

磁区構造に及ぼす自由表面の効果のフェーズフィールド解析

Phase-field analysis of free surface effect on magnetic domain structure

東京農工大¹, JFE スチール研² ◯(M2)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。磁区構造の形成メカニズムを解明し、制御することができれば、用途に適した磁性材料の創製が期待される。前報⁽¹⁾では、磁性材料に形成される磁区構造の時間変化と磁歪による応力場解析が可能なマルチフェーズフィールド(MPF)法⁽²⁾を用いた数値シミュレーション方法を提案した。また、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、外部付加応力に対応した磁区構造形成を再現可能であることを示した。一方で、磁区構造は応力場だけではなく、自由表面の形態に強く影響を受ける。したがって、より実用的な解析には応力場と自由表面を同時に考慮する必要があるが、前報のMPFモデルでは自由表面の考慮はできない。

本研究では、自由表面を有する系における磁区構造形成と応力場解析を行うためのMPFモデルを構築し、磁区構造形成と応力場を同時に解析する数値シミュレーション方法を提案する。

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]方向に平行及び反平行な磁化をもつ6種類の磁区が存在すると仮定して、任意の座標 \mathbf{r} における6種類の磁区が存在確率を表すフィールド変数 $\phi_\alpha(\mathbf{r})$ ($\alpha = 1, 2, \dots, 6$)を定義する。また、磁区が存在しない領域を表現するために新しくフィールド変数 $\phi_7(\mathbf{r})$ を定義した。

系の全自由エネルギー G は、磁壁エネルギー、静磁エネルギー、弾性ひずみエネルギーの和であると仮定し、 $\phi_\alpha(\mathbf{r})$ の関数とする。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。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⁽³⁾。弾性ひずみエネルギーは磁歪 $\varepsilon_{ij}^0(\mathbf{r})$ を通じて磁区構造と相互作用するものとした。ここで、自由表面を考慮するために不均質弾性系を導入し⁽⁴⁾、弾性率 $C_{ijkl}(\mathbf{r})$ を位置 \mathbf{r} の関数として次式で定義する。

$$C_{ijkl}(\mathbf{r}) = C_{ijkl}^0 - \Delta C_{ijkl}^0 \phi_7(\mathbf{r}) \quad (1)$$

ここで、 C_{ijkl}^0 は磁性材料の弾性率を表し、 ΔC_{ijkl}^0 は磁区が存在しない領域($\phi_7(\mathbf{r})=1$)での弾性率の減少量である。

磁区構造形成は系の全自由エネルギー G が時間とともに単調減少するように生じると仮定し、 $\phi_\alpha(\mathbf{r})$ の時間発展方程式を導出する。時間発展方程式を差分法により数値解析することで、磁壁移動及び磁区構造変化を解析する。

3. シミュレーション条件及び結果

Fig. 1(a)にシミュレーションの初期状態を示す。互いに反平行な磁化をもつ2つの磁区で分割された磁区構造と、解析領域上部に厚さ $2\ \mu\text{m}$ の磁区が存在しない領域($\phi_7(\mathbf{r})=1$)を配置することで自由表面を導入した。計算領域は、1辺の長さが $32\ \mu\text{m}$ の3次元立方体とし、差分格子間隔は $1.0\ \mu\text{m}$ である。ただし、外部磁場と外部応力は零とする。

Fig. 1(b)および(c)に、磁区構造の時間変化を示す。時間の経過とともに、4方向の磁化をもつ磁区が成長し、 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。Fig. 2(a)と(b)に、それぞれ x, y 方向の垂直応力を示す。磁化の方向には圧縮応力が生じ、磁化の方向と直交な方向では引張応力が生じる。また、Fig. 2(c)に、 xy 方向のせん断応力を示す。磁区の境界近傍で、せん断応力が増大することがわかる。なお、紙面では示していないが、他のせん断応力においても同様な分布である。以上の結果より、本研究で提案する数値シミュレーション方法により、系内に自由表面を含む磁区構造の3次元ダイナミクスと応力場の変化を解析できることが示された。

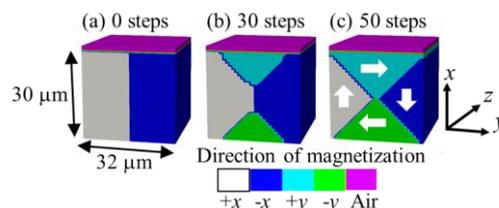


Fig. 1 Evolution of magnetic domain structure in a system with a free surface driven by demagnetizing-field for 50 steps. White arrows represent the directions of magnetic force in each magnetic domain.

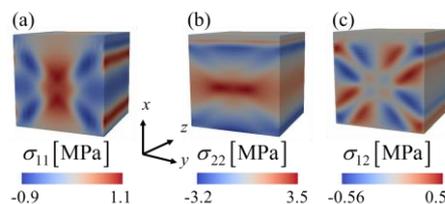


Fig. 2 Distribution of (a) 11 (b) 22, and (c) 12 components of Cauchy stress in the magnetic domain structure with a free surface at 50 steps.

4. 結言

自由表面を有する系における磁区構造の時間変化と応力場を解析可能なMPFモデルを提案した。提案したMPFモデルを用い3次元シミュレーションを行い、磁区構造形成と内部の応力分布を示した。

文献

- (1) 阿波龍一郎, 山中晃徳, 末廣龍一, “フェーズフィールド法による磁区構造内部の応力場解析”, 応用物理学学会第80回秋季学術講演会, 北海道, 2019年9月.
- (2) 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).
- (3) A. Hubert, R. Schafer, “Magnetic Domains. The Analysis of Magnetic Microstructures” Springer, (1998).
- (4) H. Moulinec, P. Suquet, “A numerical method for computing the overall response of nonlinear composites with complex microstructure”, Computer methods in applied mechanics and engineering, (1998).