

# DMI を利用したバイアスフリー SOT-MRAM のシミュレーション解析

渡邊丈士良, 仲谷栄伸  
(電通大)

Computer Simulation of Bias-free SOT-MRAM with DMI

J. Watanabe, and Y. Nakatani  
(Univ. of Electro-Comm.)

## 1 はじめに

近年、不揮発性メモリの一種として Spin-orbit torque MRAM(以下 SOT-MRAM) が研究されている。SOT-MRAM は Spin-transfer torque MRAM(以下 STT-MRAM) で問題視されていた耐久性の問題を、読み書き電流を別々にしたことによって解決したメモリ様式である。しかし、その特性上 DMI<sup>1)</sup> などのアシスト効果を加える必要がある。しかし、DMI のアシスト効果ではパルス幅によって反転の有無が変化するとの問題がある。そこで本研究ではスピンを自由層の一部に加えることによる改善法を提案し、シミュレーションによって提案手法の有効性を調査した。

## 2 シミュレーション概要

直径が 40 nm、膜厚が 2.0 nm の円形薄膜を計算対象とし、シミュレーションの為此を格子幅 1.0 nm で離散化した。材料定数は、飽和磁化  $M_s = 1000 \text{ emu/cm}^3$ 、交換スティッフネス定数  $A = 1.5 \text{ } \mu\text{erg/cm}$ 、DMI 定数  $D = 1.0 \text{ erg/cm}^2$ 、損失定数  $\alpha = 0.1$ 、 $\gamma = 17.6 \text{ Mrad/s} \cdot \text{Oe}$ 、スピホール角  $\Theta = 0.3$ 、電流密度  $0.3 \sim 6.0 \text{ TA/m}^2$  とし、スピンを加える範囲は 100%~50% まで変化させた。

DMI 値を素子の中でスピンの通る領域では  $1.0 \text{ erg/cm}^2$  とし、それ以外の領域では  $0.0 \text{ erg/cm}^2$  とした。DMI の有無によって熱安定性指数 (以下、 $\Delta$ ) が変化する為、スピンを加える範囲ごとに  $\Delta$  が  $60^\circ$  となる磁気異方性定数  $K_u$  を求めた。続いて、放置時間を 3.0 ns に固定した上でパルス幅を 0.05~1.0 ns まで変化させた時の最終平均磁化をマイクロマグネティックシミュレーションによって調査した。

## 3 結果および考察

スピンを加える範囲を 100% と 75% にし、放置時間を 3.0 ns に固定し、パルス幅を 0.05~1.0 ns まで変化させた時の最終磁化平均を Fig. 2, 3 に示す(縦軸: 電流密度、横軸: パルス幅)。この時、赤色領域は反転成功、青色領域は反転失敗、紫色領域は反転途中を表している。Fig. 2, 3 からスピンを加える範囲が 100% の場合はパルス幅により反転の有無が変化するのに対し、75% の場合にはパルス幅が一定以上であれば常に反転することが分かる。この原因を調べるために、パルス幅を 0.5 ns に固定し、電流を切った直後の磁化平均を調べた (Fig. 4)。Fig. 4 から、スピンを加える範囲が 100% の時の磁化平均は  $0.5\pi \text{ rad}$  となるが、75% の時は磁化平均が  $0.5\pi \text{ rad}$  以上となる。このことから、スピンを加える範囲が 100% の時は素子の中心に磁壁構造が出てきていると考えられるが、75% の時は電流切断直後の磁壁構造が +y 方向に移動するため、パルス幅によらずに確実に反転すると考えられる。

磁壁構造が移動する理由としては、無電流範囲 (DMI が  $0.0 \text{ erg/cm}^2$ ) を設けることでその範囲での磁化方向がスピンの向きにとどまるのではなく反転するようになり、磁壁が +y 方向に押されるからであると考えられる。

### References

- 1) S. Rohart and A. Thiaville *Phys. Rev. B* **88**, 184422
- 2) K. Ikegami, *IEEE, IEDM*.2015.7409762

