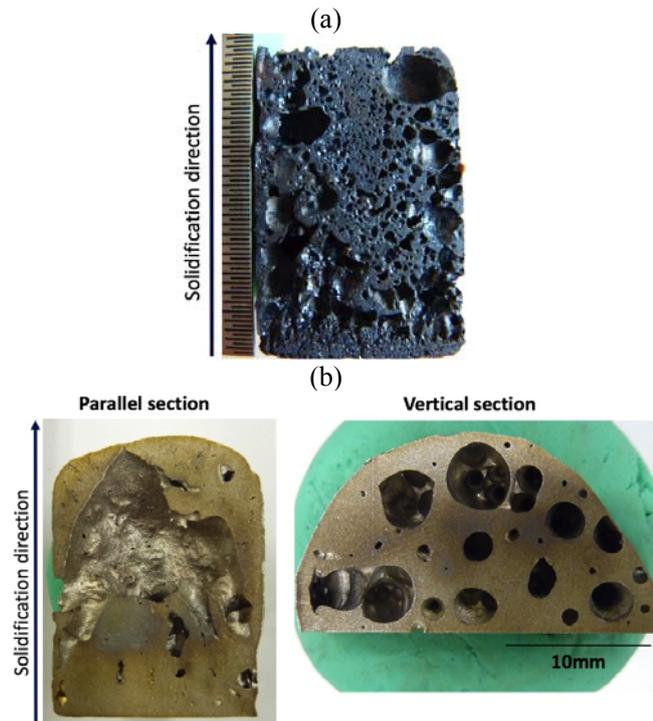


図 4. 水素雰囲気下での一方向凝固法により作製した多孔質  $\text{Mg}_2\text{Si}$  (a) およびコンスタンタン (b)

向きが揃っているのが確認される。一方で、冷却面からの距離が大きい領域では孔の形状は大きく球状へと変化している。銅やニッケルなどの単体の金属では孔が伸びやすいのに対し、 $\text{Mg}_2\text{Si}$  では孔が伸びていない。この原因の一つに熱伝導率の違いが挙げられる。 $\text{Mg}_2\text{Si}$  は単体の金属に対し一桁以上熱伝導率が小さい。すると、凝固時に固-液界面の移動速度は小さく、また温度勾配が大きい。温度勾配が大きいと孔の底部で冷却が進む。すると孔内の水素が冷却され収縮するため、まだ液体である孔の上部から液体が孔内に流入し孔が閉じる。この現象は温度勾配が大きい、すなわち熱伝導率が小さい方が起こりやすいと考えられる。熱伝導率が小さいのは熱電材料の特徴であるため、今後、熱電材料の多孔質化における課題の一つである。

コンスタンタン (b) は、孔が一方向に伸びているのが確認される。コンスタンタンの構成元素である銅およびニッケルはいずれも本方法で多孔質化可能であることが報告されている [3]。このことを考慮すれば、それらの固溶体であるコンスタンタンの組成の液体が十分に水素を溶解する化学的性質をもつことは理解できる。

孔の形成状態は、銅やニッケルに比べ粗大である。これは、コンスタンタンの熱伝導率がこれらの単体金属に比べ著しく小さいことから、凝固速度が遅いためであると理解できる。また、合金では状態図的に固-液二相領域を経て凝固が進行する。するとマッシュゾーン（液体中に固体が生成し、固-液二相となった状態）では固体の生成と同時に気泡も生成すると考えられる。この気泡の周囲には固体と液体が両方存在するため、孔が球状、あるいはランダム形状に成長すると思われる。コンスタンタンにおいて孔が一方向に伸びていない理由としては以上のような理由が考えられる。

### 2.4. まとめ

水素雰囲気下で溶解した後、一方向凝固させることにより一方向に伸びた孔をもつ多孔質シリコンを作製することができた。一方向凝固時に底面から上方に向け凝固が進行するように鋳型を設計したため、多孔質シリコン中の孔はその方向に伸びている。

多孔質シリコンはボロンを添加する場合としない場合の二通りで作製した。ボロンを添加 (1 at.%) して作製した多孔質シリコンは、ボロンを添加していない多孔質シリコンよりキャリア濃度が 2-3 桁大きい。このことは、本多孔質シリコン作製方法でボロンはキャリアを生成していることを示唆する。

また、本多孔質シリコン作製方法では、作製される多孔質シリコンが水素を含んでいると考えられるが、本研究によりその水素の熱電特性に及ぼす影響は小さいことがわかった。

また、 $\text{Mg}_2\text{Si}$  ならびにコンスタンタンを水素雰囲気下で凝固させる実験の結果、ともに孔の形成が見られ、原理的に本方法で多孔質化が可能であることが確認され

た。

どちらの材料においても、単体金属のように孔の伸びていない。孔の伸びが見られるのは、冷却面近傍のみである。この原因としては、熱伝導率の低さや凝固時の固-液二相領域の存在が挙げられる。以前に例えばステンレス鋼の多孔質化で研究されているように [5]、このような合金系においても、単純な鋳造ではなく温度勾配、固-液界面の移動速度を外的に制御した一方向凝固を行えば、孔は伸びる可能性がある。Mg<sub>2</sub>Si やコンスタンタンといった複数の構成元素を含む熱電材料の多孔質化においては、一方向に孔を伸ばすことが今後の課題である。

### 3. ナノ構造化熱電材料

#### 3.1. はじめに

熱電材料をナノ構造化することにより、熱伝導率が低下し、熱電性能指数  $zT$  が向上することが明らかになりつつあり、世界的に多くの研究者がさまざまな角度から研究を行っている。我々のグループはその先駆けとなる研究をこれまで推進してきた。ところで、熱電材料のナノ構造化は、その他の機能を有する可能性がある。本研究では、熱伝導率の低下に加え、ナノ構造化の新しい機能にも着目した。

#### 3.2. ドーパント固溶度の拡張

シリコンはクラーク数が 2 番目に多い地球上に豊富に存在する元素であり、環境にも低負荷である。シリコン単体は、真性半導体であり少量のドーパント添加により伝導性が付与され、優れた熱電特性も持ち合わせているため、最近、熱電材料としての応用に期待が高まっている。しかし、熱電材料として実用化のためには、熱伝導率が高いこと、キャリア濃度の可変領域が低いことなどを克服しなければならない。本研究は、シリコンを熱電材料として使用できるようにするため、熱伝導率の低下及びドーパント固溶度の増大をともに達成することを目的に、ドーパント元素のナノ粒子を Si 中に分散させるための研究を行った。熱伝導率の低下、ドーパント固溶度の増大はともに熱電性能指数  $zT$  の向上に寄与する。

ドーパント元素として、Sb を選定した。まず、メカニカルアロイングによりドーパントを Si 中に強制固溶させた。その後、1000 °Cにて焼結により粉体を固化させるとともに、Sb を固相析出させナノ複合体を得た。

図 5 にナノ複合体組織の走査電子顕微鏡写真を示す。焼結時間によりナノ組織のサイズは変化が見られる。図 6 に焼結時間の増加に伴う格子定数及びキャリア濃度の測定結果を示す。格子定数は X 線回折法により、キャリア濃度はホール効果の測定により決定した。

図 5 に見られるようにナノ構造は 10 min 焼結の試料で最も細かい。それに伴い、10 min 焼結の試料においてはキャリア濃度が高い。このキャリア濃度の増加は

格子定数の増加を伴っている。従って、シリコンに対し、原子サイズの大きいアンチモン原子が置換型に固溶することによって、キャリアを発生したと解釈することができる。一方で、試料を 24 h アニールすることにより組織を粗大化させると格子定数、キャリア濃度も減少しており、焼結時間に依存せず、一定である。従って、アニール後の試料は、ナノ組織の効果が薄れた状態でのキャリア濃度、格子定数であると考えられる。

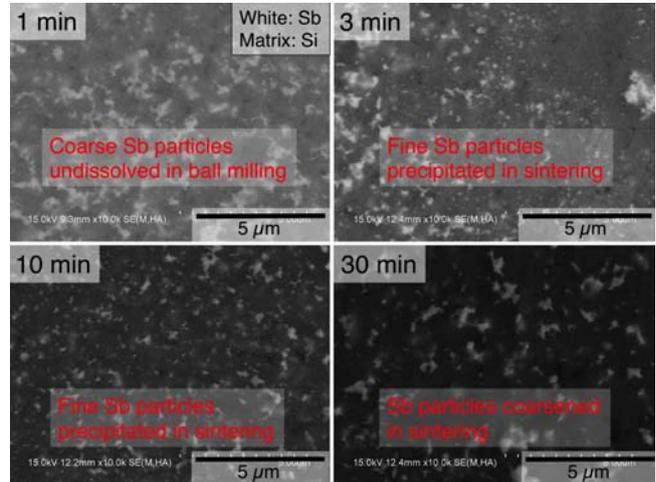


図 5. さまざまな時間焼結した Si-3at.%Sb の組織

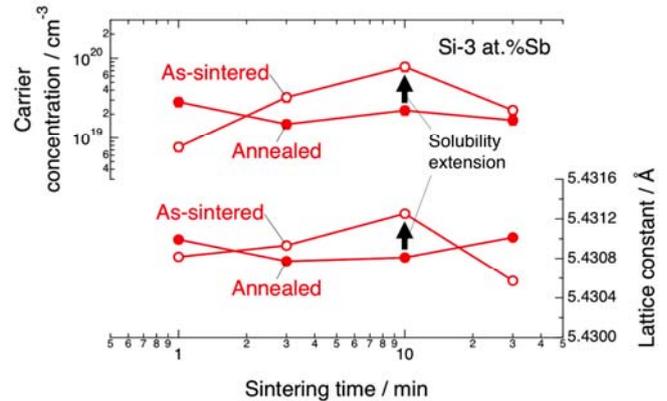


図 6. Si-3at.%Sb の焼結時間とキャリア濃度、格子定数の関係

では、アニール前のキャリア濃度が高い状態とはナノ構造の何によってもたらされるだろうか？それは、ナノ複合組織のもたらす高密度界面エネルギーの効果、すなわち、ギブストムソン効果によりシリコン中のアンチモンの固溶度が拡張した結果だと解釈できる。

#### 3.2. バルク熱電材料の低次元ナノ構造化の試み

1993 年、Hicks と Dresselhaus [6] はキャリアを低次元空間に閉じ込めると状態密度が変化し、 $S$  (ゼーベック係数) が飛躍的に上昇すると理論的に予測した。このことは 2000 年台に薄膜材料で実証された [7]。しかし、熱発電デバイスの実用化には、高性能なバルク材料が必要である。

我々は、最近、高エネルギー非平衡状態を介する新しいプロセスにより、バルク材料に「シングルナノ」の領域 (数 nm のオーダー) の球状析出物分散構造を導

入することに成功し、格子熱伝導率の大幅な低下を確認した [8]. 本研究では、このプロセスにより同様のサイズスケールをもつ新しい絶縁体-熱電半導体低次元ナノバルクコンポジットを創製する. すなわち、絶縁体ナノ粒子同士の粒界にシングルナノメートルの厚さをもつ熱電半導体 (伝導相) をセル壁状に析出させ、熱電半導体のナノセル構造 (図 7) を実現させる.

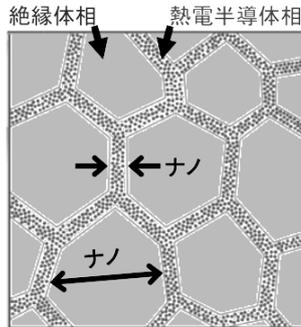


図 7. 熱電半導体相のナノセル構造

この極微構造を導入すれば、これまで主に薄膜材料やナノワイヤのみで研究されてきた量子効果がバルク熱電材料で発現すると期待できる. すなわち、キャリアをその低次元 (セル壁状) 熱電半導体中に閉じ込めること (量子閉じ込め効果) により、巨大ゼーベック係数  $S$  を得る. さらに、超高密度界面におけるフォノン散乱効果により格子熱伝導率  $\kappa_L$  の低減効果を顕在化させる. これら両方の効果により、熱電性能指数は飛躍的に増大する.

図 7 のような構造を実現するために、二つのルートで実験を行った. 一つは、高エネルギーボールミル装置を用いて Si と  $Al_2O_3$  をミリングした後、焼結する方法である. もう一つは、予め Al ナノ粒子を酸化し Boehmite ( $AlOOH$ ) のナノファイバーを合成し、ボールミル装置を用いて Si と混合した後、焼結する方法である.

これらの実験で得られた試料の組織の観察結果を図 8 に示す. いずれの方法で得られた試料についても、Si- $Al_2O_3$  ナノ複合組織が確認された. 今後、組織サイズの制御を行うとともに、熱電特性を測定し、ナノ構

造の効果を検討していく予定である.

### 3.3. まとめ

熱電材料におけるナノ構造化の新しい機能性を検討するために、新しいコンセプトのもとで研究を開始し、現段階で目的に照らして適したナノ構造の導入法が確立された. 今後、構造と特性の関わりについて詳細な研究を推進していく予定である. 本研究はシリコンを題材として行っているが、本研究のコンセプトはどのような材料についても適用できる可能性がある. 広く応用されるよう基礎的理解を重要視しつつ研究を進めていく方針である.

