

## 金属人工格子ルネサンス

### Renaissance of Metallic Superlattices

課題番号：18H05246

高梨 弘毅 (TAKANASHI, KOKI)

東北大学・金属材料研究所・教授



#### 研究の概要（4行以内）

本研究では、異種金属をナノスケールで周期的に積層した金属人工格子を現代の目であらためて見直し、①界面磁気異方性とスピン軌道トルクの比較によるスピン軌道相互作用の界面効果の解明、②反強磁性結合人工格子におけるスピン軌道トルク磁化スイッチングの実証、③大きな熱磁気効果と小さな熱伝導率を併せ持つ金属人工格子の作製の3つの課題に取り組む。

研究分野：金属材料物性関連／応用物性関連

キーワード：電気磁気物性／スピントロニクス

#### 1. 研究開始当初の背景

異種の金属をナノスケールで周期的に積層した金属人工格子は、巨大磁気抵抗効果や層間交換結合、界面磁気異方性等の観点で1980~90年代に盛んに研究された物質群であり、スピントロニクスの基礎を築いた。スピントロニクスは現在新たな展開期を迎え、軌道の自由度を取り入れたスピンオービトロニクスや反強磁性体のメリットを利用した反強磁性スピントロニクス、熱との相関を対象としたスピントロニクスが近年注目を集めている。これらの研究の中で、従来考えられていた以上にきわめて強いスピン軌道相互作用が働くなど、異種金属界面の特殊性があらためて認識されるようになり、界面の集合体である金属人工格子は、スピントロニクスの新展開における研究舞台を提供する格好の材料であると期待される。

#### 2. 研究の目的

本研究では、金属人工格子を現代の目で見直し、①界面磁気異方性とスピン軌道トルクの比較によるスピン軌道相互作用の界面効果の解明（スピンオービトロニクス）、②反強磁性結合人工格子におけるスピン軌道トルクを用いた磁化スイッチングと磁化ダイナミクスの解明（反強磁性スピントロニクス）、③大きな熱磁気効果と小さな熱伝導率を併せ持つ金属人工格子の作製（スピントロニクス）の3つの課題を柱として研究を進め、スピントロニクスの新展開における金属人工格子の有用性を明らかにする。

#### 3. 研究の方法

スピンオービトロニクスでは、界面磁気異方性とスピン軌道トルクを同時に評価する試料構造として「非磁性層(NM1)/強磁性層(FM)/NM2」の3層構造を基本とし、層厚や材料を様々に変えた薄膜試料を作製する。界面におけるスピン軌道相互作用の役割を明らかにし、スピン軌道トルクの界面効果を最大限に発揮させる。

反強磁性スピントロニクスでは、「FM/NM/FM」の3層構造を基本とする。反強磁性構造のための層間交換結合と磁化スイッチングのための大きなスピン軌道トルクを両立できる非磁性層材料を探索し、面内電流による磁化スイッチングの高効率化を狙う。

スピントロニクスとしては異常ネルンスト効果に着目し、界面効果およびナノ積層効果を活用することで、大きなネルンスト係数と小さな熱伝導率を有し、結果として高い無次元性能指数( $ZT$ )を示す材料の開発指針を確立する。

#### 4. これまでの成果

##### (1) スピンオービトロニクス

NM1 / Co / NM2 の積層において NM1 および NM2 を Pd あるいは Pt とした基本3層構造をスパッタ法により作製し、界面磁気異方性、誘導磁気モーメント、スピン軌道トルクのダンピングライク(DL)成分およびフィールドライク(FL)成分を評価した。非対称構造の Pd / Co / Pt 積層膜において、対称構造にはない付加的な界面磁気異方性が観測され、その界面磁気異方性と FL トルクとの間

に相関が示唆された。この結果は、界面における磁気異方性とスピン軌道トルクの起源に迫る重要な知見と位置付けられる。これらと並行して金属人工格子内に含まれるFM層からのスピン軌道トルクの影響を検討し、FePtにおいて大きなスピン異常ホール効果が得られることを明らかにした。

#### (2) 反強磁性スピントロニクス

CuにIrをドーブしたCu-Ir非磁性金属が、層間交換結合と大きなスピン軌道トルクを両立できる非磁性層材料の候補となることを見出した。Co/Cu<sub>95</sub>Ir<sub>5</sub>/Co構造における反強磁性結合エネルギーのCu<sub>95</sub>Ir<sub>5</sub>層厚依存性を調べたところ、0.75 nmの層厚近傍において層間交換結合が増大し、人工反強磁性構造が実現された。また、このCu<sub>95</sub>Ir<sub>5</sub>のスピンホール角を見積もったところ、従来材料であるPtに匹敵するおよそ4%の値を得ることに成功した。さらに、コンビナトリアル手法を活用することで、広範な合金組成領域においてCu-Ir合金のスピンホール効果を調べたところ、Irが22 at.%の非平衡組成付近においてスピンホール角が極大になることを発見した。

