

# 強磁性金属ナノ超構造の創製と熱・スピンドバイスへの応用

名古屋大学 未来材料・システム研究所  
水口将輝

## 1. テーマ設定の背景

電子の電荷とスピンの自由度をエレクトロニクスに利用するスピントロニクスの研究が成熟期を迎えつつある。近年、この分野の発展として、熱とスピンの相関を取り扱う「スピнкаロリトロニクス」とよばれる新しい研究領域が注目を集めている。この研究は、スピン角運動の流れとして定義される「スピン流」と熱の相互作用を扱う新規な研究分野であり、基礎的な学術として興味深い物理が豊富にあるのに加え、スピンの概念を取り入れることによる新しい熱電変換素子や冷却素子などへの応用展開も期待されている。これまでに実現したスピントロニクスの応用先として、磁気記録や磁気メモリなどが挙げられるが、スピнкаロリトロニクスの応用はまだなされておらず、ここ数年でその実現への機運が高まっている。そこで筆者らは、ナノスケールの強磁性金属超構造を創製し、熱とスピンの相関現象に関する物理を解明すると同時に、その機能を極限まで引き出し、革新的な熱・スピンドバイスへの応用展開を図った。その際、図1に示すように、「異常ネルンスト効果」とよばれる熱磁気効果を基軸として、高効率な熱電変換機能を生み出すことを目指した。

## 2. 素形材分野との関連性

磁性金属をベースとして、自己組織化のようなボトムアップ手法や微細加工のようなトップダウン手法により、ナノスケール超構造を作製した。具体的には、ナノドットやナノワイヤ、細孔構造、ナノ超格子構造などの緻密な磁性構造を創製した。これらのナノ超構造作製の際には、適切な熱処理を行うことにより、その結晶性を極限まで高めるとともに、ナノ構造のサイズや配置を制御し、素形材としての機能価値を創造した。これらの磁性ナノ超構造は、高効率な熱電変換機能を有していることが明らかになり、環境発電デバイスなどに利用すれば、CO<sub>2</sub>の大幅な削減や、未利用エネルギーの効率的な利用などに資すると考えられる。

## 3. 研究開発の成果

筆者らは、第一原理計算によるマテリアルデザインから様々な磁性ナノ超構造を設計し、分子線エピタキシ法やスパッタリング法などを駆使することにより、それらの作製を行った。作製した超構造について、その結晶構造や磁気特性、熱電特性、電気伝導特性などを系統的に明らかにした。特に、熱電特性については、異常ネルンスト効果を中心に調べた。これは、磁性体の磁化方向と垂直な方向に温度勾配を印加したときに、双方の外積方向に電圧が誘導される現象である。試料の構造や諸特性を精緻に制御した、高品位な材料ベースで異常ネルンスト効果の議論を行うことにより、同効果の熱・スピン機能の物理を解明すると同時に、熱電変換デバイスへの応用展開を図った。その結果、大きな磁気モーメントの異方性（磁気異方性）およびスピン軌道相互作用を示す規則合金材料として知られるFePtの薄膜が、大きな異

