

磁性体モデルにおける FDTD 法による電磁界の時間応答解析

Time-Domain Analysis of Electromagnetic Fields by the FDTD Method on Magnetic Material Model

○田中和幸¹, 大貫進一郎²

*Kazuyuki Tanaka¹, Shinichiro Ohnuki²

Abstract: Electromagnetic fields is analyzed with constant value or tensor as permeability in magnetic material. However, it is impossible to calculate electromagnetic fields due to complicated dynamics of magnetization by conventional calculation method for magnetic material. In this report, multiphysics simulations in consideration of interaction between electromagnetic wave and magnetization are performed.

1. はじめに

磁性体における電磁界解析は透磁率として定数や分散を有するテンソルを考慮することが一般的である。しかし、従来手法では回転軸が変化するような複雑な磁化のダイナミクスによる外場への影響は考慮されていない。そこで本報告では電磁波と磁化の相互作用を考慮した FDTD 法に基づく複合物理解析により電磁界解析を行い、磁化に起因する電磁場の変化を検討する。

2. 解析手法

本報告では、磁性体における磁化のダイナミクスを考慮した電磁界解析を Finite-Difference Time-Domain (FDTD)法を用いて行う[1]。Figure 1 に計算フローを示す。以下の式より磁界 \mathbf{H} を磁束密度 \mathbf{B} および磁化 \mathbf{M} の値を用いて導出することで磁性の効果を電磁波に取り入れる。

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M} \tag{1}$$

電磁波の伝搬および電磁波に対する磁化のダイナミクスは次式で示す Maxwell 方程式および Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG)方程式より算出する。

$$\nabla \times \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} = \mathbf{J} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \tag{2}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \tag{3}$$

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} + \frac{\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} \tag{4}$$

ただし、磁化ベクトル \mathbf{M} が受ける磁界 \mathbf{H}_{eff} は次式で表す。

$$\mathbf{H}_{\text{eff}} = \mathbf{H}_{\text{ac}} + \mathbf{H}_B + \mathbf{H}_{\text{ex}} \tag{5}$$

$$\mathbf{H}_{\text{ex}} = \frac{2A}{M_s^2} \nabla^2 \mathbf{M} \tag{6}$$

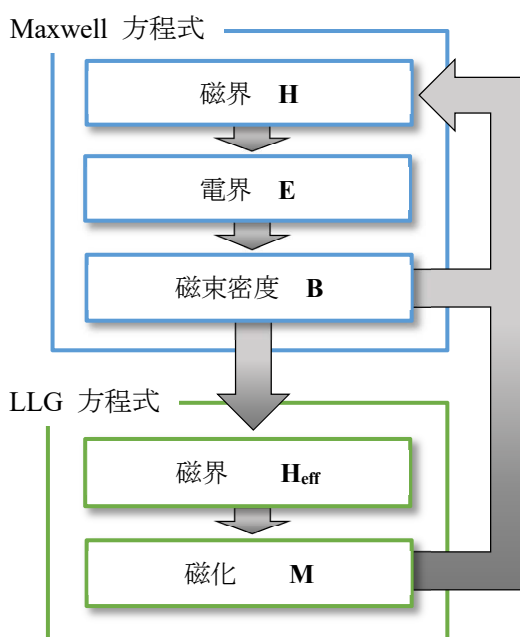


Figure 1 Computational flow for multiphysics simulation

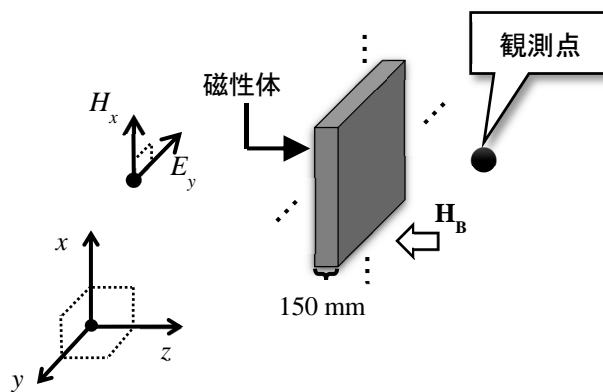


Figure 2 Computational model

ここで、 γ は磁気回転比、 α は減衰定数、 M_S は飽和磁化、 \mathbf{H}_{ac} は Maxwell 方程式より算出する磁界、 \mathbf{H}_B は磁化を飽和させるための外部磁界、 \mathbf{H}_{ex} は交換磁界、 A は交換スティフネス定数とする。