### 【参考文献】

- [1] 坂田亮, 熱電変換—基礎と応用—, 裳華房 (2005).
- [2] 越後亮三, 日本機械学会会誌, 96 (1993), 204-208.
- [3] H. Nakajima, Fabrication, properties and application of porous metals with directional pores, Prog. Mater. Sci., 52, 1091-1173 (2007).
- [4] T. Nakahata et al., Fabrication of lotus-type porous silicon by unidirectional solidification in hydrogen, Mater. Sci. Eng., A384, 373-376 (2004).
- [5] T. Ikeda, T. Aoki, H. Nakajima, Fabrication of Lotus-Type Porous Stainless Steel by Continuous Zone Melting Technique and Mechanical Property, Metall. Mater. Trans., 36A, 77-86 (2005).
- [6] L. D. Hicks and M. S. Dresselhaus, Phys. Rev. B 47, 12727 (1993).
- [7] H. Ohta et al., Nature Mater., 6, 129-134 (2007).
- [8] T. Ikeda, L. Haviez, Y. Li, G.J. Snyder, Nanostructuring of thermoelectric  $Mg_2Si$  via a nonequilibrium intermediate state, Small, 8, 2350-2355 (2012).

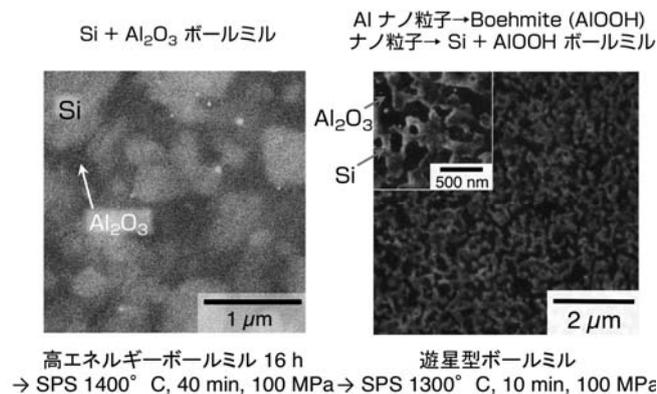


図 8. 本研究で得られたバルク試料中の Si- $Al_2O_3$  ナノ複合組織

## 物性顕微鏡を用いた界面熱抵抗測定

Approach for the thermal interface resistance measurement of composite material  
using the thermal microscope

西剛史, 大川萌里\*, 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\*, 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

一部を第 37 回日本熱物性シンポジウム,岡山,2016 年 11 月 28 日で発表

### 1.概要

熱物性顕微鏡は産業技術総合研究所、ベテル・ハドソン研究所、茨城大学工学部の共同研究により開発された局所の熱浸透率を測定する装置である。本年は界面の熱抵抗をこの手法で測定する事を試みた。

### 2.はじめに

界面熱物性は複数の相からなる熱電材料や複合材料において材料の特性を把握する上で重要となる値である。しかし、複相からなる材料は母材と繊維材との界面の性質が加工プロセスの僅かな違いにより大きく変化するため、物性が大きく変化してしまうことで、同等の物性を持つ複合材料の作製が困難であることが課題となっている。

以上の背景から、高精度な界面熱抵抗の計測は複合材料の生産効率を向上させる上で必要不可欠であるが、①界面は常に局所的にしか存在せず局所の熱は一瞬で伝わってしまうこと、②その一瞬の現象を高い時間分解能で温度計測することが困難であること、が原因で界面の熱抵抗を実測することが困難とされてきた。

そこで、本研究では、①ガラス板+ガラスエポキシ板、②ガラス板+ウレタン板、③ガラス板+シリコン板の3種類を複合材料の模擬試料を作製し、複合材料の界面付近を斜めに切断することで、熱物性顕微鏡による切断面の熱浸透率を熱物性顕微鏡にて測定し、界面熱抵抗を取得するプロセスを確立することを目的とした。

### 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

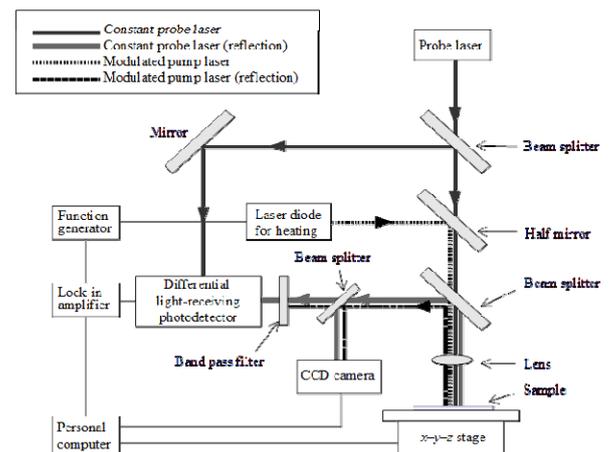


Figure1 Schematic diagram of Thermal Microscope

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測温法である<sup>1,2)</sup>。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

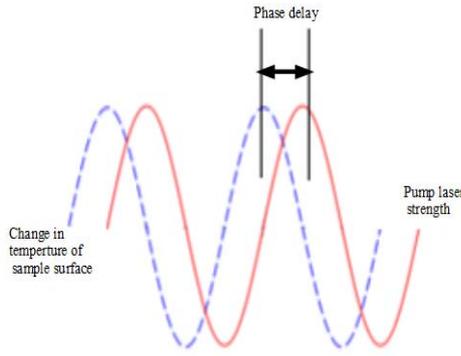


Figure 2 Principle of thermal microscope

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に試料とレーザの模式図を示す。

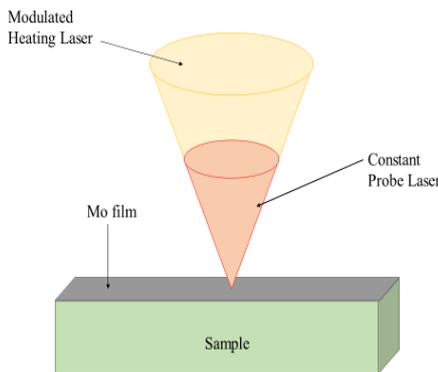


Figure 3 Schematic diagram of laser and sample

## 4. 実験

### 3.1 測定試料

本研究では、複合材料の模擬測定試料を以下の手順により作製した。(1)ガラス板とガラスエポキシ板を1.5mm厚の板を化学反応型接着剤(セメダインスーパーX2、セメダイン株式会社)にて接着した。(2)接着後、模擬試料の界面付近を水平方向に対し5度の角度で斜めに切断した。(3)アクリル・ワン(一液性可視光硬化包埋樹脂)を用いて樹脂埋め加工した。(4)切断面を粒度1200番のエメリ紙により、回転研磨機を用いて研磨した後、粒径1 $\mu$ mのダイヤモンドペーストを用いてバフ研磨した。(5)切断面に約100nmの厚さになるようMo薄膜をスパッタした。

### 3.2 測定方法

上記によって作製した二層からなる複合材料の模擬試料を以下2つの方法で熱物性顕微鏡を用い測定した。(1)界面中央付近1mmを50 $\mu$ mごとに、ガラスエポキシ

試料からガラス試料の方向へ直線状に測定した。

(2)界面中央付近の500 $\mu$ m $\times$ 500 $\mu$ m四方を50 $\mu$ mごとに面状に測定した。図4のように試料を左から右に向

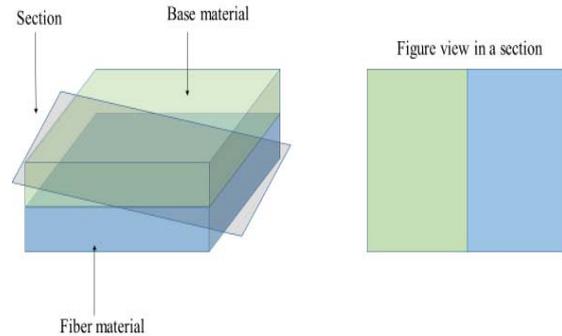


Figure 4 Schematic diagram of the sample for the thermal interface resistance measurement

かって測定すると、界面の部分で熱抵抗に起因する物性値の変化が計測され、それを定量的に評価することにより、界面熱抵抗を導くことが可能となる。もし界面熱抵抗が存在すると、2つの層から推定される値よりも低い値が、測定により導かれることが推測される。

## 5. 結論

図5に界面中央付近1mmを50 $\mu$ mごとに、ガラスエポキシ試料からガラス試料の方向へ直線状に測定した結果を示す。この結果を見ると位相差は70度を中心と

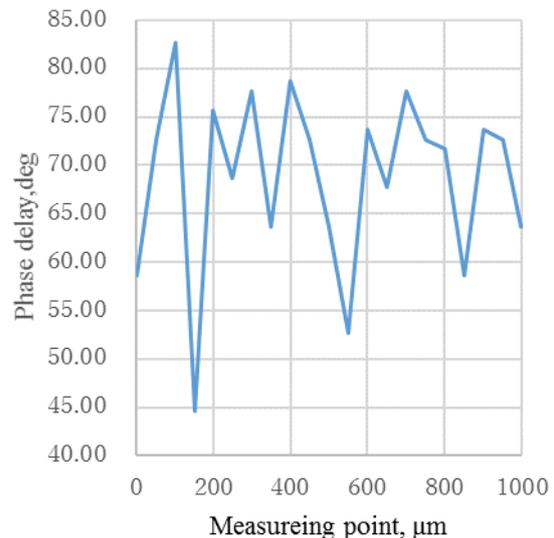


Figure 5 One-dimensional experimental result of phase delay

して大きなばらつきがあることがわかる。この結果のみでは界面熱抵抗の測定に不十分であると判断し、同じく界面中央付近の500 $\mu$ m $\times$ 500 $\mu$ m四方を50 $\mu$ mごと

に面状に再測定した。その結果を図 6 に示す。面全体として位相差にばらつきが見られたが、そこには界面熱抵抗に相当する明確な位相差の断層のようなものは見られなかった。

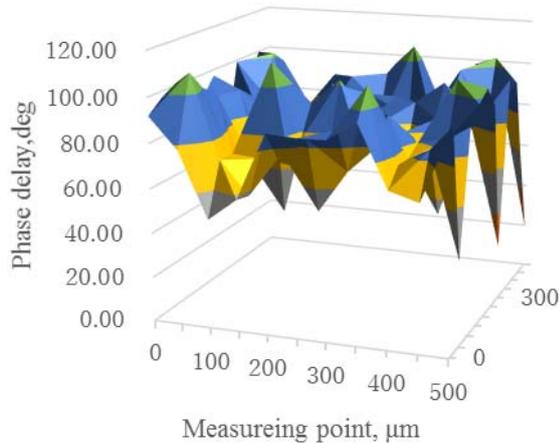


Figure 6 Two-dimensional Experimental result of phase delay

この結果のみでは界面熱抵抗の測定に不十分であると判断し、同じく界面中央付近の $500\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$ 四方を $50\mu\text{m}$ ごとに面状に再測定した。その結果を図6に示す。面全体として位相差にばらつきが見られたがそこに界面熱抵抗に相当する明確な位相差の断層のようなものは見られなかった。

## 6.おわりに

熱物性顕微鏡を用いて界面熱抵抗測定を検討した結果、位相差測定の時点でデータのばらつきが大きく、界面熱抵抗を評価できるような明確な位相差を検出することができなかった。なお、今回測定した界面自体の厚さは約 $20\mu\text{m}$ 程度であることから、熱物性顕微鏡を用いて $10\mu\text{m}$ の間隔で面上の測定することで界面熱抵抗の明確な違いを観測することができるのではと考えている。

## NOMENCLATURE

$b$ : Thermal effusivity,  $\text{W s}^{0.5} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ .

$T$ : Heat diffusion, s.

$\rho$ : Density,  $\text{kg m}^{-3}$ .

$c$ : Heat capacity,  $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ .

$\alpha$ : Thermal diffusivity,  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ .

$\lambda$ : Thermal conductivity,  $\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$ .

$\delta$ : Phase delay of the temperature response to the heating beam, rad.

$d$ : Film thickness, nm.

$\omega$ : Angular frequency of intensity modulation,  $\text{s}^{-1}$ .

$A$ : Temperature amplitude of the surface heated by the modulated pump beam, K.

## 【参考文献】

- 1) K.Hatori, N. Taketoshi, T. Baba, H.Ohta: Thermoreflectance Technique to Measure Thermal Effusivity Distribution with High Spatial Resolution, Rev. Sci. Instrum., **76**, 114901(1/7), (2005)
- 2) H.Shibata, H. Ohta, T. Nemoto, S. Nagayama, Y. Waseda, K. Fujii, K.T.Jacob: Measurement for Thermal Effusivity of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  Alloys Using Thermoreflectance with Periodic Heating, High Temp. Mater. Process.**29**,, 515/522, (2011)

## 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<sup>1)</sup>がある。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)</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±9T の範囲で測定を行った。

### 4. 結果と考察

磁性体試料におけるホール抵抗  $R_{\text{Hall}}$  は次のように表される。

$$R_{\text{Hall}} = \left( \frac{\mu_0 R_0}{t} \right) H + \left( \frac{\mu_0 R_s}{t} \right) M \quad \dots (1)$$

ここで、 $R_0$  は正常ホール係数、 $R_s$  は異常ホール係数、 $\mu_0$  は真空の透磁率、 $t$  は膜厚、 $H$  は外部磁場、 $M$  は磁化である。右辺第 1 項が正常ホール抵抗、第 2 項が異常ホール抵抗  $R_{\text{AHE}}$  である。金属磁性体の正常ホール抵抗は異常ホール抵抗と比べて無視することができる。本研究では、得られたホール抵抗はすべて異常ホール抵抗によるものとして解析した。

温度を変えて測定した  $t_{\text{TFC}} = 50\text{nm}$  の TbFeCo 薄膜の異常ホール抵抗を Fig. 1 に示す。異常ホール抵抗の符号はいずれの温度においても正であり、温度が上がるにつれ、異常ホール抵抗の値が小さくなるのがわかる。

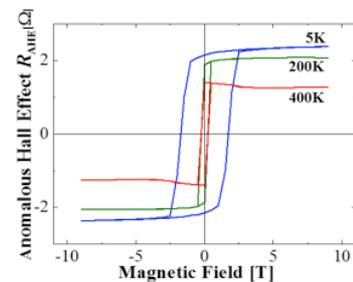


Fig.1 Anomalous Hall resistance of 50nm-thick TbFeCo thin film.

