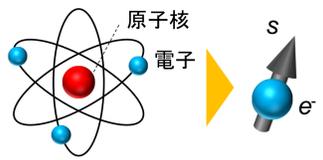


# スピントルクによる強磁性体と ノンコリニア反強磁性体の電氣的制御

東北大学 材料科学高等研究所 特任助教 竹内祐太郎



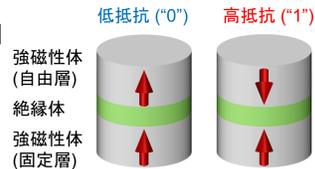
## スピントロニクス



電荷(e)：物質の電氣的性質に関与  
スピン(s)：物質の磁氣的性質に関与  
スピントロニクス：電子の電荷とスピンの両方を応用して  
これまでにないデバイスや新規物理現象の発見を目指す

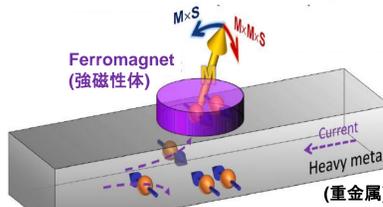
スピントロニクスの応用例：不揮発性メモリMRAM

- 外部電力がなくても記憶の保持が可能 (不揮発性)
- 現在のCMOSテクノロジーと混載可能
- 高速書き込み・読み取りが可能



## 磁性材料の電氣的制御

スピン軌道トルク (Spin-orbit torque : SOT)



重金属(Ta, W, Ptなど)と磁性材料の構造  
において面内電流を印加すると磁性層に  
トルクが発生

- 様々な磁性材料の電氣的制御が可能
- MRAMの新たな書き込み手法として期待
- 駆動電流の低減のために大きなSOT効率が必要

[1] I. M. Miron et al., Nature 476, 189 (2011).  
[2] L. Liu et al., Science 336, 555 (2012).  
[3] S. Fukami et al., Nat. Nanotechnol. 11, 621 (2016).

## 様々な磁性材料における磁気秩序

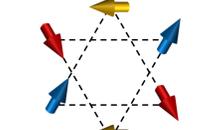
強磁性体<sup>[1-4]</sup>



コリニア(共線)  
反強磁性体<sup>[5]</sup>



ノンコリニア(非共線)  
反強磁性体



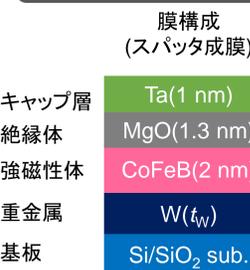
反強磁性スピントロニクス  
として近年注目されている

- 従来より利用されてきた  
磁性材料
- 電氣的制御も実証済

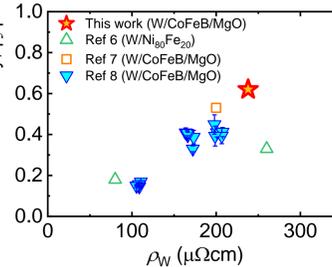
- 正味の磁化(スピン)を持たない磁性材料  
→高密度かつ外部磁場にロバストに設計可能
- 高速動作が可能
- 一般的に電氣的な読み取りが難しい

[1] I. M. Miron et al., Nature 476, 189 (2011).  
[2] L. Liu et al., Science 336, 555 (2012).  
[3] S. Fukami et al., Nat. Nanotech. 11, 621 (2016).  
[4] E. B. Myers et al., Science 285, 867 (1999).  
[5] P. Wadley et al., Science 351, 587 (2016).

## 高抵抗W/CoFeB/MgOにおけるSOT



SOT効率のW抵抗率依存性



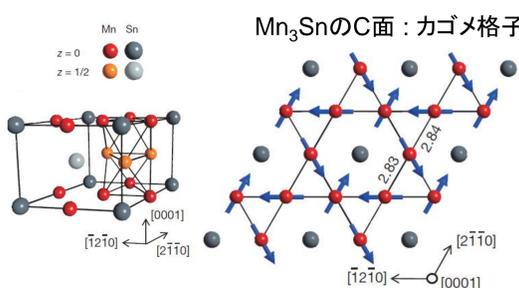
高抵抗W/CoFeB/MgO構造  
を作製し、0.62の大きなSOT  
効率を観測 (当時世界最大)

[6] C.-F. Pai et al., Appl. Phys. Lett. 101, 122404 (2012).  
[7] K.-U. Demasius et al., Nat. Commun. 7, 10644 (2016).  
[8] C. Zhang et al., Appl. Phys. Lett. 109, 192405 (2016).

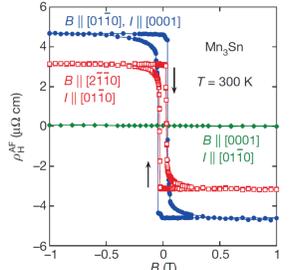
W抵抗率：238  $\mu\Omega\text{cm}$

## ノンコリニア反強磁性体Mn<sub>3</sub>Snのエピタキシャル成長

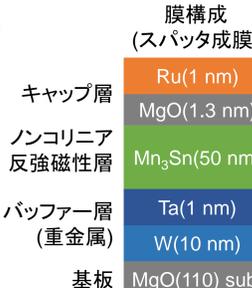
ノンコリニア反強磁性体D0<sub>19</sub>-Mn<sub>3</sub>Sn



