

Maxwell 方程式と LLG 方程式の双方向連成による複合物理解析
Multiphysics analysis by bidirectional coupling of Maxwell's equations and LLG equations

○宮原京也¹, 向田智貴², 岸本誠也³, 中川活二⁴, 大貫進一郎³

*Kyoya Miyahara¹, Tomoki Mukita², Seiya Kishimoto³, Katsuji Nakagawa⁴, Shinichiro Ohnuki³

Abstract: Magnetic materials are expected to be used in many devices; however, their magnetization dynamics is complex. For an accurate analysis, it requires to consider the detailed interactions between the magnetization and electromagnetic fields. As a basic investigation, the present study focuses on ferromagnetic materials and undertakes a numerical analysis of these interactions. Specifically, a bidirectional coupling is consisted of Maxwell's equations, which describes the behavior of the electromagnetic fields, and the LLG (Landau-Lifshitz-Gilbert) equation, which describes the magnetization dynamics of ferromagnets.

磁性体は多くのデバイス応用が期待される一方で磁化ダイナミクスは複雑であり、正確な解析には電磁界との間の相互作用を詳細に解析することが求められる。その基礎検討として、本研究では強磁性体を対象とし、電磁界を記述する Maxwell 方程式と、磁性体のダイナミクスを記述する LLG(Landau-Lifshitz-Gilbert)方程式の双方向連成を通じ、電磁界と磁化ダイナミクスの相互作用を数値的に検証する。本報告では、Maxwell 方程式を FDTD(Finite-Difference Time-Domain)法、LLG 方程式を4次のルンゲクッタ法で解き、電磁界と磁化の相互作用を考慮した複合物理解析法の開発を目指す。式(1)は LLG 方程式を定式化した常微分方程式、式(2)は LLG で得られる磁化 \mathbf{M} と Maxwell で得られる磁束密度 \mathbf{B} から磁界 \mathbf{H} を計算する式である。

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\frac{\gamma}{1+\alpha^2} \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff} - \frac{\alpha\gamma}{(1+\alpha^2)M_s} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_{maxwell} = \frac{\mathbf{B}_{maxwell}}{\mu_0} - \mathbf{M} \quad (2)$$

ここで、 γ は磁気回転比、 α は減衰定数、 M_s は飽和磁界、 \mathbf{H}_{eff} は有効磁界を表す。

Maxwell 方程式と LLG 方程式の双方連成による複合物理解析は、以下の解析フローに基づき実行される。FDTD 法により Maxwell 方程式を解き、電界 \mathbf{E} から磁束密度 \mathbf{B} を計算する。得られた \mathbf{B} と前ステップの磁化ベクトル \mathbf{M} から式(2)により磁界 $\mathbf{H}_{maxwell}$ を求める。その後、 $\mathbf{H}_{maxwell}$ に外部直流磁界や交流磁界を加え、磁化ダイナミクスに作用する有効磁界 \mathbf{H}_{eff} を計算する。 \mathbf{H}_{eff} を入力として LLG 方程式を4次のルンゲクッタ法で解き、次の \mathbf{M} を更新する。今後は本手法を用いて磁性体間の相互作用や、スピンと電磁波の相互作用検証などに繋げる。

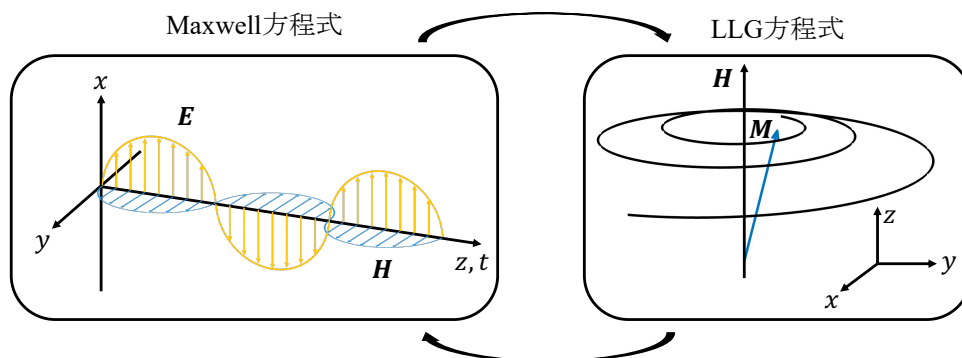


Figure 1. 電磁界と磁化の相互作用

参考文献

- [1] 宇野亨:「数値電磁界解析のための FDTD 法」, コロナ社, pp. 1-32, 2016.
- [2] Yuta Ito, Takumi Yasuda, Seiya Kishimoto, Katsuji Nakagawa, Shinichiro Ohnuki, "Multiscale Modeling of 3-D Electromagnetic Fields with Magnetization Dynamics," IEEE Access, vol. 12, pp. 38664-38671, 2024. Doi: 10.1109/ACCESS.2024.3375927

1: 日大理工・学部・電気, 2: 日大理工・院(前)・電気, 3: 日大理工・教員・電気, 4: 日大理工・教員・電子