20nm 厚の TbFeCo 薄膜の異常ホール抵抗を Fig.2 に示す。高磁場側の異常ホール抵抗の符号が、温度上昇に伴い、反転することを見出した。磁化及び異常ホール係数は、磁場に対して単調に変化すると期待できるため、これだけではこの結果を十分に理解することはできない。そこで、TbFeCo 層厚を 5nm、10nm と変えて同様の測定を行った。

5nm 厚の TbFeCo 薄膜の異常ホール抵抗を Fig.3 に示す。50nm の異常ホール抵抗とは逆符号の異常ホール抵抗を観測し、いずれの温度域においても符号反転は見られなかった。

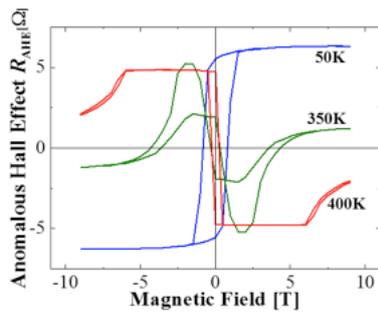


Fig.2 Fig.1 Anomalous Hall resistance of 20nm-thick TbFeCo thin film.

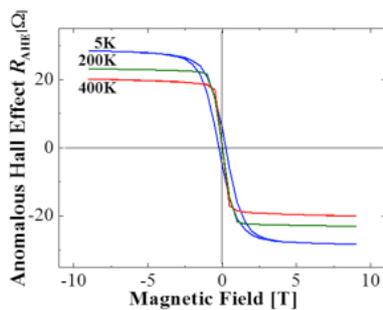


Fig.3 Anomalous Hall resistance of 5nm-thick TbFeCo thin film.

膜厚の異なる TbFeCo 薄膜における磁場 9T の異常ホール抵抗率の温度依存性を Fig.4 に示す。膜厚が厚くなるにつれて、符号反転が起こる温度も上昇していることがわかる。

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

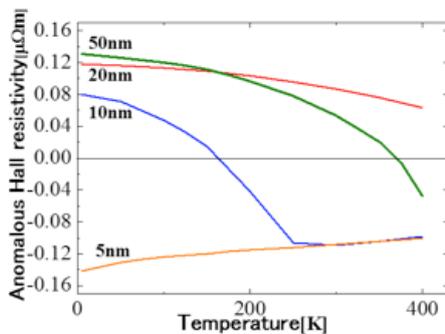


Fig.4 Temperature dependence of anomalous Hall resistivity in TbFeCo thin films various thicknesses.

仮定することで理解を試みた。

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が知られており、低温で RE-site, 高温で TM-site が優位であるとすると、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が明らかとなった。

## 【参考文献】

- 1) S.-H. Yang, K. -S. Ryu and S. Parkin: Domain-wall velocities of up to  $750 \text{ m s}^{-1}$  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.

## Mg<sub>2</sub>Si 合金における Si 析出相の成長過程の応力依存性

Stress dependence on the Si precipitation process in Mg<sub>2</sub>Si

劉 濱, 池田 輝之, 篠嶋 妥

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

Liu Bin, Teruyuki Ikeda, Yasushi Sasajima

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

### 1. 概要

安価で低環境負荷型のシリコン及びシリサイド熱電材料にナノメートルオーダーの微細構造を導入し、熱電特性を著しく向上させた実用熱電材料を実現することを目的として、母相 Mg<sub>2</sub>Si から Si 析出相の析出と成長過程をフェーズフィールド法によりシミュレートした。アイゲン歪ならびに外部応力を利用して標記のナノ構造を実現する方法について検討した。外部応力を適切に利用してナノ構造を制御し、界面でフォノンを強く散乱するが、電子の散乱は少ない材料組織を実現することによって、熱電性能を改善できる可能性があることを計算機実験により実証した。

### 2. はじめに

近年、化石エネルギー資源の枯渇が深刻化している。化石燃料を燃焼させると、大量の二酸化炭素が排出されて地球の温室効果を誘発し異常気象現象を発生する。そのため、無駄に捨てられる熱を電気エネルギーとして有効利用できれば、エネルギー問題の解決の一助となる。したがって、廃熱から電気エネルギーに転換する熱電材料は非常に重要である。熱電材料を廃熱発電デバイスとして広く普及させるためには、地球上に豊富に存在し、安価で環境親和性に優れた元素のみを用いて熱電材料を開発することが望ましい。この目的のために、安価で低環境負荷型のシリコン及びシリサイド熱電材料にナノメートルオーダーの微細構造を導入し、超高密度相界面を形成させることができれば、熱電特性を著しく向上させた実用熱電材料を実現できる<sup>1)</sup>。そこで本研究は、母相 Mg<sub>2</sub>Si から Si 析出相の析出と成長過程をフェーズフィールド法によりシミュレートし、アイゲン歪ならびに外部応力を利用して標記のナノ構造を実現する方法について検討する。

### 3. 計算方法

#### 3-1. フェーズフィールド法

系の全自由エネルギーは、化学自由エネルギー  $G_{chem}$ 、勾配エネルギー  $G_{grad}$ 、弾性エネルギー  $G_{str}$  の和として  $G_{sys} = G_{chem} + G_{grad} + G_{str}$  のように表わす。化学的自由エネルギーは、濃度場  $c(r, t)$  と析出相の存在度  $s_i(r, t)$ , ( $i = 1, 2$ ) ( $i$  は Mg<sub>2</sub>Si 母相に対する Si 析出相の 2 種類のバリエーションである) を用いて Landau 展開形式で表される。

$$G_{chem}(c, s_1, s_2) = \frac{A_1}{2}(c - C_1) + \frac{A_2}{2}(c - C_2)(s_1^2 + s_2^2) - \frac{A_3}{4}(s_1^4 + s_2^4) + \frac{A_4}{6}(s_1^6 + s_2^6) + A_5 s_1^2 s_2^2 \quad (1)$$

ここで  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$  は定数で、CALPHAD 法等によって、2相の自由エネルギー曲線から決められる<sup>2)</sup>。

勾配エネルギーは、最も単純な下式を用いて計算する。

$$G_{grad} = \frac{1}{2} K_s \int_r [(\nabla s_1)^2 + (\nabla s_2)^2] dr + \frac{1}{2} K_c \int_r (\nabla c)^2 dr \quad (2)$$

$K_s, K_c$  は勾配エネルギー係数である。

アイゲン歪場  $\varepsilon_{ij}^0(r, t)$  は、2つのバリエーションが生じる際のアイゲン歪と析出相の存在度  $s_i^2(r)$  の加重平均として、次式で表される。

$$\varepsilon_{ij}^0(r, t) = \sum_p \varepsilon_{ij}^0(p) s_i^2(r) \quad (p = 1, 2) \quad (3)$$

ここで  $\varepsilon_{ij}^0(p)$  は変態歪である。また、単位体積あたりの弾性歪エネルギー  $E_{el}$  をルジャンドル変換して外部応力  $\sigma_{ij}^a$  を考慮したギブスエネルギーとすると、

$$G_{str} = E_{el} - \sigma_{ij}^a \varepsilon_{ij}^c \quad (4)$$

となる。ここで、 $\varepsilon_{ij}^c$  は均一歪である。また、

$$E_{el} = C_{ijkl} \{ \varepsilon_{ij}^{el}(r, t) \varepsilon_{kl}^{el}(r, t) \} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ij}^{el}(r, t) = \varepsilon_{ij}^c(r, t) - \varepsilon_{ij}^0(r, t) \quad (6)$$

$C_{ijkl}$ は弾性係数、 $\varepsilon_{ij}^{el}(r, t)$ は弾性歪であり、全歪 $\varepsilon_{ij}^c(r, t)$ からアイゲン歪 $\varepsilon_{ij}^0(r, t)$ を差し引いて求められる。物体表面の境界条件として、一定外力での力学的平衡状態における $\varepsilon_{ij}^c$ は $\partial E_{str} / \partial \varepsilon_{ij}^c = 0$ を満足するので、これに式(5)を代入して均一歪 $\varepsilon_{ij}^c$ は

$$\varepsilon_{ij}^c = S_{ijkl} \sigma_{kl}^a + \sum_p \varepsilon_{ij}^0(p) \overline{s_i^2(r)} \quad (7)$$

と導かれる。 $S_{ijkl}$ は弾性コンプライアンスである。

### 3-2. 発展方程式

保存場 $c(r, t)$ および非保存場 $s_i(r, t)$ , ( $i = 1, 2$ )の非線形発展方程式を同時に数値的に解いて、組織形成の時間発展を計算する。以下に保存場および非保存場の非線形発展方程式を示す。

$$\frac{\partial c(r, t)}{\partial t} = M \nabla^2 \frac{\delta G_{sys}}{\delta c(r, t)} \quad \text{保存場方程式} \quad (8)$$

$$\frac{\partial s_i(r, t)}{\partial t} = -L \frac{\delta G_{sys}}{\delta s_i(r, t)} \quad \text{非保存場方程式} \quad (9)$$

$M$ と $L$ は濃度および秩序変数の緩和定数である。

### 3-3. 計算条件

数値シミュレーションに用いる解析領域は、一辺 $L = 256 \text{ nm}$ の正方形領域であり、系は二次元平面歪状態とする。

また、 $s_i$ 析出相のバリエントを $s_1$ 、 $s_2$ で表わす。

$\text{Mg}_2\text{Si}$ の通常の結晶方位での弾性係数は $C_{11} = 121.37 \text{ GPa}$ 、 $C_{12} = 20.28 \text{ GPa}$ 、 $C_{44} = 46.78 \text{ GPa}$ である。 $\text{Si}$ と $\text{Mg}_2\text{Si}$ 界面が半整合界面を形成し、その方位関係が実験によって $\text{Si}[1\bar{1}0] // \text{Mg}_2\text{Si}[1\bar{1}0]$ 、 $\text{Si}[11\bar{2}] // \text{Mg}_2\text{Si}[00\bar{1}]$ であることが知られている。そこで前者を $x$ 軸、後者を $y$ 軸として、応力テンソルの座標変換公式から得られる値 $C_{11} = 138 \text{ GPa}$ 、 $C_{12} = 61 \text{ GPa}$ 、 $C_{44} = 116 \text{ GPa}$ を計算で用いた。この座標系で、変態歪は $\varepsilon_1 = -0.00971$ 、 $\varepsilon_2 = 0.0396$ となる<sup>3)</sup>。母相 $\text{Mg}_2\text{Si}$ 中に、乱数を用いて $\text{Si}$ 析出核の位置を決める。この系を外部応力フリーで $973\text{K}$ に等温保持した。

## 4. 結果と考察

Fig.1(a)はアイゲン歪の影響下での $\text{Si}$ 単一析出相の成長過程である。この計算では系の大きさを $15 \text{ nm} \times 15 \text{ nm}$ として実験結果との対応を取っている。アイゲン歪の影響で $\text{Si}$ 析出相は円形からレンズ状になることを示している。Fig.1(b)はアイゲン歪のある場合、析出物の先端から上下方向に扇状の負の弾性歪エネルギーの領域が発生することを示している。この範囲に別の析出物がかかると析出相間に相互作用が生じ、析出物間の融合が促進されると考えられる。

Fig.2は外部応力下にある $\text{Mg}_2\text{Si}$ 母相からの $\text{Si}$ 析出相の成長過程である。黒色は母相 $\text{Mg}_2\text{Si}$ であり、灰色は析出相 $\text{Si}$ である。時刻 $t$ は、計算組織写真と実験的に得られた組織写真を比較し、無次元時間を実時間に換算したもので1計算ステップは $0.4$ 秒に相当する。上下に引張り応力( $172 \text{ MPa}$ )を印加すると、横方向に成長する析出相より、上下方向に成長する析出相の方が優先的に成長していくことが分かった。

Fig.3は印加する引張り応力を半分にした( $86 \text{ MPa}$ )場合で、引張り応力を加えた方向に平行なバリエントを持つ析出相の方が優先成長するが、横方向にもある程度成長した。

Fig.4は印加する引張り応力を $1.5$ 倍にした( $258 \text{ MPa}$ )場合で、引張り応力を加えた方向に平行なバリエントを持つ析出相が急速に成長し、(d)においては $\text{Si}$ 析出相が集合して巨大なラス状組織を形成した。このように、外部応力を適切に利用してナノ構造を制御し、界面でフォノンを強く散乱するが、電子の散乱は少ない材料組織を実現することによって、熱電性能を改善できる可能性がある。

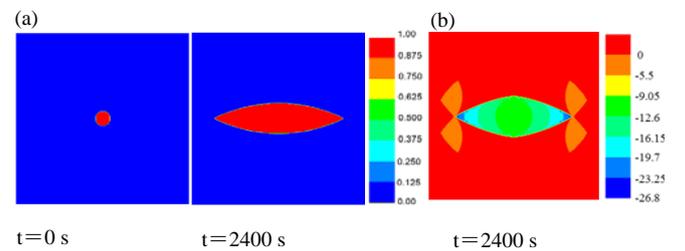


Fig.1 (a) Growth process and (b) elastic strain distribution of an isolated  $\text{Si}$  precipitate under influence of eigen strain.

