

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

Analysis of stress field in magnetic domain structure using phase-field method

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を解析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、還流磁区構造を定性的に再現可能であることを示した。しかしながら、前報のMPF モデルは磁区構造形成における磁歪の効果を考慮していない。本研究では、マイクロメカニクスに基づき応力場を解析する手法を既報のMPF モデルに導入し、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 $\mathbf{r}$ 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。

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⁽²⁾。弾性ひずみエネルギーは、次式で表される磁歪 $\varepsilon_{ij}^0(\mathbf{r})$ により生じると考え、フェーズフィールド微視的弾性論⁽³⁾に基づき評価する。

$$\varepsilon_{ij}^0(\mathbf{r}) = \frac{3}{2}\lambda_{100}\left\{\omega_i^2(\phi_\alpha(\mathbf{r})) - \frac{1}{3}\right\}\delta_{ij} + \frac{3}{2}\lambda_{111}\omega_i(\phi_\alpha(\mathbf{r}))\omega_j(\phi_\alpha(\mathbf{r}))(1-\delta_{ij}) \quad (1)$$

ここで、 λ_{100} は磁化が[100]方向に飽和したときの磁歪定数、 λ_{111} は磁化が[111]方向に飽和したときの磁歪定数、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。 $\omega_i(\mathbf{r})$, $\omega_j(\mathbf{r})$ は磁化の方向余弦を表す。

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、磁壁移動およ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)に初期状態を示す。計算領域は、1辺の長さが $50 \mu\text{m}$ 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 $1.0 \mu\text{m}$ である。

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、圧縮応力が生じる。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、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。

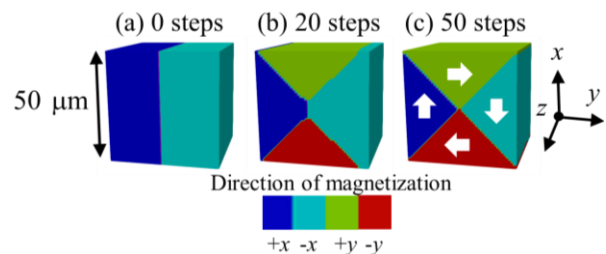


Fig. 1 Evolution of magnetic domain structure driven by demagnetizing-field for 50 steps. White arrows represent the directions of magnetic force in each magnetic domain.

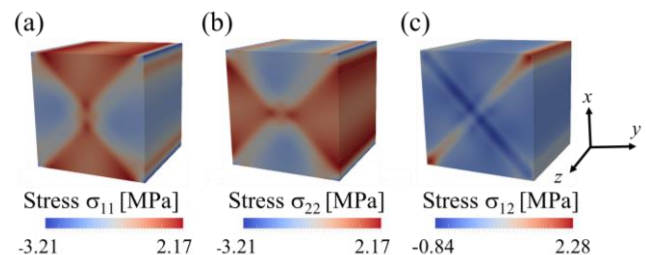


Fig. 2 Distribution of (a) 11 (b) 22, and (c) 12 components of Cauchy stress in the magnetic domain structure at 50 steps.

4. 結言

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, “磁区構造形成のフェーズフィールドモデリング”, 応用物理学会第66回春季学術講演会, 東京, 2019年3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) 近角聰信, “強磁性体の物理 (下).” 裳華房, (1984).