

磁区構造形成のフェーズフィールドモデリング

Phase-field modeling of magnetic structure formation

東京農工大¹, JFE スチール研² ◯(M1)阿波 龍一郎¹ 山中 晃徳¹ 末廣 龍一²

Tokyo Univ. Agriculture and Technology¹, JFE Steel Corporation, Steel Research Laboratory²,

◯Awa Ryuichiro¹, Akinori Yamanaka¹, and Ryuichi Suehiro²

E-mail: s180665y@st.go.tuat.ac.jp

1. 緒言

磁性材料は、材料表面および内部に複数の磁区構造を形成し、その磁区構造に依存して磁気的性質が大きく異なる。したがって、磁区構造形成メカニズムを解明し、制御することで、用途に適した磁性材料の創製が可能となることが期待される。

実験的には、磁気力顕微鏡を用いた磁区構造の観察⁽¹⁾などが行われているが、磁区構造形成メカニズムやその時間変化には未解明なことも多い。一方で、数値シミュレーションを用いた磁区構造形成の解明も期待されている。従来の研究においては、Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式を用いた磁区構造形成シミュレーションがなされてきた。しかしながら、LLG 方程式を用いたシミュレーションでは磁壁内部の磁化回転を計算する必要があるため、磁壁内部を離散化する必要があり、解析領域の大きさはナノメートルスケールに限定される⁽²⁾。しかし、磁性材料の一つである鉄系材料の磁区構造は、結晶粒と同程度のマイクロメートルスケールであることから、従来よりも大きな空間スケールでの磁区構造形成シミュレーション手法が必要である。

本研究では、マルチフェーズフィールド(MPF)法⁽³⁾を用いた、磁区構造形成過程を解析可能な数値シミュレーション手法を提案する。本稿では、提案する MPF モデルを用いた鉄系材料における磁区構造形成過程の 3 次元シミュレーション結果を報告する。

2. マルチフェーズフィールドモデル

立方対称の結晶磁気異方性をもつ材料の内部に、磁化容易軸である [100] 方向に平行および反平行な磁化をもつ 6 種類の磁区が存在すると仮定する。このとき、任意の座標における 6 種類の磁区の存在確率としてフィールド変数を定義する。系の全自由エネルギーは、磁壁エネルギーと静磁エネルギーの和として定義する。磁壁エネルギーは、磁区構造に磁壁が存在することで生じる付加的なエネルギーとして評価する。これにより、磁壁内部における磁化分布の計算が不要となり、解析領域をマイクロメートルオーダーに拡張できる。静磁エネルギーは系の形状と磁化分布に依存する反磁場を用いて評価する⁽⁴⁾。系の全自由エネルギーが時間とともに単調減少すると仮定することでフィールド変数の時間発展方程式を導出し、それを差分法により数値解析することで、磁壁移動および磁区構造変化を解析できる。

3. シミュレーション条件及び結果

Fig. 1(a)に示すように、計算領域は 1 辺の長さが 50 μm の 3 次元立方体とし、それを互いに反平行な磁化をもつ 2 つの磁区で 2 分割された状態を初期状態とする。差分格子間隔は 1.0 μm である。この初期状態から系の

全自由エネルギーが最小化されるように、磁区構造が変化する様子をシミュレーションした。

Fig. 1(b)および(c)に、磁区構造の時間変化を示す。磁区構造は、時間の経過とともに 4 方向の磁化をもつ磁区が成長し、解析領域端面において、法線方向の磁化を持つ磁区が生じないように、 xy 平面内で磁化が還流する。還流磁区構造を形成することがわかる。この還流磁区構造は、初期状態と比べて解析領域端面における磁極の生成が抑制されており、静磁エネルギーが低く、エネルギー的に安定な構造であることを示している。この結果より、本研究で提案する MPF モデルを用いて、磁区構造の 3 次元ダイナミクスを解析可能であり、現実で安定的な磁区構造形成を再現可能であることが示された。

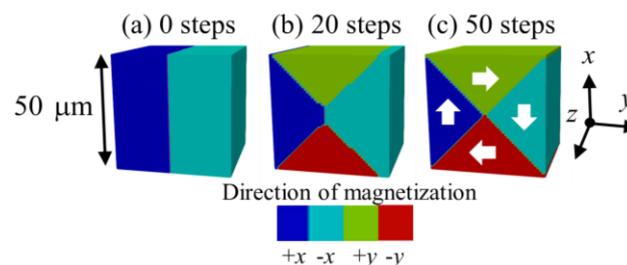


Fig. 1 Evolution of magnetic domain structure driven by demagnetizing-field for 50 steps. White arrows represent the directions of magnetic force in each magnetic domain.

4. 結言

磁性材料に形成される磁区構造の時間変化をマイクロメートルスケールで解析可能な MPF モデルを提案した。提案した MPF モデルを用いた磁区構造形成の 3 次元シミュレーションを行い、還流磁区構造形成を定性的に再現可能であることを示した。

文 献

- (1) Y. Martin, H. K. Wickramasinghe, "Magnetic imaging by "force microscopy" with 1000 Å resolution", *Applied Physics Letters*, Vol. 50, No. 20 (1987), pp. 1455-1457
- (2) K. Sato, T. Yamamoto, T. Tezuka, T. Ishibashi, Y. Morishit, A. Koukitu, K. Machida, T. Yamaoka, "MFM observation of spin structures in nano magnetic dot arrays fabricated by damascene technique", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 304, (2006), pp. 10-13.
- (3) 高木知弘, 山中晃徳, "フェーズフィールド法—数値シミュレーションによる材料組織設計—." 養賢堂, (2012).
- (4) A. Hubert, R. Schafer, "Magnetic Domains. The Analysis of Magnetic Microstructures" Springer, (1998).