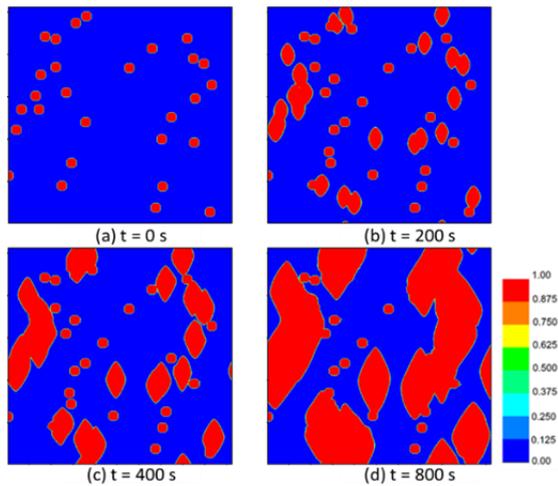


Fig.2 Growth process of Si precipitates under tensile stress 172 MPa.

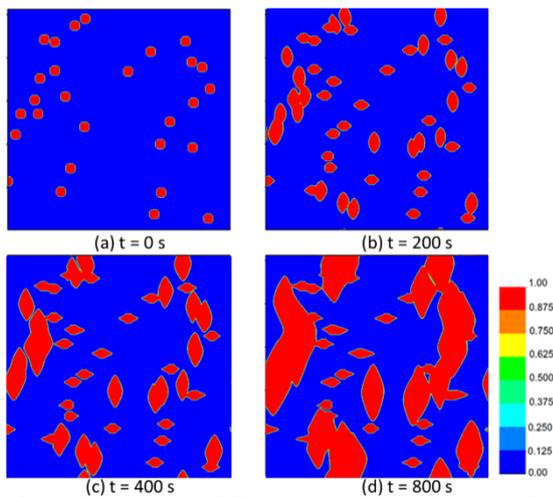


Fig.3 Growth process of Si precipitates under tensile stress 86 MPa.

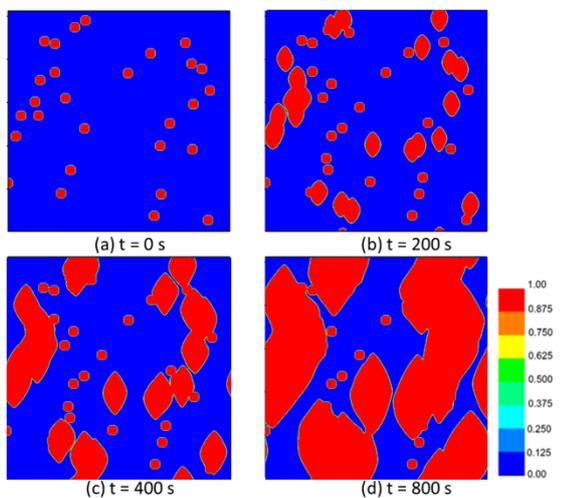


Fig.4 Growth process of Si precipitates under tensile stress 258 MPa.

stress 258 MPa.

## 5. 結論

安価で低環境負荷型のシリコン及びシリサイド熱電材料にナノメートルオーダーの微細構造を導入し、熱電特性を著しく向上させた実用熱電材料を実現することを目的として、母相  $\text{Mg}_2\text{Si}$  から Si 析出相の析出と成長過程をフェーズフィールド法によりシミュレートした。アイゲン歪ならびに外部応力を利用して標記のナノ構造を実現する方法について検討した。Si 単一析出相の成長過程シミュレーションの結果、Si 析出相の形状はアイゲン歪の影響により円形からレンズ状になること、時間の経過に伴って、隣接する Si 析出相が集合して界面が半整合のラス状組織になることがわかった。

次に外部応力を印加して同様の計算を行った。上下に引張り応力(172 MPa)を掛けると、横方向に成長する析出相より、上下方向に成長する析出相の方が優先的に成長していくことがわかる。同じように上下に圧縮応力(172 MPa)を掛けると、横方向に成長する析出相の方が優先的に成長していくことがわかった。このように、本研究ではアイゲン歪ならびに外部応力を適切に利用することでナノ構造を制御しうることが示された。このナノ構造を最適化すれば、界面においてフォノンを強く散乱するが、電子の散乱は少ない材料組織が得られる。この組織を実現した Mg-Si 2 元系合金が熱電性能を大きく改善する可能性がある。

## 6. おわりに

本論文では微視的弾性理論を取り入れたフェーズフィールド法を用いてナノスケールでの材料組織制御の有効性を示すことができた。今後、所望のナノ組織を得る最適工程を予測するシミュレーションの重要性は、新規材料開発においてより一層高まることとなろう。

## 【参考文献】

- (1) 池田 輝之: あたりあ, **53** (2014), 307-311.
- (2) 小山 敏幸: あたりあ, **48** (2009), 555-560.
- (3) B Liu, T. Ikeda and Y. Sasajima: Mater. Trans, **57** (2016), 922-926.

# 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

本研究は、超伝導を用いた、中赤外光検出器の感度向上を目指して、検出器に、アンテナ構造を集積化する研究である。一般的に、従来使用されている中赤外光検出器は受光エネルギーを光子として検出する粒子性を用いている<sup>1)</sup>。そのため、その受光面は、いわゆる、単純な面構造であり、面に当たる光粒子が検出されるという機構となっている。このような粒子性を用いた検出器では、検出器の面で検出を行う構造上、表面積を大きくすると寄生容量が増加し、応答速度が低下する。一方で表面積を小さくすると寄生容量値を減少させる事ができるため、結果として応答速度は向上できるが、感度はそれに反して減少する。従って、応答感度と応答速度の性能は相反するものとなり、高速でかつ高感度な光検出器の作製が難しいという欠点がある。そこで、受光面積を犠牲にせずに応答速度を向上させることを目的として、我々の研究グループでは、微小なアンテナを用いた中赤外光検出器を作製し、FTIR でアンテナ特性を測定した<sup>2)</sup>。更に、応答速度の評価を行い、検出器が 0.3ns で応答することを確認した。本研究では、中赤外光検出器の受光特性を評価するため、入射角度依存性を測定した。

## 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 ジョセフ接合からのカオス発生に関する研究、6)YBCO 薄膜を用いたパラメトリック増幅器の研究、7) 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、7)の、ナノアンテナを集積化した中赤外光検出器の研究を取り上げ、その進捗状況について報告する。

## 3.中赤外検出器の構造

本章では、本研究で取り扱う中赤外光検出器の構造について説明する。中赤外光検出器(以下:素子)は光を波動としてスロットアンテナで受け、コプレーナラインを伝搬し、NbN 薄膜からなるボロメータで光を検出する構造となっている。波長の短い中赤外光領域にあわせて設計するため、微細な構造となり従来は作製が困難であったが、電子ビームリソグラフィーでパターンを形成することにより実現できた。図1に素子の SEM 写真を示す。厚さ 0.5mm の MgO 基板の上に金属薄膜が製膜し、二つのスロットアンテナをツインスロットアンテナとして作製した。アンテナ同士はコプレーナ線路の導波路で結合され、その中心部に、超伝導ホットエレクトロンボロメータが配置されている。一方のボロメータからは波長 4.89 $\mu\text{m}$  の中赤外光にとっては、高周波的にオープンに

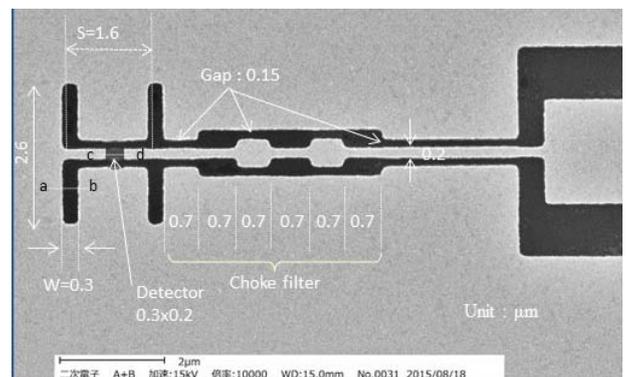


図1 素子の SEM 写真

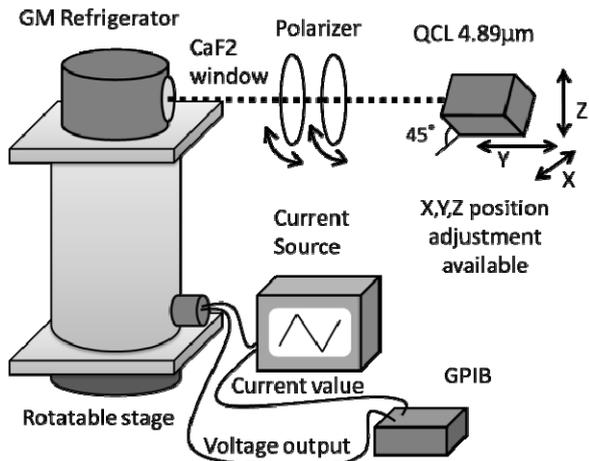


図2 アンテナ指向性評価の測定系

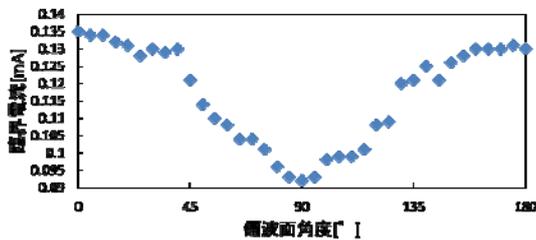


図3 アンテナの偏波面依存性

なるようにチョークフィルタを設計した。また、アンテナは波長  $4.89\mu\text{m}$  の中赤外光に共振するように設計した。

#### 4.測定系構築

中赤外光検出器の角度依存性を評価するため構築した測定系について説明する。図2に、作製した測定系を示す。素子は冷凍機のヘッドにマウントされる。素子構造としては、膜厚  $7.0\text{nm}$  の NbN ボロメータを使用しており、臨界温度は  $12.6\text{K}$  である。冷凍機は冷却能力  $0.1\text{W}$  の GM 冷凍機を用いており、ヘッド部分の温度を約  $3\text{K}$  まで減少させることができる。 $4.89\mu\text{m}$  の中赤外光は、量子カスケードレーザー(QCL)を用いて、 $\text{CaF}_2$  の窓を通して素子に照射される。冷凍機自身を回転台の上に配置してあり、素子の応答の角度依存性を評価できるようにしてある。QCL と冷凍機の間には2枚の偏光板を配置し、中赤外光の偏波とパワーを調整している。外部からのファンクションジェネレータにより電流を流して、そのときに発生する電圧を測定することにより、素子の電流電圧特性を計測する。

#### 5.実験結果

まず、ナノサイズのアンテナが、きちんとアンテナとして機能するかを確認するために、素子に対する入射中

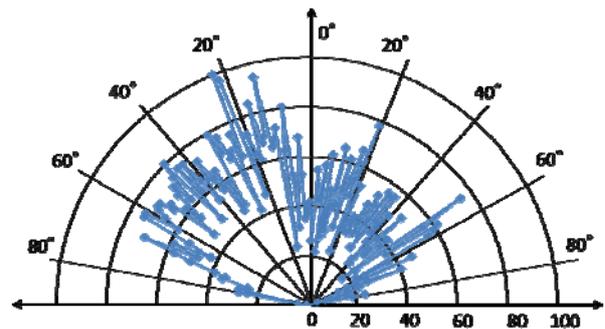


図4 指向性の結果

赤外光の偏波面を回転させた時の、素子の応答の特性を示す。明瞭な偏光面依存性がみられ、臨界電流の減少がレーザー照射熱によるものではなく、微小アンテナが電磁波として中赤外光を受信していることが確認された。また、偏波面角度が  $0^\circ$  のとき臨界電流がレーザーを照射していない状態とほぼ変わらないことから、NbN ボロメータに直接照射された光は臨界電流にあまり影響を与えないことが分かった。

次に、素子の中赤外光応答の角度依存性を評価した結果を図4に示す。ツインスロットは左右対称なので、特性も左右対称になると予想されたが、非対称な結果が得られた。これは、伝送線路の設計が、 $50\Omega$  で行ったが、実際のコプレーナラインのインピーダンスが、リソグラフィによる線路幅などが設計通りにならなかったことにより、検出器とのインピーダンスの不整合がおきたことに起因すると考えている。また、チョークフィルタが適切に機能していないことも考えられる。しかし、素子を冷却した状態で、偏波面の測定が可能な測定系が構築できたことが確認できたので、今後、素子の形状を様々に変化させて、素子評価が可能となったことは、非常に評価できる結果と考えている。

#### 6.おわりに

本研究では、超伝導ボロメータを使用したツインスロットアンテナ付き中赤外光検出器に関して、測定系の構築と評価を行った。偏光面依存性を測定した結果、中赤外光の波長にあわせて作られた微小なアンテナが、中赤外光を波動として受光していることが確認できた。今後、中赤外光検出器の受光面積と受光面積を向上させる方法として、アンテナを多数周期的に配置するフェーズドアレイアンテナを設計することが挙げられる。今回測定した素子はアンテナを2つ用いており、最も基本的なフェーズドアレイアンテナである。今回の結果を基に、アンテナ間隔のパラメータ調整などを行い、高速で高感度な中赤外光検出器の実現に向けてことが本研究の最終目標である。

## 【参考文献】

- 1) Mark Niedre et al., “Direct Near-infrared Luminescence Detection of Singlet Oxygen Generated by Photodynamic Therapy in Cells In Vitro and Tissues In Vivo” *Photochemistry and Photobiology*, Volume 75, Issue 4, pages 382–391, (2002).
- 2) J. Horikawa, et al., “Evaluation of nano-slot antenna for mid-infrared detectors” *Infrared Phys. Tech.*, vol. 67, pp.21–24, (2014).