3. 解析結果

Figure 2 に外部磁界 \mathbf{H}_B により $-z$ 方向に飽和した磁性体モデルを示す。 E_y および H_x 成分を有する直線偏光を周波数 $f = 10$ GHz の連続波として磁性体に入射する。磁性体はイットリウム鉄ガーネット (YIG : Yttrium Iron Garnet) を想定し、 $\gamma = 2.21 \times 10^5$ rad/T、 $\alpha = 2.3 \times 10^{-4}$ 、 $M_S = 1.39 \times 10^5$ A/m、 $A = 4.15 \times 10^{-12}$ J/m とした [2, 3]。

外部磁界 \mathbf{H}_B の時間変化を Figure 3 に示す。定常的に印加していた z 成分に加えて、3 nsec から 7 nsec にかけて y 成分を徐々に増加させ、磁化の飽和方向を変化させる。

Figure 4 は $t = 2$ nsec および 8 nsec における磁化 \mathbf{M} の飽和方向のイメージを表している。外部磁界の y 成分を増加させたことにより定常における磁化の飽和方向が変化し、回転軸が y 方向に 45° 変化している。

磁界の x 成分 H_x の時間応答を Figure 5 に示す。観測点は入射波が磁性体を透過した後方 30 mm 地点とする。1 nsec から 3 nsec における時間応答が入射正弦波に相当しており、3 nsec 以降に観測される振幅の大きい応答は磁化 \mathbf{M} の変化に起因する。

4. まとめ

本報告では Maxwell 方程式および LLG 方程式を用いて電磁波と磁化の相互作用を考慮した電磁界解析を行った。テンソル等を用いた従来手法では解析困難である、磁化の回転軸変化に対する電磁界応答を提案手法により解析できることを示した。

5. 謝辞

本研究の一部は、私立大学戦略的基盤形成支援事業の援助を受けて行われた。

6. 参考文献

[1] M. M. Aziz, Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 15, 1-29, 2009.
 [2] H. Yu, O. A. Kelly, V. Cros et al., Scientific Reports, Vol. 4, 6848, 2014.
 [3] S. Tamaru, J. A. Bain, M. K. Kryder et al., Physics Review B 84, 2011.

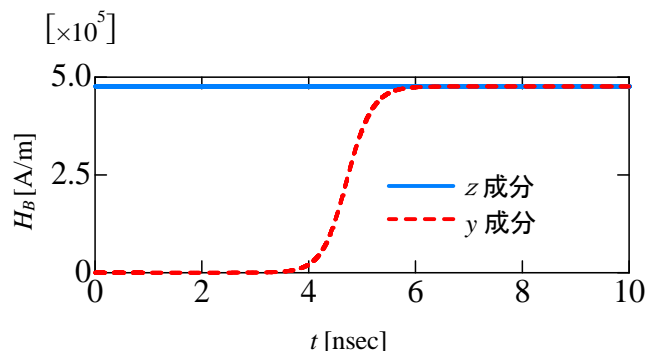


Figure 3 Time variation of external magnetic field

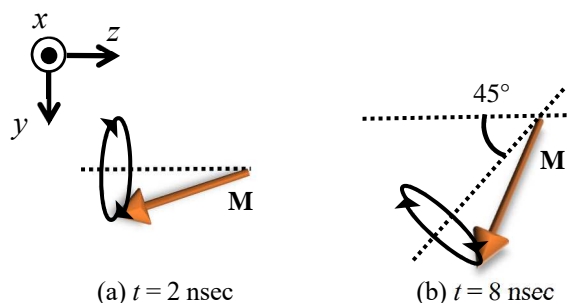


Figure 4 Saturation direction of magnetization

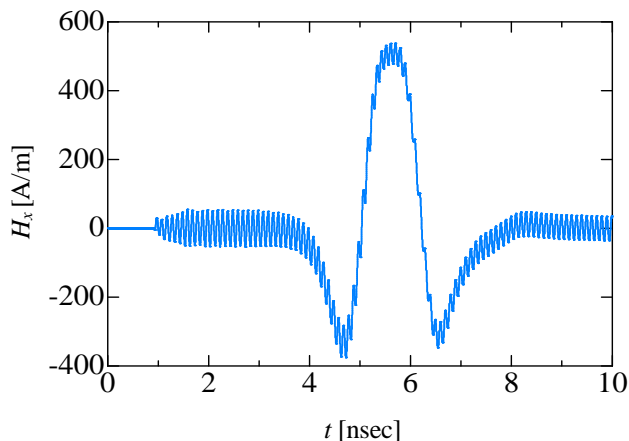


Figure 5 Time response of x-component of magnetic field

[4] K.Tanaka and S. Ohnuki, IEICE Technigcal Repot, EMT2016-23, pp. 97-100, July. 2016.
 [5] K.Tanaka and S. Ohnuki, IEICE Society Conference, C-1-5, Sep. 2017.
 [6] K.Tanaka and S. Ohnuki, Proc. of PIERS 2017, 2P9a.