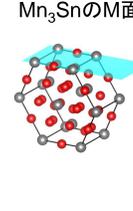
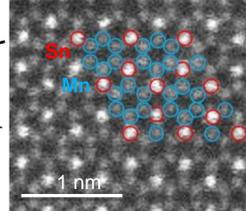
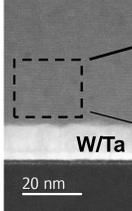
Mn<sub>3</sub>Snの異常ホール抵抗



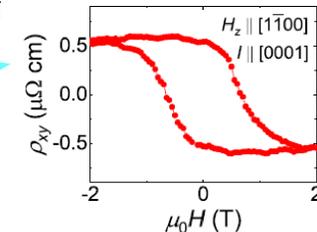
M面配向Mn<sub>3</sub>Sn薄膜のエピタキシャル成長



Mn<sub>3</sub>Snのカゴメ格子



異常ホール効果

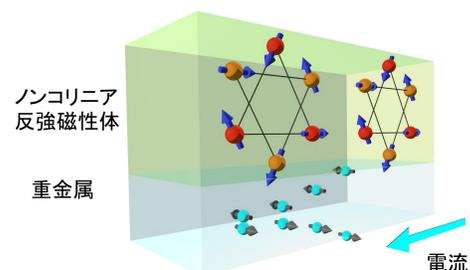


- フラストレーションとジャロシンスキー・守谷相互作用によるノンコリニア反強磁性構造
- 反強磁性体であるにも関わらず大きな異常ホール抵抗(磁気抵抗)を示す

- (1 $\bar{1}$ 00)面(M面)Mn<sub>3</sub>Snのエピタキシャル成長に成功 (世界初)
- Mn<sub>3</sub>Snのノンコリニア反強磁性構造に由来する異常ホール効果を観測

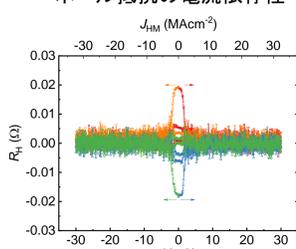
## SOTによるノンコリニアスピン構造の回転

ノンコリニア反強磁性体のSOTに対する応答の評価



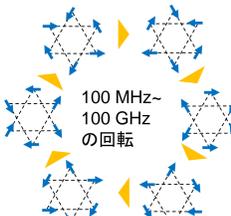
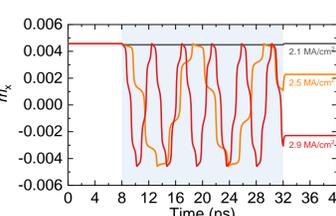
ホール素子  
(幅10  $\mu\text{m}$ , 長さ50  $\mu\text{m}$ )

ホール抵抗の電流依存性



- 重金属/Mn<sub>3</sub>Snのヘテロ構造をホール素子に加工し、そのホール抵抗の電流依存性を評価
- SOTによるMn<sub>3</sub>Snの異常ホール抵抗の中間状態への遷移および擾乱を観測 (従来の強磁性体では見られなかった現象)

ノンコリニア反強磁性体のスピンドYNAMIKSの計算

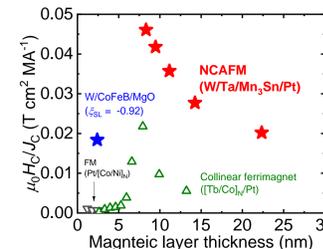


- その他の実験・計算結果から  
ノンコリニアスピン構造がSOTに  
よって回転していることを発見

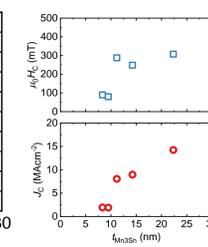
スイッチング効率 $H_C/J_C$ の磁性層膜厚依存性

従来のコリニア磁性材料<sup>[10]</sup>よりも  
1~2桁大きいスイッチング効率  
→低電流かつ外部磁場にロバストな  
メモリ・発振デバイスなどに应用可能

[10] J. Yu et al., Nat. Mater. 18, 29 (2019).



保磁力 $H_C$ および閾値電流密度 $J_C$   
の膜厚依存性



## 本研究のまとめ

- 結論**
- 高抵抗W(タングステン)を用いることで0.62の高いスピン軌道トルク効率を得ることに成功 (当時世界最大) [A]
  - 世界初のM面配向ノンコリニア反強磁性体Mn<sub>3</sub>Snのエピタキシャル薄膜およびその異常ホール効果を観測 [B]
  - 重金属/Mn<sub>3</sub>SnにおいてSOTによるノンコリニア反強磁性体の回転を発見 (スピントロニクスにおける新規現象) [C]

- [A] Y. Takeuchi et al., Appl. Phys. Lett. 112, 192408 (2018).
- [B] J.-Y. Yoon, Y. Takeuchi et al., Appl. Phys. Express 13, 013001 (2020).
- [C] Y. Takeuchi et al., Nat. Mater. 20, 1364 (2021).

**謝辞**

東北大学

大野 英男 教授 (現・本学総長)、 深見 俊輔 教授、 金井 駿 准教授、 山根 結太 助教、 陣内 佛霖 助教、 Jiahao Han 研究員、 尹 注鎂 氏、 伊藤 隆一 氏、 武智 涼太 氏、 内村 友宏 氏、 岸 桂輔 氏、 佐藤 佑磨 氏、 若林 駿 氏

日本原子力研究開発機構  
家田 淳一 博士

Saha Institute of Nuclear Physics (インド)  
Samik DuttaGupta 准教授

Massachusetts Institute of Technology (米国)  
Luqiao Liu 准教授