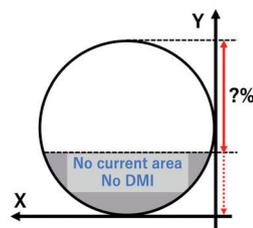


Fig. 1 Bias-free SOT-MRAM

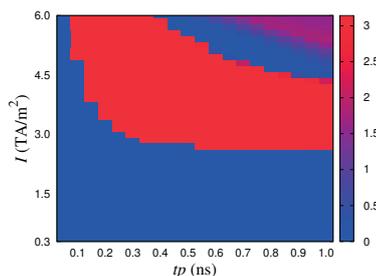


Fig. 2 The range of spin : 100 %

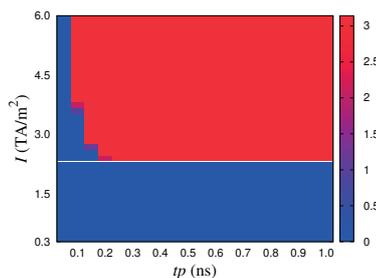


Fig. 3 The range of spin : 75 %

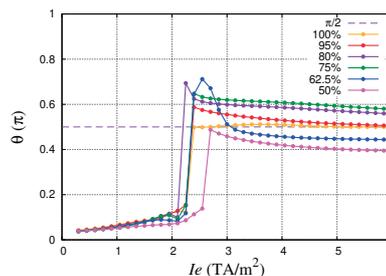


Fig. 4 The effect of range of spin (time : 0.5ns)

# 講演取消

# 拡張型ランダウ自由エネルギーモデルを用いた ナノ磁性体の磁化反転解析とデバイス構造設計

國井創太郎、増澤賢、Alexandre Foggiatto、三俣千春、小嗣真人\*  
(東京理科大学 先進工学部)

## Mechanism of magnetization reversal and structural design of nanomagnet using extended Landau Free Energy Model

Sotaro Kunii, Ken Masuzawa, Alexandre Lira Foggiatto, Chiharu Mitsumata and Masato Kotsugi\*  
(Tokyo University of Science)

### 背景

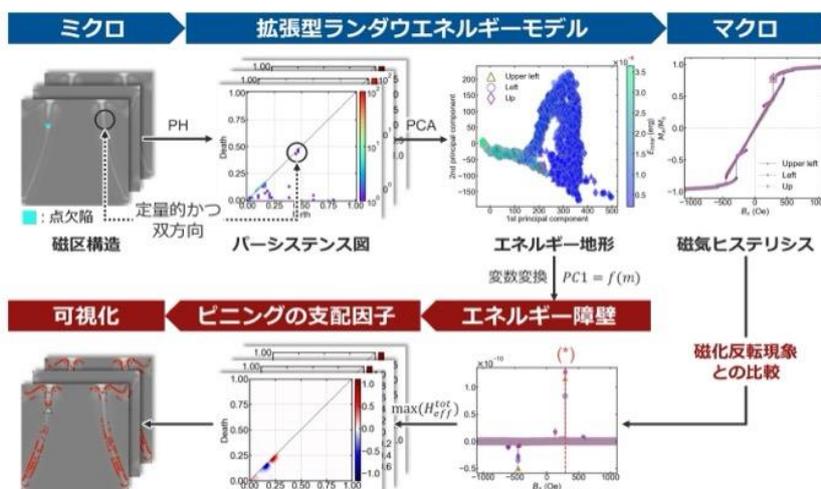
ナノ磁性体において磁気機能と微細組織の関係性を明らかにすることは重要である。磁化反転過程や保磁力などを代表例に、マクロとミクロは個別に解析されてきたが、両者の関係性は極めて定性的であった。

### 方法

そこで我々は、伝統的なランダウ自由エネルギーモデルに情報科学を適用することで、「拡張型ランダウ自由エネルギーモデル」を設計した。本モデルでは、磁区構造の空間情報を積極活用して情報空間上に新たなエネルギーランドスケープを描画する。ミクロな磁区構造とマクロな磁化反転現象を階層を超えて双方向接続でき、起源となる磁氣的相互作用の因果解析を可能とする。