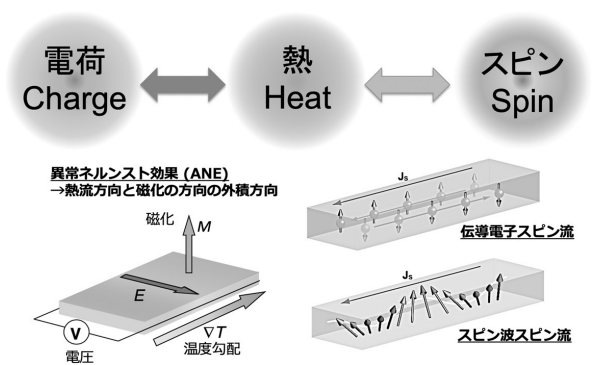


図1 異常ネルンスト効果の概念図。スピン流との関係など、さまざまな特性が明らかになった。

常ネルンスト効果を示すことを明らかにし、そのスケール性がナノサイズの微細加工素子にまで適応可能なことを示した<sup>1)</sup>。また、様々な強磁性規則合金について、磁気異方性と異常ネルンスト効果の相関を明らかにし、スピン軌道相互作用との関係性を議論した。さらに、FePt単結晶薄膜において、スピン波スピン流が異常ネルンスト効果を増幅する効果を発見した。一方、異常ネルンスト効果の応用展開については、異種の磁性ナノ細線を交互に直列接続した細線構造を作製して動作させ、新しいタイプの熱電素子の構造を提案したのをはじめ、負のスピン偏極率を示すことで知られる $\gamma'$ 型Fe<sub>4</sub>N単結晶薄膜において、異常ネルンスト効果に大きな異方性があることを発見し、熱制御デバイスへの応用性を示した<sup>2)</sup>。また、母相材料の中にナノサイズの粒子が多数分散した構造をもつグラニューラー薄膜において、異常ネルンスト効果が大きく増大することを実証した(図2)<sup>3)</sup>。

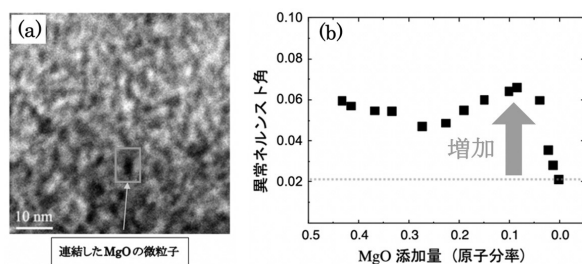


図2 Co (MgO) グラニューラー薄膜熱電材料の (a) TEM観察像および (b) 異常ネルンスト角(熱電変換効率の一つ)のMgO添加量依存性。

このように、異常ネルンスト効果を基軸とした多様な熱磁気現象の物理を明らかにするとともに、そのデバイス応用への実現性を示した。これらの研究開発を通じて、熱磁気機能を最大限に顕在化させるためには、結晶性ならびにサイズ、界面構造などをナノスケールで精緻に制御した「磁性ナノ超構造」の導入が鍵となる要素であることを明らかにし、その優位性や実用性を示した。

#### 4. 訴求点

本研究開発で行った強磁性体ナノ材料をベースとした熱電変換に関する研究は、国内外で精力的に研究がなされており、スピントロニクス分野

において進展が目覚ましい研究対象の一つである。現在、主として熱電変換に用いられているゼーベック効果は、50年以上の長きにわたり研究が行われてきたが、その変換効率はいまだ実用上十分では無いのに加え、煩雑な素子構造に起因してコストあたりの発電量も小さいという問題がある。そのため、安くて発電量の高い革新的な熱電技術要素の創出が産業的に喫緊の課題であり、その実現による波及効果は多大になりつつある。このような背景から筆者らが進めた本研究開発は、学術的に大きな先進性を有している。特に、本研究開発の中心となった熱磁気効果を基軸とした環境発電への応用展開というテーマは、これまでに国内外で報告例は多くなく、筆者独自の発想に基づくものである。また、本研究開発により、来たるべきSociety 5.0社会へ与えるインパクトは大きなものとなった。

#### 参考文献

- 1) M. Mizuguchi, S. Ohata, K. Uchida, E. Saitoh, K. Takahashi, Anomalous Nernst Effect in an L1<sub>0</sub>-Ordered Epitaxial FePt Thin Film, Applied Physics Express, Vol.5, 093002 (2012)
- 2) M. Mizuguchi and S. Nakatsuji, Energy harvesting materials based on the anomalous Nernst effect, Science and Technology of Advanced Materials, Vol.20, 262 (2019)
- 3) P. Sheng, T. Fujita and M. Mizuguchi, Anomalous Nernst effect in Co<sub>x</sub> (MgO)<sub>1-x</sub> granular thin films, Applied Physics Letters, Vol.116, 142403 (2020)