

L-57

磁性膜におけるスピン波の伝搬解析

- 磁気双極子磁界の計算範囲 -

Propagation Analysis of Spin Wave in Magnetic Films

- Computational Range of Magnetic Dipole Magnetic Field -

○安田 拓弥¹, 田中 和幸², 大貫 進一郎³

*Takumi Yasuda¹, Kazuyuki Tanaka², Shinichiro Ohnuki³

Abstract: Recently, heat loss due to electric current becomes a problem in electric devices. Spintronics without heat loss is a remedy and power saving can be realized. In this paper, we investigate propagation of spin wave in magnetic films.

1. はじめに

高効率なエネルギー利用が求められる現代社会において、電子デバイスでは電流による熱損失が課題となっている。そのため原理的に熱損失を伴わないスピントロニクスが注目されている。

本報告では、LLG(Landau Lifshitz Gilbert)方程式を用いて磁性膜におけるスピン波の解析を行う。そして磁気双極子磁界の計算範囲に対する計算速度及び精度の関係について検討する。

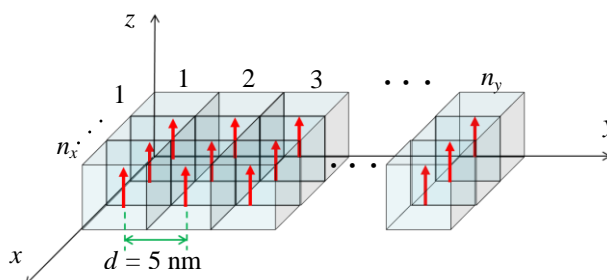


図1 磁性膜の解析モデル

2. 解析手法

スピン波の歳差運動は以下の LLG 方程式を用いて解析する。

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

ここで、 \mathbf{M} は磁化ベクトル、 M_s は飽和磁化、 γ は磁気回転比、 α は減衰定数、 \mathbf{H}_{eff} は有効磁場である。また \mathbf{H}_{eff} は次式で表される。

$$\mathbf{H}_{\text{eff}} = \mathbf{H} + \mathbf{H}_D + \mathbf{H}_{\text{ex}} \quad (2)$$

ただし、 \mathbf{H} は外部磁界、 \mathbf{H}_D は磁気双極子磁界、 \mathbf{H}_{ex} は交換磁界である。また \mathbf{H}_D 及び \mathbf{H}_{ex} はそれぞれ次式により定義される。

$$\mathbf{H}_D = -\frac{1}{4\pi\mu_0 r^3} \left[\mathbf{M} - \frac{3}{r^2} (\mathbf{M} \cdot \mathbf{r}) \mathbf{r} \right] \quad (3)$$

$$\mathbf{H}_{\text{ex}} = \frac{2A}{M_s^2} \nabla^2 \mathbf{M} \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{r} は磁化間の距離ベクトル、 A は交換スティフネス定数、 μ_0 は真空中の透磁率である。

式(1)で表される磁化ベクトル \mathbf{M} の時間変化を二次のルンゲクッタ法により求め、スピン波の伝搬解析を行う。

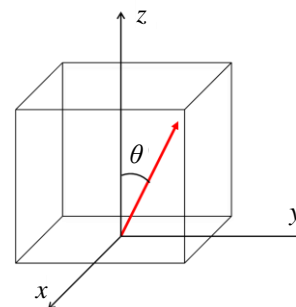


図2 磁化ベクトルの初期状態： $n_x = 1-3$, $n_y = 1$

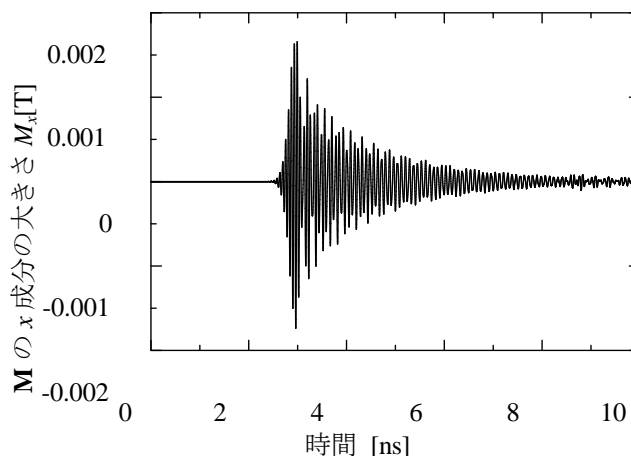


図3 磁化ベクトルの時間応答： $n_x = 2$, $n_y = 200$

3. 解析結果

解析モデルとして図 1 の磁性膜を検討する。膜の大きさは x 方向に 15 nm, y 方向に 1000 nm, 厚みは z 方向に 5 nm とする。媒質は NiFe 合金を想定し, 飽和磁化 $M_s = 1 \text{ T}$, 磁気角運動量 $\gamma = 1.58 \times 10^6 \text{ T}^{-1}\text{s}^{-1}$, 減衰定数 $\alpha = 0.006$, $A = 1.3 \times 10^{-11} \text{ J/m}$ とする。各磁化ベクトル間の距離を 5 nm とし, 解析領域全体に $5 \times 10^6 \text{ A/m}$ の直流磁界を z 方向に印加する。図 2 は磁化ベクトル $n_x = 1-3$, $n_y = 1$ の初期状態を示しており, 磁化ベクトルを $\theta = 2^\circ$ 傾ける。図 3 より $n_x = 2$, $n_y = 1$ の磁化ベクトルが歳差運動を開始してから約 3 ns 後に $n_x = 2$, $n_y = 200$ の磁化ベクトルに変化が観測できる。これは磁化間の相互作用によりスピン波が伝搬するためである。