センサ出力によりアンテナ特性を直接変化させる  
バッテリーレス傾斜/振動センサタグ

A battery-less sensor tag directly changing antenna characteristics by sensor outputs

武田 茂樹

茨城大学工学部

Shigeki Takeda

Ibaraki University

## 1. 概要

近年, IoT(物のインターネット)と呼ばれる概念が提唱され, インフラ保守においても利用されることが期待できる. 本論文では, UHF 帯パッシブ RFID とセンシング技術を組み合わせることで, バッテリーレスの無線センシングを可能とする技術を提案する. ここでは, インフラ保全において重要と考えられる傾斜/振動センサの実現を目的とする. 提案するバッテリーレスUHF帯無線傾斜/振動センサタグは, アンテナ特性を傾斜/振動センサにより変化させ, 一体で設置される基準タグの特性と比較することで, アンテナ特性変化に起因する RFID タグの特性変化を検出し, 傾斜や振動を検出するものである.

## 2. はじめに

近年, IoT(Internet of Things, 物のインターネット)と呼ばれる概念が提唱され, インフラ保守においても利用されることが期待できる. また, IoT は, 防犯など安心安全の実現にも有効活用できると考えられる. インフラ保守における IoT は, センシングデータの収集が目的の一つとなる. さらに, 各センサとの通信は保守性や設置・敷設の容易性から, 無線化されていることが望ましい. さらに電池を用いる場合, 交換コストが問題となる. 従って, バッテリーレスでの運用が望まれる.

バッテリーレス化においては, 太陽電池の利用が考えられるが, 発電量が環境に大きく依存する問題があり, 2次電池と組み合わせて利用する必要があると考えられる. しかし, 電池のコストや経年劣化の影響などが懸念される.

従って, 本論文では, UHF(Ultra High Frequency)帯パッシブ RFID (Radio Frequency IDentification)とセンシング技術を組み合わせることで, バッテリーレスの無線センシングを可能とする技術を提案する. ここでは, インフラ保守において重要と考えられる傾斜/振動センサの実現を目的とする. これまでに, 温度や湿度センサをUHF帯パッシブRFIDに組み込む試みは行われている<sup>1-3)</sup>. さらに, 人体の動きを検出するための振動センサをUHF帯パッシブRFIDと組み合わせる試みについても行われている<sup>4)</sup>. しかし, 人体の動作確認用に設置した加速度センサの検出結果と動きセンサの結果との

比較により, 動きセンサの妥当性を確認しているのみで, 実運用を目的とした提案にはなっていない.

そこで, 本論文では傾斜/振動センサと RFID を組み合わせたバッテリーレス UHF 帯無線傾斜/振動センサタグを提案し, さらに, 傾斜/振動の検出方法についても提案する. 提案法では, アンテナ特性を傾斜/振動センサにより変化させ, 一体で設置される基準タグの特性と比較することで, アンテナ特性変化に起因する RFID タグの特性変化を検出し, 傾斜や振動を検出する. さらに, センサタグの近傍で, センサの状態に関わらずセンサタグが検出されてしまう問題を指摘し, その解決策を提案する. 最後に, バッテリーレスセンサの最大の欠点である読み取り距離が短くなる問題を, センサタグ背後に金属板からなる反射板<sup>5)</sup>を設置することで, 2倍程度に読み取り距離を拡大できることを示す.

## 3. バッテリーレス UHF 帯無線傾斜/振動センサタグ

図-1 に傾斜/振動センサの応用例を示す. 建物や橋等に設置されたセンサの状況を人手, もしくは自動車等に搭載したリーダで読み取る. 将来的には, ドローン, ロボット, 及び自動運転車にリーダを搭載して, センシングデータを収集することも考えられる<sup>6)</sup>. さらに屋内において防犯のために, 窓や鍵に傾斜/振動センサを取り付け, 窓の振動や鍵の開閉に起因する傾斜を検出する(図-2). 図-3 に UHF 帯 RFID と傾斜/振動センサを組み合わせたバッテリーレス UHF 帯無線傾斜/振動センサタグを示す. IC は, Alien 社の Higgs4 Strap<sup>7)</sup>である. アンテナについては, この IC とインピーダンス整合が取れるように電磁界解析により設計し, その後, 読み取り距離が長くなるように調整した. また図-4 に動作原理を示す. 詳細は後程説明する.

図-5 に傾斜/振動センサ(振動(傾斜)スイッチ RBS040200)を示す. また図-6 に傾斜/振動センサの動作原理を示す. 内部の金属製のボールが A-B 間や a-b 間を短絡することで, 傾きを検出できる. また, 振動付加時は, ボールがこの振動に対応して跳ねるため, 振動に対応して, 端子間の短絡と開放を繰り返す. なお, 振動検出時の初期状態においては, センサは ON か OFF のいずれかの状態にあるものとする.

図-3 及び図-4 のように, この傾斜/振動センサを IC (Integrated Circuit) の両側に配置する. 図-4 の動作原

理に示すように、スイッチにより、アンテナと IC との接続が切り替えられる。スイッチが OFF となり、IC がアンテナから切り離されている場合は、極めてアンテナ特性が劣化した RFID タグとなっている。一方、スイッチが ON の場合は、IC とアンテナが接続され、通常の IC タグの動作となる。従って、スイッチの ON と OFF に対応して、IC タグとして読み取れる場合と読み取れない場合が発生する。

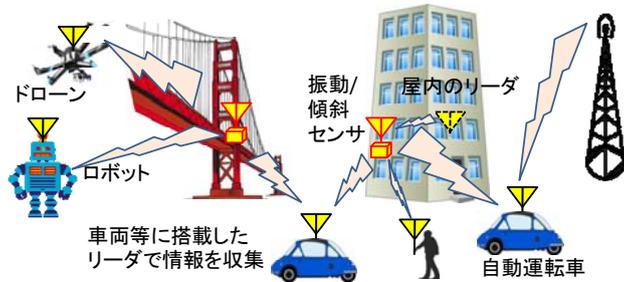


図-1 バッテリーレス UHF 帯無線傾斜/振動センサタグの利用イメージ



図-2 屋内での防犯を目的とした利用イメージ

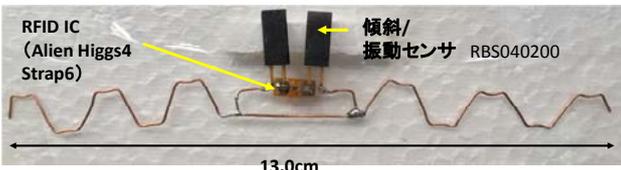


図-3 試作したセンサタグ

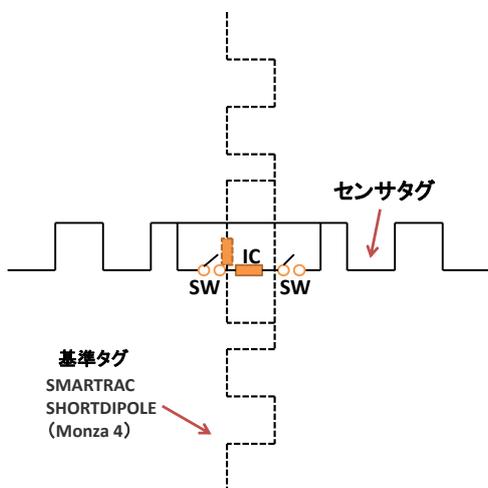


図-4 傾斜/振動センサタグの動作原理

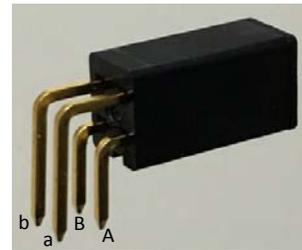


図-5 傾斜/振動センサ

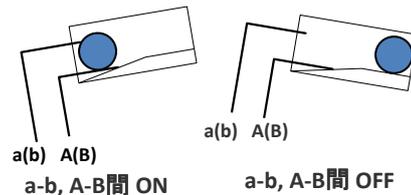


図-6 傾斜/振動センサの動作原理

基準タグは、センサタグと直交するように配置することで、電磁結合を抑制している。基準タグは通常の IC タグ (Smartrac 社 Shortdipole) を使用している。提案手法のように、基準になる IC タグをセンサタグとともに設置することで、アンテナ特性の相対的变化を観測し、傾斜/振動を安定して観測できるようにする。

また、提案するセンサタグでは、アンテナ特性の変化を物理量のセンシングに利用するため、センサ側は完全にバッテリーレスで動作可能である。従って電池交換等のメンテナンスが不要である。

#### 4. 測定環境と測定アプリケーション

図-7 に傾斜/振動センサの評価環境を示す。電波吸収体で囲み、電磁波のマルチパル伝搬の影響を軽減し、センサタグ自体の特性が観測できる環境としている。床に設置した電波吸収体からの距離を確保するために、発泡スチロールを配置し、センサタグ及びリーダと電波吸収体との間隔 (40cm) を確保している。これは、電磁波の伝搬を阻害する物体の無い空間 (自由空間) の伝搬を確保するために必要な第一フレネルゾーン半径を確保するためである。なお、発泡スチロールは、比誘電率が 1 に近く、電磁波に対しては、空気とほぼ同等の性質を有するため、支持材として使用できる。リーダには東北システムズ・サポートの DOTR-910J (250mW, 円偏波)<sup>8)</sup>を用いた。

図-8 は、図-4 の傾斜/振動センサタグを具体化したものである。センサタグと基準タグとの間隔は図-9 のように 3.4cm である。センサタグはプラスチックケース内の発泡スチロールの台の上に配置している。また、基準タグはプラスチックケースからの間隔を確保するために、厚さ 1cm の発泡スチロールの台に貼付している。

図-9 及び図-10 は、傾斜測定時におけるスイッチ ON 状態と OFF 状態の傾斜/振動センサタグの姿勢を示す。本論文では、基本特性を取得するために、このようなスイッチ ON と OFF の状態について、傾斜/振動センサの応答を評価する。より小さい傾斜変化に対する傾斜検出評価については、使用するセンサの特性にも依存するため、今後の検討項目とする。

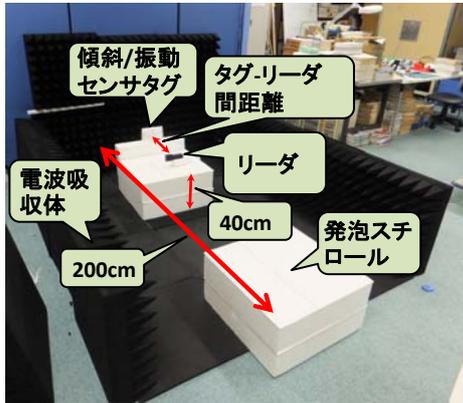


図-7 基本特性の実験環境



図-8 実験に使用した傾斜/振動センサタグ

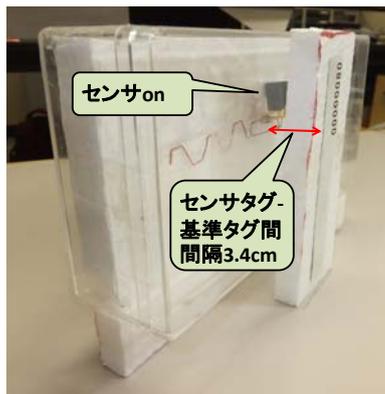


図-9 スイッチ ON の状態

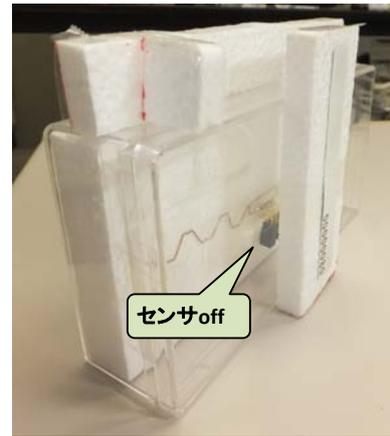


図-10 スイッチ OFF の状態

図-11 に測定アプリケーションを示す。リーダに付随する SDK (Software Development Kit)<sup>8)</sup>を用いて開発し、単位時間当たりの認識回数と平均の RSSI (Receive Signal Strength Indicator) を出力できるようになっている。ここで、RSSI とは、IC タグからのリーダへの応答信号の受信電力レベル(デシベル値)に対応した値であり、IC タグとリーダ間の距離が長い場合や、IC タグアンテナの特性が劣化している場合は低い値として観測される。測定時間は任意に設定できる。ここでは、10 秒としている。リーダのトリガを 10 秒間引き続けることで、自動的に 10 秒間の特性を取得できる。設定時間を過ぎた時点で、ログ表示画面にコメントが出力されるため、このコメントによりユーザは引き続けていたトリガを放す。先に述べたように、傾斜/振動センサタグでは、傾斜/振動センサが、傾斜や振動に対応して、アンテナ特性を変化させる。この変化は、リーダ側での読み取り特性に影響するため、これらの単位時間当たりの認識回数と平均の RSSI を観測する。また、特定のタグのみを指定して読み取れるように、各タグ固有の EPC (Electronic Product Code) を読み取り制限条件として指定できるように改良している。