### 結果

研究では、パーマロイナノ磁性体の磁区構造データを対象に、パーシステントホモロジーを用いて特徴量を作成すると共に、リッジ回帰、主成分分析、アダマール積を用いてエネルギーモデルを設計した。シンプルな変数変換と微分によって、反転に要するエネルギー障壁と特徴量の関係性を構築できた。解析の結果、ピンング現象では静磁エネルギーが支配的なことを示すことができた。また各々のエネルギー障壁が実空間上でどのように蓄積されるかも可視化できた。さらにデバイス構造をトポロジーの観点から逆設計することができる。このことから今後応用への発展も期待される。



### 参考文献

- 1) K. Masuzawa et al, T. Magn. Soc. Jpn.,6, (2022), 1
- 2) T. Yamada and M. Kotsugi et al., Vac. Surf. Sci. 62, (2019) 15

# 磁化反転現象の因果解析に向けた 拡張型 Landau 自由エネルギーモデルの設計

増澤 賢, Alexandre Lira Foggiatto, 三俣 千春, 小嗣真人  
(東理大先進工)

Design of the extended Landau free energy model for causal analysis of magnetization reversal phenomenon  
Ken Masuzawa, Alexandre Lira Foggiatto, Chiharu Mitsumata, Masato Kotsugi  
(Tokyo Univ. of Science)

## はじめに

電気自動車の急速な普及を背景に、モーターのエネルギー変換効率を決定付ける保磁力メカニズムの理解が求められている。保磁力や磁化過程を理解するための理論として長らく利用されてきた Ginzburg-Landau 理論では、保磁力は磁化反転に必要なエネルギー障壁の高さによって決定づけられ、エネルギー地形の鞍点が保磁力に対応している。その一方で、同理論では平均場近似に基づいた一様な有効場を前提とするため、粒界等を含む現実的な磁性材料の保磁力の説明が困難であった。そこで本研究では、磁区構造の不均一性を取り扱いながらも磁化反転現象を説明可能な、「拡張型 Landau 自由エネルギーモデル」の設計<sup>[1]</sup>および解析を行った。

## 実験方法

実験は、異なる膜厚を持つ単結晶 Bi 置換鉄ガーネット (YIG) を対象に、Kerr 顕微鏡を用いて磁区構造の垂直磁場依存性のデータを取得した。各々の磁区構造画像から、交換エネルギーおよび静磁エネルギーの 2 種類を算出し、合計を全エネルギーとした。またパーシステントホモロジー (PH) 解析と主成分分析 (PCA) を用いて磁区構造変化を二次元の特徴量で記述した<sup>[2]</sup>。これをエネルギーの記述子としてエネルギー地形を描画することで、磁区構造と磁化反転過程と各種エネルギーの対応関係を可視化した<sup>[1]</sup>。さらに設計した地形の勾配解析を行い、エネルギー障壁を算出するとともに、磁化反転に寄与する位置を逆解析した。

## 実験結果

Fig. 1 は、実材料 YIG の磁区構造データから得られた全エネルギー地形である。PC1 と PC2 は互いに直交する基底であり磁区構造の微細組織の特徴を表している。データ分布は飽和、核生成、保磁力の磁化反転に伴い連続的にプロットされ、保磁力は主に PC1 の関数として表現された。また静磁エネルギー地形および交換エネルギー地形を特徴量で微分して詳細解析した結果、微細なエネルギー障壁を乗り越えることで磁区成長モードの変化が起こっていることが分かった。さらに各エネルギー項は相互に関係しており、有効場の符号の違いが磁区の成長モードの違いを生んでいることが明らかとなった。これに加えて、エネルギー障壁前後における逆解析の結果から、磁区成長モードを決定づける磁区の位置を可視化できた。本手法は、巨視的な磁化反転過程と微細な磁区構造変化の因果関係を自由エネルギーの観点で解析可能なため、保磁力などの様々な磁気特性の発現メカニズムの理解に貢献できると期待される。

## 参考文献

- 1) K. Masuzawa et al, T. Magn. Soc. Jpn., 6, (2022), 1
- 2) T. Yamada and M. Kotsugi et al., Vac. Surf. Sci. 62, (2019) 15