図 4 に式(3)で表される磁気双極子磁界 \mathbf{H}_D の磁化ベクトル間距離依存性を示す。 \mathbf{H}_D の大きさは磁化ベクトル間距離 r の 3 乗に反比例していることが分かる。

次に \mathbf{H}_D の計算範囲 $|\mathbf{r}_{HD}|$ と計算精度及び計算時間の関係を検討する。 $r < |\mathbf{r}_{HD}|$ の場合は(3)式により \mathbf{H}_D を計算し, $r > |\mathbf{r}_{HD}|$ の場合は $\mathbf{H}_D = 0$ とする。また全ての \mathbf{H}_D を計算した時の $n_x = 2$, $n_y = 200$ の M_x を真値として相対誤差を求める。結果より $|\mathbf{r}_{HD}| = 450 \text{ nm}$ の時, 相対誤差は $5.47 \times 10^{-3} \%$, $|\mathbf{r}_{HD}| = 950 \text{ nm}$ の時, 相対誤差は $6.96 \times 10^{-6} \%$ となる。 $|\mathbf{r}_{HD}|$ を大きくすることで計算精度は向上する。

表 1 に相対誤差と計算時間の関係を示す。有効桁数に対する計算時間は非線形的に増加することが確認できる。

4. まとめ

LLG 方程式を二次のルンゲクッタ法を用いて解き, 磁気双極子磁界の特性を解析した。また \mathbf{H}_D の計算範囲を適切に調節することにより精度を保ちながらより高速な解析を行えることを明らかにした。

5. 謝辞

本研究の一部は, 私立大学戦略的研究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] 井上順一郎, 伊藤博介:スピントロニクス-基礎編-, 日本磁気学会, 2014
- [2] 安田 拓弥, 大貫 進一郎:省電力デバイスの設計に向けたスピン波の数値解析, 電気学会, 2016 第 8 回学生研究発表会, 5-3

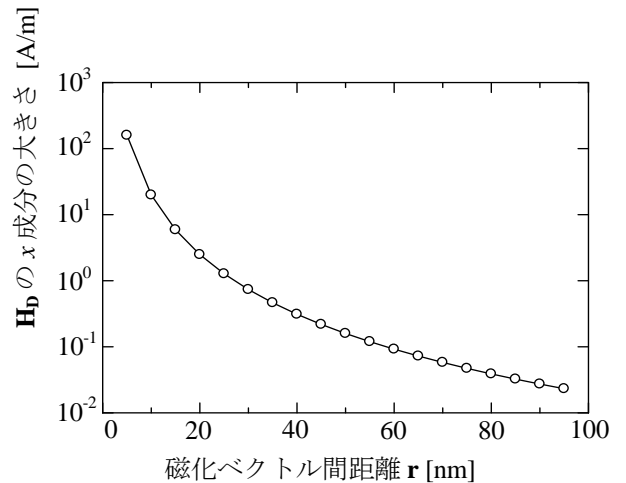


図 4 磁気双極子磁界の磁化ベクトル間距離依存性

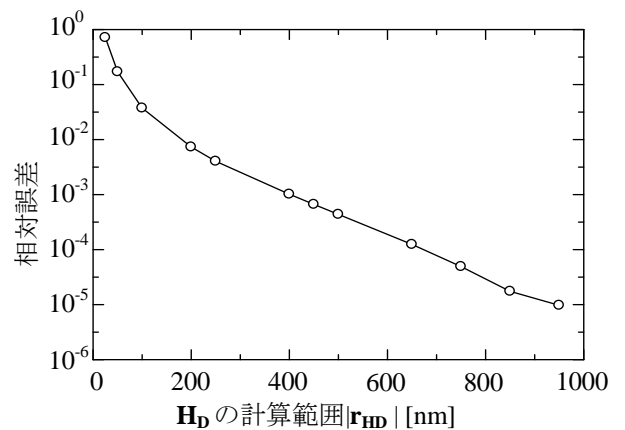


図 5 $|\mathbf{r}_{HD}|$ と相対誤差の関係

表 1 相対誤差と計算時間

相対誤差	計算時間 [s]
10^{-1}	721.40
10^{-2}	1415.3
10^{-3}	2550.8
10^{-4}	3407.0
10^{-5}	3770.0