## 5. 傾斜検出評価

スイッチが ON と OFF の場合(図-9 及び図-10)の単位時間当たりの読み取り回数及び平均 RSSI と、タグ-リーダ間距離(センサタグとリーダ間の距離)の関係を図-12 に示す。図-12 は、横軸をタグ-リーダ間距離、縦軸を認識回数/秒(単位時間当たりの読み取り回数と同一)及び平均 RSSI とした評価結果である。タグ-リーダ間距離は、図-7 の測定環境の関係で、200cm までとした。

実験結果より、スイッチの ON と OFF に対応して、単位時間当たりの読み取り回数が大きく変化していることがわかる。OFF の場合は、タグ-リーダ間距離が 10cm を超えると読み取れない。この場合は、読み取りが行えない

ため、平均 RSSI も出力されない。また、スイッチ ON の場合の読み取り回数は、基準タグのそれとほぼ同等であることがわかる。従って、基準タグとセンサタグの単位時間当たりの読み取り回数を比較することで、傾斜を検出可能であることが確認できる。

しかし、タグ-リーダ間距離が 10cm 以下の場合、ON と OFF の両方の状態で読み取りが可能となっており、スイッチの状態を検出できていない。これは特性が劣化したアンテナでも近傍では IC に必要な電力を供給できるためである。しかし、平均 RSSI は、大きく異なっていることがわかる。スイッチが ON 状態での平均 RSSI は、基準タグのそれとほぼ同等であるが、OFF 状態では、基準タグに対して約 30dB と大きく低下している。従って、タグ近傍では、平均 RSSI を観測することで、スイッチの状態を知ることができる。

このように、傾斜については、単位時間当たりの読み取り回数や平均 RSSI を観測することで、検出可能であることが確認できる。

表-1 に、傾斜の判定方法を示す。ここで、提案する傾斜/振動センサタグは、センサタグ及び基準タグの両方が読み取れる距離以下で使用されるものと仮定する。基準タグが読み取れている場合は、センサタグの読み取り状況により、スイッチの ON と OFF が検出でき、傾斜が認識できる。但し、近傍からの読み取りでは、ON と OFF の状態が区別できないため、基準タグとセンサタグの RSSI の差が、あらかじめ定める規定値以上であれば、OFF と判断する。また、何等かの理由により基準タグが認識できない場合でも、近傍を除けば、センサタグのみが認識される場合はスイッチ ON と判定してよいが、調査はした方がよい。最後に、両方のタグが認識できない場合は、傾斜/振動センサタグの紛失、故障、電磁波伝搬の遮蔽などの問題が発生していると考えられ、傾斜センシングが行えない。また要調査と判断すべきである。以上の考察より、スイッチ ON 状態を正常、OFF 状態を異常と対応付けることが、OFF 状態は要調査となるため有効であると言える。



図-11 リーダ用読み取り回数及び平均 RSSI 測定アプリケーション

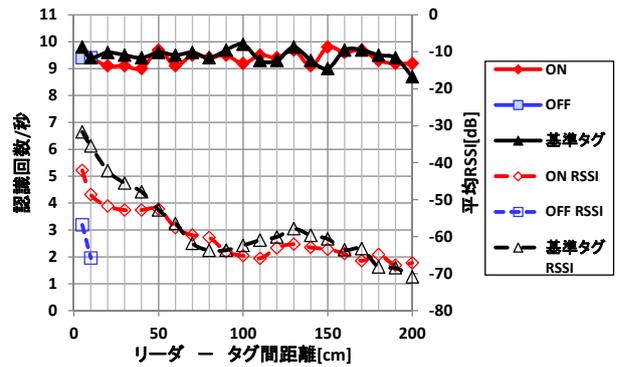


図-12 傾斜センシング特性評価結果

表-1 傾斜センシング時の判定方法

		センサタグ		備考
		OK	NG	
基準タグ	OK	スイッチON (但し、基準タグとセンサタグのRSSIの差が規定値以上の場合はOFFと判断)	スイッチOFF (傾斜に関し、要調査)	動作良好
	NG	スイッチON (但し、近傍では状態不明、また要調査とすべき)	・紛失、故障、電磁波遮蔽など問題発生の可能性有り ・傾斜センシング不能 ・要調査	-

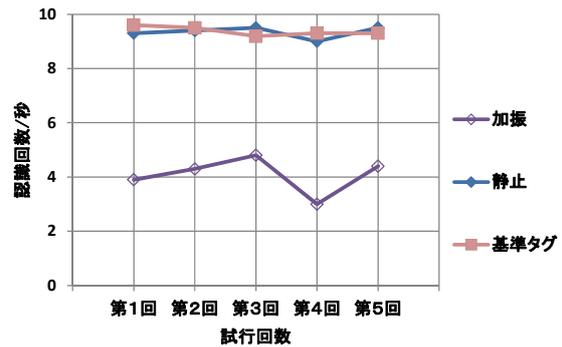


図-13 振動強度検出結果(振動回数 4回/秒、タグ-リーダ間距離 70cm)

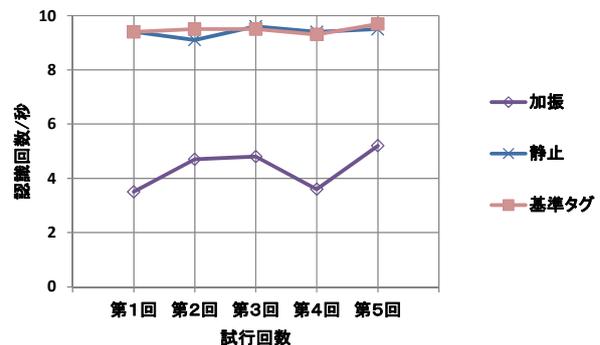


図-14 振動強度検出結果(振動回数 4回/秒、タグ-リーダ間距離 150cm)



図-15 反射板利用時の測定環境

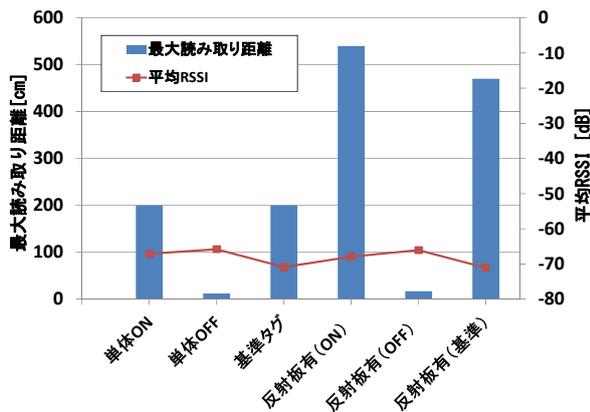


図-16 反射板利用時の最大読み取り距離

## 6. 振動検出評価

次に、振動検出特性評価を行った。図-7 の測定環境において、指で傾斜/振動センサをたたくことで振動を与えた。具体的には、5cmの高さから1秒間に4回たたく動作を繰り返した。この条件において単位時間当たりの読み取り回数を、タグ-リーダー間距離を2通り変化させて観測した。図-12において、センサタグの読み取り範囲内の距離でON状態において測定した。タグ-リーダー間距離がそれぞれ70cmと150cmの場合の結果を図-13及び図-14に示す。5回の試行結果を示している。いずれの距離においても加振により、単位時間当たりの読み取り回数が基準タグに対して明確に低下しており、振動と対応していることが確認できる。なお、今後は、具体的な応用に対して適切な振動センサを選定し、加振装置等を用いた定量的評価を行い、強度や振動回数の検出精度を明らかにしていく。

## 7. 反射板による読み取り距離の拡大

提案するバッテリーレスセンサは、読み取り距離が200cm程度と短い。従って、ここでは反射板<sup>5)</sup>の利用により読み取り距離が拡大できることを確認する。反射板により、アンテナ利得が増加し、その結果、読み取り距

離が拡大される。反射板は、意図的に設置してもよいが、インフラ管理の場合は金属構造物自身を反射板として利用しても良い。

ここでは、図-15のように、ホワイトボードを反射板として利用し、屋内の廊下で読み取り距離を測定した。ホワイトボードは、横175cm、縦86.4cmである。またホワイトボードの底辺は床から91cmの場所にある。また、ホワイトボードとセンサタグとの間隔は約8cm(920MHzの電磁波の波長の約1/4)としている。

この場合の最大読み取り距離を図-16に示す。縦軸は、最大読み取り距離と平均RSSIである。また比較のために、反射板を使用しない傾斜/振動センサ単体の読み取り距離も示している。読み取り距離は、反射板により、センサタグと基準タグ共に2倍程度に拡大され、ON状態のセンサタグにおいて540cmである。また、平均RSSIの下限は-70dB程度であることが確認できる。

本論文では、特定小電力のリーダーを使用しているが、構内においては、高出力のリーダーが利用可能であるため、読み取り距離はさらに拡大可能である。以下、これについて読み取り距離を見積もる。

最大読み取り距離  $d_{max}$  は Friis の伝達公式から以下の式で表せる<sup>9)</sup>。

$$d_{max} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \tau}{P_{th}}} \quad (1)$$

ここで、 $\lambda$ は波長、 $P_t$ は送信電力、 $G_t$ は送信アンテナ利得、 $G_r$ は受信アンテナ利得、 $P_{th}$ はRFIDタグICを駆動するための必要最小電力、 $\tau$ はRFIDタグの電力伝達係数である。電力伝達係数とは、アンテナとICとのインピーダンス整合状況を評価する指標であり、最大値は1となる。到来する電磁波から最大電力を受信する場合はインピーダンス整合状態であり、アンテナの入力インピーダンスとICのインピーダンスが複素共役の関係になる場合に達成される。920MHz帯RFIDにおいて、本論文でも使用している特定小電力無線局では空中線電力は250mW、またアンテナ利得は3dBi以下となっている。この場合、式(1)の  $P_t G_t$  は0.5Wとなる。一方、指定された構内での利用が許されている構内無線局の場合、空中線電力は1W、またアンテナ利得は6dBiである。この場合、 $P_t G_t$  は4Wとなる<sup>10)</sup>。従って、構内無線局としてのリーダーの利用が許容される場合は、式(1)より $\sqrt{8}$ 倍、つまり約2.8倍の読み取り距離が得られる。従って、反射板を利用する場合は5.4m×2.8=15.12mま

で読み取りが可能と見積れる。

## 8. むすび

本論文では、UHF 帯パッシブ RFID と傾斜/振動センサを組み合わせたバッテリーレス UHF 帯無線傾斜/振動センサタグを提案した。動作原理は、傾斜/振動センサにより、IC とアンテナ間の接続を切断することで、アンテナ特性を変化させ、その変化を一体として設置する基準タグと比較することで検出するものである。傾斜/振動センサの動作原理は、内部のボールが2つの端子間の導通と非導通状態を傾斜/振動に対応して切り替えるものである。

250mW のリーダを用いて評価した結果、リーダ-センサ間距離が 10cm を超える場合は、認識回数により、傾斜が検出可能であることを確認した。また、10cm 以下においては、基準タグを利用して基準タグとセンサタグの平均 RSSI を比較することで、傾斜の検出可能であることを確認した。これによりセンサタグ近傍から最大読み取り距離まで安定して傾斜検出が可能となった。この場合の読み取り距離は 200cm 程度であった。

さらに、指でセンサタグをたたくことによって発生する振動に関しても、基準タグとの比較により、加振の有無を検出できることを確認した。しかし、振動強度や周波数を定量化するには至っていないため、今後は、具体的な応用を定め、その検出にあった傾斜/振動センサを選定し、定量評価を進めていく。

最後に、反射板の利用により、読み取り距離が 200cm 程度から最大で 540cm まで拡大できることを確認した。さらに、高出力の構内無線局が利用できる条件であれば、15m 程度まで読み取り距離を拡大できる見通しを得た。

## 【参考文献】

- 1) ams : SL900A EPC Class 3 Sensory Tag Chip – For Automatic Data Logging, 2014.
- 2) Occhiuzzi, C. Caizzone, S. and Marrocco, G. : Passive UHF RFID Antennas for Sensing Applications : Principles, Methods, and Classifications, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 55, No. 6, pp.14–34, 2013.
- 3) Manzari, S. Musa, T. Randazzo, M. Rinaldi, Z. Meda, A. and Marrocco, G.: A Passive Temperature Radio-Sensor for Concrete Maturation Monitoring, *IEEE RFID-TA*, pp.121–126, 2014.
- 4) Occhiuzzi, C. Cippitelli, S. and Marrocco, G. : Modeling, Design and Experimentation of Wearable RFID Sensor Tag, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol.58, No.8,

- pp.2490–2498, 2010.
- 5) 宮坂隆平, 武田茂樹, 鹿子嶋憲一, 梅比良正弘 : UHF 帯 RFID による災害電子掲示板に関する検討, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.71, No.2, pp.L9–L17, 2015.
- 6) Wang, J. Schluntz, E. Otis, B. and Deyle, T. : A New Vision for Smart Objects and the Internet of Things: Mobile Robots and Long-Range UHF RFID Sensor Tags, <<https://arxiv.org/abs/1507.02373>>, (入手 2016.6.22).
- 7) Alien : Higgs 4 Strap Datasheet Addendum, <<http://www.alientechnology.com/wp-content/uploads/ALC-370-FS-CU%20Higgs4%20Strap%202014-12-21.pdf>>, (入手 2015.6.7).
- 8) 東北システムズ・サポート : DOTR-900J シリーズの魅力, <[https://www.tss21.co.jp/product/mobile/rfid/concept.html#t\\_1w250mw](https://www.tss21.co.jp/product/mobile/rfid/concept.html#t_1w250mw)>, (入手 2015.6.7).
- 9) Rao, K. V. S. Nikitin, P. V. and Lam, S. F. : Antenna Design for UHF RFID Tags: a Review and a Practical Application, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol.53, No.12, pp.3870–3876, 2005.
- 10) 日本自動認識システム協会 : 920MHz 帯 RFID (パッシブ型) 周波数利用ガイドライン Ver. 1.1, <<http://www.jaisa.jp/pdfs/150915/001.pdf>>, (入手 2016.10.19).