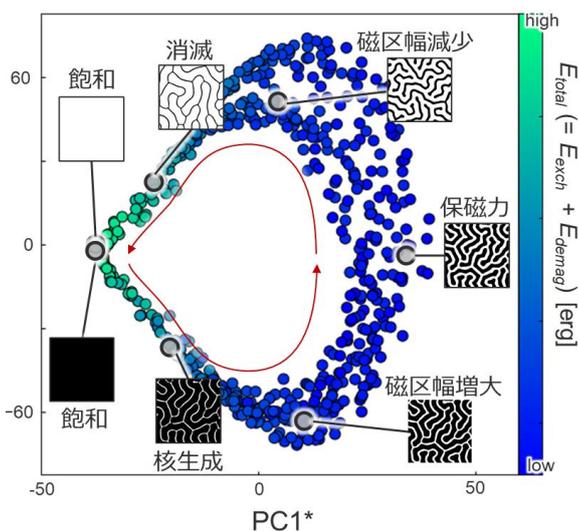


Fig1. Extended Landau Free Energy model

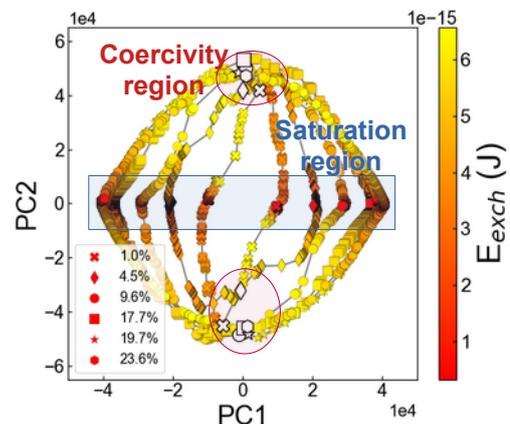
# Interpretation of Coercivity and Energy Mechanism based on the Extended Energy Landscape Model

A. L. Foggiatto<sup>A</sup>, S. Kunii<sup>A</sup>, C. Mitsumata<sup>A,B</sup> and M. Kotsugi<sup>A</sup>

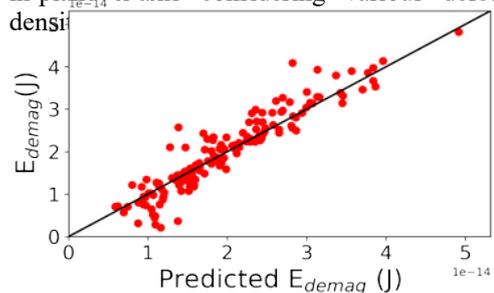
<sup>A</sup>*Dept. of Mater. Sci. and Tech., Tokyo Univ. of Science,* <sup>B</sup>*NIMS*

Coercivity is expressed as a complex correlation between magnetization and microstructure; moreover it is an important property for describing material functions. In real materials, metallography highly influences the magnetic properties owing to the various processes as defect pinning of domains walls.<sup>1,2</sup> To improve the electrical devices, the coercivity mechanism must be clarified. However, owing to multiple intrinsic origins, coercivity cannot be easily described in the framework of conventional Ginzburg-Landau (GL) theory.<sup>3</sup>

In this work, we used machine learning, principal component analysis (PCA), to draw a realistic energy landscape of magnetization reversal process for permalloy considering various density of defects. Fig. 1 displays the energy landscape as a function of the first and second principal component (PC1 and PC2). The landscape map enabled visualization of the energy and coercivity as a function of feature space components. We observed that PC1 has a linear correlation with the magnetization, while the PC2 has a polynomial correlation with the energy. As a result from energy landscape analysis, magneto-static energy mainly influences the demagnetization reversal process. Therefore, we consider the prediction of magneto-static energy as described in Fig.2 The training was based in the extended landscape model. We could predict the energy with  $R^2 \sim 0.80$ . This result shows that the extended energy model can be use to clarify the coercivity mechanism and to predict the system energy based on the feature space components.



**Fig. 1.** Energy landscape for the magnetization in-plane, x-axis considering various defects density



**Fig. 2.** Demagnetization energy prediction using the energy landscape parameters as the input.

[1]A. Hubert, R. Schäfer "Magnetic Domains: The Analysis of Magnetic Microstructures" (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998).

[2] C. H. Chen, et al., J. Appl. Phys. **93**, 7966 (2003)

[3]L. D. Landau and E. M. Lifshitz: "Statistical Physics" (Pergamon, Oxford,1980)