

「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」  
平成 27 年度採択研究代表者

H29 年度  
実績報告書

中辻 知

東京大学物性研究所  
教授

トポロジカルな電子構造を利用した革新的エネルギーハーヴェスティングの  
基盤技術創製

## § 1. 研究実施体制

### (1) 「起電力機能」グループ

- ① 研究代表者: 中辻 知 (東京大学物性研究所 教授)
- ② 研究項目
  - ・ ワイル反強磁性体  $Mn_3Sn$  における異常ネルンスト効果のバルクでの評価
  - ・ ワイル反強磁性体  $Mn_3Sn$  の薄膜の作製とその評価
  - ・ 強相関電子系におけるトポロジカル量子物性の解明

### (2) 「スピントロニクス機能」グループ

- ① 主たる共同研究者: 大谷 義近 (東京大学物性研究所 教授)
- ② 研究項目
  - ・ スピン流・電流相互変換機能の開拓
  - ・ スピンゼーベック機能の開発
  - ・ 多結晶・エピタキシャル薄膜の作製と素子作製法の確立
  - ・ 環境発電の技術開発
  - ・ 熱電対列の作製と熱電特性の評価

### (3) 「理論」グループ

- ① 主たる共同研究者: 有田 亮太郎 (理化学研究所創発物性科学研究センター チームリーダー)
- ② 研究項目
  - ・  $Mn_3Sn$  に対する磁気光学カー効果の第一原理計算
  - ・  $Mn_3Sn$ 、 $Mn_3Ge$  の大きな異常ネルンスト効果のクラスター多極子理論による解析

## § 2. 研究実施の概要

1. 強磁性体に対して熱勾配を加えると、磁化と熱勾配の方向と垂直方向に起電力が発生する。この異常ネルンスト効果は、起電力がゼロ磁場で自発的に発生する。異常ネルンスト効果を用いた熱電素子は、従来の熱電素子にはない、廉価で耐久性に優れ、かつ、大面積化にすぐれた特性を持つことが期待される。近年になって電子構造のトポロジーを利用することにより、この異常ネルンスト効果がこれまで知られている値よりはるかに増大することがわかってきた。実際我々は、この原理を利用して世界で初めて反強磁性体  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  において異常ネルンスト効果を実現した (*Nature Physics* 13, 1085 – 1090 (2017))。これまで、異常ネルンスト効果は磁化に比例して現れるため、磁化を持つ強磁性体でのみ現れると考えられてきた。それゆえに、我々の発見はこれまでの常識を覆すものである。
2. 光電子分光測定と磁気抵抗測定から、フェルミ面近傍のバンドの線形交差現象(ワイル点)の存在が、反強磁性体  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  における異常ネルンスト効果の発現に重要であることを明らかにした [1].
3. 昨年度確立したマイクロサイズのトポロジカル物性測定用素子作製手法を用いて、スピン流・電流変換機能測定用素子と縦と横方向の温度勾配それぞれに敏感な熱電素子を作製した。
4. 昨年度発見した磁気スピンホール効果(電流・スピン相互変換現象)の詳細を明らかにするために、磁場印加方向を回転させながら磁気逆スピンホール効果によって生じるスピン流電流変換信号と微小磁化の関係を詳細に調べた。その結果、従来のスピンホール効果とは全く異なり、符号反転を示す特徴的な角度変化を示すことを見出した。さらに、この逆効果の結果についてもテキサス大オースチン校の理論グループが提案したモデルで良く説明できることを明らかにした。
5. 超高真空スパッター法を用いて純良な  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  薄膜作製法の確立を試みた。その結果、(0001)選択配向した薄膜を作製することに成功した。この薄膜を用いて磁気逆スピンホール効果測定を行い、スピン変換機能が発現することを実験的に確認した。
6. 上述の微細加工法を用いてバルク単結晶  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  からサーモパイル(熱電対列)の要素となるマイクロサイズの熱電素子を作製した。この素子を用いて、異常ネルンスト効果と異常ホール効果の両物理量を測定し、異常ネルンスト係数や異常ホール係数などが微細加工前のバルク測定から得られた値とほぼ同程度であることを確認した [2].
7. 反強磁性体  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  の異常ホール効果は磁化ではなく、最近接の6つの Mn の磁気モーメントがつくるクラスター上に定義される磁気八極子の大きさに比例することが分かってきた (是常・有田他 *Phys. Rev. B* 95, 094406 (2017)). さらに、この磁気八極子の存在が反強磁性

体で初めて磁気光学効果の検出を可能とした[3]。磁性体の磁気構造は一般にクラスター多極子で記述できるため、多極子展開の手法を使えば、磁気構造から異常ホール効果や異常ネルンスト効果に限らず、様々な量子機能の有無を予言できる。これにより、巨大な仮想磁場を持つ磁性体の設計への道が開けた。

1. K. Kuroda, T. Tomita, M.-T. Suzuki, C. Bareille, A. A. Nugroho, P. Goswami, M. Ochi, M. Ikhlas, M. Nakayama, S. Akebi, R. Noguchi, R. Ishii, N. Inami, K. Ono, H. Kumigashira, A. Varykhalov, T. Muro, T. Koretsune, R. Arita, S. Shin, Takeshi Kondo, S. Nakatsuji,  
“Evidence for magnetic Weyl fermions in a correlated metal”,  
Nature Materials **16**, 1090-1095 (2017).
2. H. Narita, M. Ikhlas, M. Kimata, AA. Nugroho, S. Nakatsuji, Y. Otani,  
“Anomalous Nernst effect in a microfabricated thermoelectric element made of chiral antiferromagnet  $Mn_3Sn$ ”,  
Appl. Phys. Lett. **111**, 202404/1-5 (2017).
3. T. Higo, H. Man, D. B. Gopman, L. Wu, T. Koretsune, O. J. van ’t Erve, Y. P. Kabanov, D. Rees, Y. Li, M.-T. Suzuki, S. Patankar, M. Ikhlas, C. L. Chien, R. Arita, R. D. Shull, J. Orenstein, S. Nakatsuji,  
“Large magneto-optical Kerr effect and imaging of magnetic octupole domains in an antiferromagnetic metal”,  
Nature Photonics **12**, 73-78 (2018).