### 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、次のように、二度そのような機会をもうけた。

### セミナーの日時と概要

日時：7月26日(火) 16:15～

場所：W3棟 403室

題目：エネルギー機能の発現 ～ペロブスカイト型金属酸化物を例として～

講師：山崎仁丈（九州大学稲盛フロンティア研究センター教授）

概要：欲しい機能を何でも材料に発現させることは、材料科学者としての夢である。

本講演ではペロブスカイト型金属酸化物をモデル材料として、筆者が熱化学燃料製造や固体酸化物形燃料電池機能をいかに発現したかについて、最新の成果を交えて紹介する。

日時 2017年2月22日 15:30～

場所 W3棟 403室

講師 野瀬嘉太郎先生（京都大学大学院工学研究科材料工学専攻准教授）

題目 新規太陽電池を指向したリン化物半導体に関する研究

概要 近年、再生可能エネルギーの一番手として太陽光発電に対する期待が高まっている。太陽電池の光吸収層材料としてはシリコンが主流であるが、さらなる太陽光発電普及のために有機無機を問わず、様々な材料について研究が行われている。その中で我々は、レアメタルや毒性元素を用いない環境に優しいリン化物半導体を光吸収層材料として用いた太陽電池に関する研究を行っている。本講演では、様々な材料を用いた太陽電池の開発現状等について概説した後、リン化物半導体のバルクおよび薄膜結晶作製から新規太陽電池デバイスの構築に関する研究および今後の展望について紹介する。

## 業績一覧

### 【原著論文】

- 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, Thermal effusivity measurement based on analysis of 3D heat flow by modulated spot heating using a phase lag matrix with a combination of thermal effusivity and volumetric heat capacity, *Measurement Science and Technology*, **27**, 115002, 1, (2016)
- 2) T. Nishi, H. Hayashi, T. Sato, M. Takano, Self-irradiation effect on thermal conductivity of  $Zr_{0.70}Pu_{0.25}Cm_{0.05}N$  solid solution, *Journal of Nuclear Materials*, **486**, 167-171, (2017)
- 3) M. Murata, A. Yamamoto, Y. Hasegawa, T. Komine, "Experimental and theoretical evaluations of the galvanomagnetic effect in an individual bismuth nanowire", *Nano Lett.*, 17 (1), pp 110–119, 2017.
- 4) M. Murata, A. Yamamoto, Y. Hasegawa, T. Komine, A. Endo, "Theoretical modeling of electrical resistivity and Seebeck coefficient of bismuth nanowires by considering carrier mean free path limitation", *J. Appl. Phys.* Vol. 121, 014303, 2017.
- 5) T. Komine and T. Aono, "Micromagnetic analysis of current-induced domain wall motion in a bilayer nanowire with synthetic antiferromagnetic coupling", *AIP Advances* Vol. 6, 056409/pp. 1-7, 2016.
- 6) 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.
- 7) T. Misawa, S. Mori, T. Komine, M. Fujioka, J. Nishii, H. Kaiju, "Structural and magnetic properties of  $Ni_{78}Fe_{22}$  thin films sandwiched between low-softening-point glasses and application in spin devices", *Appl. Surf. Sci.* Vol. 390, pp. 666–674, 2016.
- 8) T. Aono and T. Komine, "Giant thermoelectric figure of merit in a non-interacting quantum dot system with massless Dirac fermions", *Phys. Rev. B*, Vol. 94, 165311, 2016.
- 9) R.Hara, K.Hayakawa, K.Ebata, R.Sugita, Effect of aging and annealing on perpendicular magnetic anisotropy of ultra-thin CoPt films, *AIP Advances*, **6**, 056117-1-056117-7(2016.5).
- 10) Ahmad Ehsan Mohd Tamidi and Yasushi Sasajima, "The Relationship between Nanocluster Precipitation and Thermal Conductivity in Si/Ge Amorphous Multilayer Films: Effects of Cu Addition", *Journal of Nanomaterials*, Volume **2016**, Article ID 8017814, 7 pages (2016).
- 11) Bin Liu, Teruyuki Ikeda and Yasushi Sasajima, "Simulation of the Si precipitation process in  $Mg_2Si$  using a phase-field kinetic model", *Materials Transactions*, Vol. **57** (6) pp. 922-926 (2016).
- 12) 永野 隆敏, 篠嶋 妥, 伊藤 吾朗, "第一原理計算による Al-Zn-Mg 合金中の水素の存在位置の解析", *軽金属* 第 **66** 卷 (7), pp. 1 - 6 (2016).
- 13) リュウ ビン, 篠嶋 妥, 岩瀬 彰宏, "熱的照射下にある Al-Cu 合金における  $\theta'$  析出相の成長過程のフェーズフィールドシミュレーション", *日本金属学会誌*, 第 **80** 卷(8), pp. 497-502 (2016).
- 14) 清水隆行, 鈴木貴之, 武田茂樹, 鹿子嶋憲一, 梅比良正弘, 移動体通信用逆 L 型プローブ給電水平偏波無指向性アンテナ, *信学論 B*, vol.J99-B, no.9, pp.693-704, (2016).
- 15) 小林有理, 馮東方, 武田茂樹, 鹿子嶋憲一, 梅比良正弘, バッテリーレス UHF 帯無線傾斜/振動センサタグの提案, *土木学会論文集 F3(土木情報学)*, March (2017).

### 【国際会議論文】

- 1) T. Nishi, J. Ojima, Y. Kuroda, H. Ohta, S. Sukenaga, H. Shibata, H. Kawashima, Thermal conductivity of borosilicate

- melt, Proceedings of the 10th international conference on molten slags, Fluxes and Salts (MOLTEN16), 519-524, (2016)
- 2) A. Kawakami, H. Shimakage, J. Horikawa, M. Hyodo, S. Saito, S. Tanaka, Y. Uzawa, Superconducting hot-electron bolometers with a twin-slot nano-antenna for mid-infrared operation, Proc. of 1st Asia ICMC and CSSJ 50th Anniversary Conference, (2016)
  - 3) K. Kagoshima, M. Uchida, S. Takeda and M. Umehira, Investigation on the reactance loading and EM coupling feed for a design of a dual frequency planar antenna, Proc. IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, pp.30-33, (2016)

【学会発表 (国内、国際)】

- 1) 橋本康孝,西 剛史,太田弘道,溶融 Sn-Ag-Cu 合金の粘度測定システムの開発,日本金属学会 2016 年秋期講演大会,2016/9/21
- 2) 田中健登,菱沼洋平,太田弘道,西 剛史,鑄鉄用冷やし金の熱拡散率分布測定,日本金属学会 2016 年秋期講演大会,2016/9/21
- 3) 西 剛史,池田輝之,太田弘道,山本 俊,大川萌里,羽鳥仁人,熱物性顕微鏡を用いた Pb30-Sb10Ag10Te50 熱電材料の局所熱浸透率測定,日本金属学会 2016 年秋期講演大会,2016/9/22
- 4) Y. Hashimoto, H. Ohta, T. Nishi, Viscosity Measurements of Liquid Sn-Ag-Cu Alloys, ATPC 2016 Japan Yokohama,2016/10/3
- 5) T. Nishi, Y. Hishinuma, K. Tanaka, H. Ohta, Determination of thermal conductivity distribution in chillers for casting ATPC 2016 Japan Yokohama,2016/10/5
- 6) 菱沼洋平,田中健登,西 剛史,太田弘道,冷やし金の熱拡散率とスリーブ材発量測定,第 37 回日本熱物性シンポジウム,2016/11/28
- 7) 大川萌里,西 剛史,太田弘道,羽鳥仁人,熱物性顕微鏡を用いた界面抵抗測定のアプローチ,第 37 回日本熱物性シンポジウム,2016/11/28
- 8) 篠原貴洸,太田弘道,西 剛史,羽鳥仁人,野口秀則,栗野孝昭,神田昌枝,西 義武,サーモウェブアナライザを用いた複合材料の熱拡散率異方性に関する検討,第 37 回日本熱物性シンポジウム,2016/11/30
- 9) T. Komine, T. Aono, M. Murata, Y. Hasegawa, "Numerical analysis of surface states in Bi nanostructure" (P280), 35th annual international conference on thermoelectrics & 1st Asian conference on thermoelectrics (ICT & ACT 2016), Wuhan, China, May 29 - June 2, 2016.
- 10) M. Murata, A. Yamamoto, Y. Hasegawa, T. Komine, "Nano-scale electrical contact onto 110 nm Bi nanowire encapsulated in quartz template utilizing FIB-SEM" (P281), 35th annual international conference on thermoelectrics & 1st Asian conference on thermoelectrics (ICT & ACT 2016), Wuhan, China, May 29 - June 2, 2016.
- 11) 村田正行,山本淳,長谷川靖洋,小峰啓史, "直径 110 nm Bi ナノワイヤーの熱電物性測定", 第十三回日本熱電学会学術講演会 (TSJ2016), 東京理科大学葛飾キャンパス, 2016 年 9 月 5-7 日.
- 12) 小峰啓史, 安藤亮, 金田真悟, 佐藤汐莉, 原嘉昭, "フェリ磁性 TbFeCo 薄膜における異常ホール効果の強磁場特性" [13p-P8-3], 第 77 回 応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ(新潟), 2016 年 9 月 13-16 日.
- 13) 小峰啓史, 青野友祐, 村田正行, 長谷川靖洋, "ビスマスの格子変形が輸送特性に及ぼす影響" [14p-P22-3], 第 77 回 応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ(新潟), 2016 年 9 月 13-16 日.
- 14) 村田正行,山本淳,長谷川靖洋,小峰啓史, "石英ガラス中の直径 110 nm Bi ナノワイヤーへの端部電極形成" [15a-A35-8], 第 77 回 応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ(新潟), 2016 年 9 月 13-16 日.
- 15) 三澤貴浩, 森澄人, 小峰啓史, 星野哲久, 芥川智行, 藤岡正弥, 海住英生, 西井準治, "薄膜エッジを利用した