#### (3) スピнкаロリトロニクス

FM層にNi、NM層にPtを選択したNi/Pt系金属人工格子の異常ネルンスト効果に着目した。成長温度を最適化することにより、単結晶基板上に(001)エピタキシャル成長した垂直磁化Ni/Pt金属人工格子の作製に成功した。異常ネルンスト係数( $S^{\text{ANE}}$ )を見積もったところ、1  $\mu\text{V}/\text{K}$ を超える値を得ることに成功した。この値はバルクNiの $S^{\text{ANE}}$ よりも一桁大きく、また比較的大きな異常ネルンスト効果を示すことで知られているFePt規則合金の報告値よりも大きい。さらに、その発現機構を調べた結果、Ni層の低次元化や金属人工格子における界面の重要性が示唆される興味深い知見が得られた。この研究に加え、異常エッチングスハウゼン効果(異常ネルンスト効果の相反効果)の材料依存性を調べることで、効果を増強するための強磁性材料の開発指針も明らかになった。

#### 5. 今後の計画

スピノービトロニクスに関しては、NM層を誘導磁気モーメントが小さいTaやWに置き換えた試料、スピンホール効果の小さなIrに置き換えた試料についても評価を進めることで、材料の種類を越えた統一的な枠組みの構築に注力する。また、スピン軌道トルクと密接に関わってくるジャロシンスキー守谷相互作用(DMI)についても測定を行い、界面磁気異方性、誘導磁気モーメント、ラッシュバ磁場、スピン軌道トルク、DMIをキーワードとして、各々の関連を議論する。NM1/FM/NM2の基本構造で得られた知見をもとに、NM1/FM/NM2/FM/NM1/FM/

NM2・・・という積層回数を増やした周期構造へと展開させる。

反強磁性スピントロニクスに関しては、これまでの成果であるCo/Cu-Ir/Coを基本構造として磁化スイッチングの実験に取り組む。電気的手法および光学的手法を併用して、反転時の磁化ダイナミクスを評価する予定でいる。また、効率改善のために、スピノービトロニクスで得られた非対称構造の知見を積極的に活用する。最終的には積層数を拡張させた人工反強磁性体において、高効率な磁化スイッチングの実現を目指す。

スピнкаロリトロニクスに関しては、Ptよりもスピン軌道相互作用な小さなCuを有するNi/Cu人工格子の異常ネルンスト効果を調べることで、スピン軌道相互作用の役割を明らかにする。さらに、強磁性金属/非磁性絶縁体の人工格子における熱伝導の制御、規則合金磁性層と非磁性金属層とを組み合わせた人工格子における異常ネルンスト効果の増大に取り組む。その後は、材料および構造の最適化によるZTの最大化に注力する。

#### 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

1. "Spin-mediated charge-to-heat current conversion phenomena in ferromagnetic binary alloys", A. Miura, R. Iguchi, T. Seki, K. Takanashi, and K. Uchida, Physical Review Materials, Vol. 4, pp. 034409-1~13 (2020).
2. "Large spin anomalous Hall effect in L1<sub>0</sub>-FePt: Symmetry and magnetization switching", T. Seki, S. Iihama, T. Taniguchi and K. Takanashi, Physical Review B, Vol. 100, pp. 144427-1~8 (2019).
3. "Systematic investigation of anisotropic magneto-Peltier effect and anomalous Etingshausen effect in Ni thin films", R. Das, R. Iguchi, and K. Uchida, Physical Review Applied, Vol. 11, pp. 034022-1~13 (2019).
4. "Evaluation of spin-orbit torque in a L1<sub>0</sub>-FePt single layer and a L1<sub>0</sub>-FePt/Pt bilayer", T. Sato, T. Seki, M. Kohda, J. Ryu, H. Gamou, S. Karube, K. Takanashi, and J. Nitta, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 58, pp. 060915-1~5 (2019).
5. "Anomalous Etingshausen effect in ferrimagnetic Co-Gd", T. Seki, A. Miura, K. Uchida, T. Kubota and K. Takanashi, Applied Physics Express, Vol. 12, pp. 023006-1~4 (2019).

#### 7. ホームページ等

<http://magmatelab.imr.tohoku.ac.jp>  
koki@imr.tohoku.ac.jp