- Ni<sub>78</sub>Fe<sub>22</sub>/Alq<sub>3</sub>/Ni<sub>78</sub>Fe<sub>22</sub> ナノ接合の作製とその構造・電気伝導特性", [16p-P6-21] 第 77 回 応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ(新潟), 2016 年 9 月 13-16 日.
- 16) T. Komine, and T. Aono, "Influence Of Structural Inversion Asymmetry On Current-induced Domain Wall Motion In Bilayer Nanowires With Ferro- and Antiferromagnetic Coupling" (ET-11) 61th Annual Magnetism and Magnetic Materials (MMM) Conference, New Orleans, Louisiana, Oct.31-Nov. 4, 2016.
  - 17) 安藤亮, 小峰啓史, 佐藤汐莉, 金田真悟, 原嘉昭, "フェリ磁性 TbFeCo 薄膜における異常ホール効果の膜厚依存性" [14p-P10-69], 第 64 回 応用物理学会春季学術講演会, パシフィコ横浜(神奈川), 2017 年 3 月 14-17 日.
  - 18) 小峰啓史, 青野友祐, 村田正行, 長谷川靖洋, "ビスマスの格子変形がバンド構造および輸送特性に及ぼす影響" [16a-P6-14], 第 64 回 応用物理学会春季学術講演会, パシフィコ横浜(神奈川), 2017 年 3 月 14-17 日.
  - 19) 青野友祐, 川村稔, 大野圭司, Peter Stano, 小峰啓史, "磁場中の量子ポイントコンタクトにおける電子状態と電気伝導 II" 17pA21-1, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 大阪大学 豊中キャンパス(大阪), 2017 年 3 月 17-20 日.
  - 20) 川上 彰、島影 尚、堀川 隼世、兵頭 政春、齋藤伸吾、田中秀吉、鶴澤佳徳、中赤外超伝導ホットエレクトロンボロメータミキサの検討, 電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会, 2017/1/19
  - 21) 川上 彰、入交 芳久、落合 啓、島影 尚、堀川 隼世、兵頭 政春、齋藤伸吾、田中秀吉、鶴澤佳徳、寶迫 巖、3THz 帯及び中赤外超伝導ホットエレクトロンボロメータの開発, 日本学術振興会超伝導エレクトロニクス146委員会 第 9 回センシングシステム分科会 第 13 回通信・情報処理分科会 合同研究会, 2016/11/24
  - 22) 堀川 隼世、川上 彰、兵頭 政春、島影 尚, 超伝導中赤外光検出器用アンテナの検討 I, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016/9/14
  - 23) 後藤 隆志、木村 寛太、島影 尚、武田 正典, YBCO 薄膜を用いたパラメトリック増幅器の検討, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016/9/14
  - 24) 日渡 涼、田村 幸英、島影 尚, ジョセフソン接合からのカオス発生シミュレーションにおける素子パラメータ依存性, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016/9/14
  - 25) 大内 琢郎、日澤 光紘、島影 尚, IJJ 素子からのテラヘルツ波放射観測実験, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016/9/14
  - 26) 川上彰、島影尚、堀川隼世、兵頭政春、齋藤伸吾、田中秀吉, ツインスロットアンテナを用いた 60THz 帯超伝導ホットエレクトロンボロメータ, テラヘルツ応用システム研究会, 2016/7/15
  - 27) 杉田龍二, 原竜大, CoPt 垂直磁気異方性膜の熱安定性, スピニクス特別研究会, 164-11 (2016).
  - 28) T. Ikeda, Microstructural size and morphology control of Si base thermoelectric composites, TMS 2017 146rd Annual Meeting & Exhibition, San Diego, California, USA, February 26-March 2, 2017. (Invited)
  - 29) T. Adachi, T. Ikeda, G. Jeffrey Snyder, Nanostructuring of Mg□Si and its thermoelectric properties, The International Symposium of Quantum Beam Science at Ibaraki University, Mito, Japan, November 18-20, 2016.
  - 30) Kosuke Watanobe, Ye Hong, Tetsuya Adachi, Takashi Inozaki, Yasuharu Saruta, Naotoshi Uchida, Teruyuki Ikeda, Nanostructuring thermoelectric materials and its functions in various aspects, The 35th International Conference & The 1st Asia Conference on Thermoelectrics, Wuhan, China, May 29-June2, 2016.
  - 31) Teruyuki Ikeda, Takafumi Kojima, Hiromi Kawaguchi, Takuya Ide, Hideo Nakajima, Fabrication of porous thermoelectric materials with unidirectionally elongated pores, The 35th International Conference & The 1st Asia Conference on Thermoelectrics, Wuhan, China, May 29-June2, 2016.
  - 32) 劉濱, 篠嶋妥, 池田輝之, 応力下における Mg<sub>2</sub>Si 合金の Si 析出相の成長過程のシミュレーション, 軽金属学会第 131 回秋期大会, 2016 年 11 月 5-6 日, 茨城大学水戸キャンパス
  - 33) 渡部紘介, 池田輝之, ギブズートムソン効果によるバルクシリコンの固溶度の変化, 第 13 回 ヤングメタラジスト研

究交流会, 2016年10月21日, 東京大学本郷キャンパス 山上会館

- 34) 渡辺英和, 池田輝之, 粉体焼結における高密度 Si 焼結体の作製とナノ構造化, 第 13 回 ヤングメタラジスト研究交流会, 2016年10月21日, 東京大学本郷キャンパス 山上会館
- 35) 児島孝文, 池田輝之, 中嶋英雄, 井手拓哉, 川口裕美, 一方向に伸びた孔をもつ熱電材料の創製, 第 13 回 ヤングメタラジスト研究交流会, 2016年10月21日, 東京大学本郷キャンパス 山上会館
- 36) 西 剛史, 池田 輝之, 太田 弘道, 山本 俊, 大川 萌里, 羽鳥 仁人, 熱物性顕微鏡を用いた  $Pb_{30}Sb_{10}Ag_{10}Te_{50}$  熱電材料の局所熱浸透率測定, 日本金属学会秋期講演大会, 2016年9月21-23日, 大阪大学豊中キャンパス
- 37) Babak ALINEJAD, Teruyuki IKEDA, "Fabrication of silicon-alumina nano-composite via ball milling-SPS method for thermoelectric applications", 日本金属学会秋期講演大会, 2016年9月21-23日, 大阪大学豊中キャンパス
- 38) 渡辺 英和, 池田輝之, シリコン熱電材料の焼結性及びナノ構造制御, 日本金属学会秋期講演大会, 2016年9月21-23日, 大阪大学豊中キャンパス
- 39) 池田輝之, 組織制御熱電材料の現状とこれから, 応用物理学会秋季学術講演会, 2016年9月13-16日, 朱鷺メッセ, 新潟市 (特別講演)
- 40) 渡部紘介, 池田輝之, バルクシリコンのナノ構造化とドーパント固溶度, 日本熱電学会, 2016年9月5日~7日, 東京理科大学葛飾キャンパス
- 41) Hong Ye, Teruyuki Ikeda, Boron (phosphorus) doping of silicon by high-energy ball milling, 日本熱電学会, 2016年9月5日~7日, 東京理科大学葛飾キャンパス
- 42) Babak Alinejad, Takashi Inozaki, Akiko Saitoh, Teruyuki Ikeda, Low dimensional approach to improved thermoelectric performance via powder metallurgy and crystal growth method, 日本熱電学会, 2016年9月5日~7日, 東京理科大学葛飾キャンパス
- 43) 児島孝文, 山崎拓矢, 池田輝之, 中嶋英雄, 井手拓哉, 川口裕美, 一方向に伸びた孔をもつ熱電材料の創製と新しい熱電発電デバイスの可能性, 日本熱電学会, 2016年9月5日~7日, 東京理科大学葛飾キャンパス
- 44) リュウ ビン, 池田輝之 篠嶋 妥,  $Mg_2Si$  合金における Si 析出相の成長過程に及ぼす外部応力の影響, 軽金属学会関東支部総会・講演会, 2016年8月29日, 東工大蔵前会館 くらまえホール
- 45) 池田輝之, 燃焼ガス透過性多孔質熱電材料を用いた新しい熱発電, 都市ガスシンポジウム 2016年2016, 6月1日, イイノホール&カンファレンスセンター
- 46) リュウ ビン, 池田 輝之, 篠嶋 妥, "Mg<sub>2</sub>Si 合金における Si 析出相の成長過程に及ぼす外部応力の影響", 軽金属学会第 129 回秋期大会 (講演番号 P19) H28.11.5
- 47) 江口 遼, 篠嶋 妥, Ahmad Ehsan, "Si 系熱電材料の性能向上のための計算機実験", 第26回日本 MRS 年次大会 (講演番号 D4-P19-019) H28.12.19
- 48) 神永 龍一, 篠嶋 妥, 石川 法人, "CeO<sub>2</sub> の照射による半球状物体形成過程の計算機実験", 第26回日本 MRS 年次大会 (講演番号 D4-P19-009) H28.12.19

#### 【受賞等】

- 1) 受賞者名: 三澤貴浩, 森澄人, 小峰啓史, 星野哲久, 芥川智行, 藤岡正弥, 海住英生, 西井準治,  
受賞名: Poster Award, 授与者: 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 受賞日: 2016/9/16
- 2) 受賞者名: 児島孝文, 受賞名: 第 13 回日本熱電学会優秀ポスター賞, 授与者: 日本熱電学会, 受賞日: 2016年9月7日
- 3) アンテナ・伝播研究専門委員会 優秀論文賞 (AP 研論文賞) 受賞日: 2016/12
- 4) YEP Award 2016 受賞日: 2017/3/6

### 【特許】

- 1) 発明者: 大貫 仁、篠嶋 妥、永野 隆敏、玉橋 邦裕、千葉 秋雄, 出願人: 国立大学法人茨城大学, 発明の名称: 「半導体集積回路装置及びその製造方法、並びに該半導体集積回路装置に使用する低抵抗率銅配線の探索方法」, 特許第 6080009 号, 平成29年1月27日登録。

### 【新聞報道等】

- 1) 「産総研と工学部・小峰 啓史 准教授ら共同でナノワイヤーの新たな評価技術を開発」, プレスリリース, 掲載日: 2016/12/12

### 【競争的資金獲得】

#### 1.申請した競争的資金等の外部資金

- 1) マツダ研究助成 自動車の高精度な大量生産を目指した複合材料の界面熱抵抗の実測に向けたアプローチ, 1,000 千円, 平成29年度～平成29年度, 研究代表者:西剛史
- 2) 耐火物協会研究助成金 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, 500 千円, 平成29年度, 研究代表者:西剛
- 3) サポイン (中小企業経営支援等対策費補助金(戦略的基盤技術高度化支援事業)), 革新的冷却部材の最適化量産製造プロセスの開発, 2,139 千円, 2016年10月～2017年3月, 研究分担者: 池田輝之
- 4) 住友財団, 環境研究助成, 5,000 千円, 流体透過性熱電材料による超高効率廃熱回収, 研究代表者: 池田輝之
- 5) 平成27年度エネルギー・環境新技術先導プログラム, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 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, 149,909 千円, 平成27年10月～平成29年10月, 研究代表者: 池田輝之

#### 2.申請した科学研究費補助金

- 1) 文部科学省 平成29年度 挑戦的研究(萌芽), 「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」, 4,750 千円, 2017年度～2030年度, 研究代表者:太田弘道
- 2) 文部科学省 平成29年度 基盤研究(B), 「放射性廃棄物ガラスコア体の膨張と伝熱」, 18,840 千円, 2017年度～2030年度, 研究代表者:太田弘道
- 3) 文部科学省 平成29年度 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」, 20,000 千円, 2017年度～2019年度, 研究代表者:池田輝之
- 4) 文部科学省 平成29年度 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」, 20,000 千円, 2017年度～2019年度, 研究分担者: 池田輝之
- 5) 文部科学省 科学研究費 基盤研究(C)「歪エネルギー駆動による超微細 Cu 配線の結晶粒粗大化プロセス開発」, 3,200 千円, 平成28-30年度, 研究代表者: 篠嶋 妥

#### 3.採択された競争的資金等の外部資金

- 1) 受託研究 廃棄物に応じたガラス固化体の高温特性評価, 5,181 千円, 2017年度, 研究代表者:太田弘道
- 2) 受託研究 球状黒鉛鋳鉄の品質向上に関する研究, 1,500 千円, 2016年度～2018年度, 研究代表者:太田弘道
- 3) 受託研究 溶融ステンレス鋼-B4Cの粘度に関する研究, 25,186 千円, 2016年度, 研究代表者:西剛史
- 4) NEDO 「エネルギー・環境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」, (ステージゲート審査), 50,000 千円, 2017年度, 研究代表者:池田輝之
- 5) 電気通信普及財団研究助成, 「高温超伝導ジョセフソン素子からのカオス発生を利用した乱数発生回路の研究」,

1,000 千円 , 2019 年度, 研究代表者:島影尚

- 6) サポイン (中小企業経営支援等対策費補助金(戦略的基盤技術高度化支援事業)), 革新的冷却部材の最適化量産製造プロセスの開発, 2,139 千円, 2016 年 10 月～2017 年 3 月, 研究分担者: 池田輝之.
- 7) JFE21 世紀財団, 地球環境・地球温暖化防止技術研究, 2,000 千円, ガス透過型熱電デバイスの創製と新しい熱エネルギー回収, 平成 27 年 1 月～平成 28 年 12 月, 研究代表者: 池田輝之

#### 4.採択された科学研究費補助金

- 1) 文部科学省 平成28年度 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」, 16,770 千円, 2016 年度～2019 年度, 研究代表者:小峰啓史
- 2) 文部科学省 平成 28 年度 基盤研究(B), 「高エネルギー非平衡状態を利用した熱電材料のナノ構造化と新機能」, 13,100 千円, 2014 年度～2016 年度, 研究代表者: 池田輝之
- 3) 文部科学省 2016 年度 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」, 2,860 千円 , 2016 年度～2018 年度, 研究代表者:西剛史
- 4) 文部科学省 2016 年度 基盤研究(C), 「酸化物系ランダム構造の領域分割と物性理解」, 1,000 千円 , 2016 年度～2018 年度, 研究分担者:太田弘道
- 5) 文部科学省 平成 29 年度 基盤研究(C), 「高温動作を実現する局部発振器内蔵型テラヘルツ帯超伝導ヘテロダイン受信機の開発」, 3,700 千円, 2017 年度～2019 年度, 研究代表者:島影尚
- 6) 文部科学省 科学研究費 基盤研究(C) 「歪エネルギー駆動による超微細 Cu 配線の結晶粒粗大化プロセス開発」 1,400 千円, 平成 28 年度, 研究代表者: 篠嶋 妥
- 7) 文部科学省 科学研究費 基盤研究(C) 「高速重イオン照射によって形成された表面ナノ構造の直接観察」1,000 千円, 平成 28 年度, 研究代表者: 石川 法人
- 8) 文部科学省 平成 28 年度 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」, 1,600 千円, 2016年度～2017年度, 研究代表者: 池田輝之
- 9) 文部科学省 平成 28 年度 基盤研究(C), 「多様性が求められる大規模災害時の市民への情報伝達と安否確認の一手法」, 4,810 千円, 2016 年度～2018 年度, 研究代表者: 武田茂樹

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

2016年度報告書

発行日 平成29年4月

発行者 茨城大学 工学部 マテリアル工学科  
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>