

固相磁気ナノ粒子の磁化容易軸と高調波磁化特性の関係

松木 優樹*、笹山 瑛由、吉田 敬、圓福 敬二
(九州大学大学院システム情報科学府)

1 はじめに

磁気ナノ粒子からの高調波磁化信号を検出することで、癌等の疾病領域をイメージングする磁気粒子イメージングが注目されている^[1]。筆者らはこれまで、粒子が免疫反応等により検出対象と結合した場合や、細胞中に取り込まれた場合を想定し、磁気ナノ粒子を固定した固相サンプルを対象としてその特性を調べ、より高感度なイメージングを目指してきた。本研究では、固相サンプルの高調波磁化特性に対して磁化容易軸が与える影響を、実験とシミュレーションから調べた。

2 シミュレーション

磁気ナノ粒子が固定された固相サンプルの磁化応答は、粒子内での磁気モーメントの回転によるネール磁気緩和のみによって決まる。励起磁界の時間変化に対して、この緩和時間が十分速い磁気ナノ粒子は磁界に対して応答できる。ここでは簡単のため、この条件を満たす場合の励起磁界に対する磁化応答を考える。

磁気モーメント m の分布密度関数はマクスウェル・ボルツマン分布で表され、励起磁界方向への平均磁化はこれを積分することで得られる^[2]。これを用いて、固相サンプル中の粒子の磁化容易軸方向について以下の 3 種類の場合を想定し、交流励起磁界に対する高調波磁化の数値シミュレーションを行った。

- ① ランダムな場合
- ② 励起磁界に直交する場合
- ③ 励起磁界に平行する場合

なお高調波については、筆者らがイメージングに用いている第三高調波を対象とした。図 1 に $m = 1.5 \times 10^{-18} \text{ Am}^2$ 、飽和磁化 $M_s = 360 \text{ kA/m}$ 、磁気異方性定数 $K = 4.5 \text{ kJ/m}^3$ 、温度 $T = 300 \text{ K}$ とした場合の第三高調波磁化 M_3 の磁界強度依存性を示す。磁化容易軸が磁界と同じ方向に揃うにつれて、第三高調波磁化が大きくなるという結果が得られた。

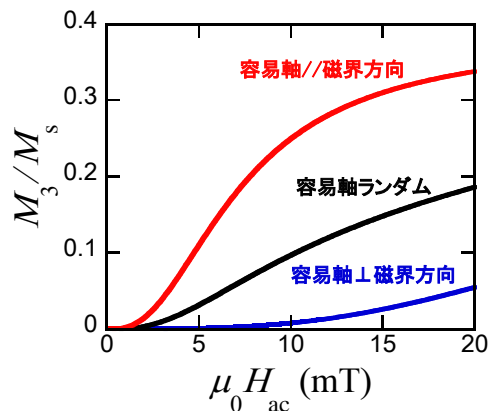


図 1 第三高調波磁化の磁界強度依存性 (シミュレーション結果)

3 実験

磁気ナノ粒子には Resovist (富士フイルム RI ファーマ) を用いた。全てのサンプルは体積 $150 \mu\text{l}$ で、サンプル中の磁気ナノ粒子は $100 \mu\text{g}$ (Fe) とした。サンプルはエポキシ樹脂により固相化することで作製した。磁化容易軸が励起磁界と直交するサンプル、平行するサンプルは、励起磁界方向に対して直交、平行方向に 16 mT の磁場をかけながら固相化することでそれぞれ作製した。

図 2 に励起周波数 $f = 20 \text{ kHz}$ の交流磁界に対する、第三高調波 M_3 の磁界強度依存性を示す。シミュレーションと同様に、磁化容易軸を磁界方向に揃えることでサンプルからの第三高調波が大きくなることを確認された。

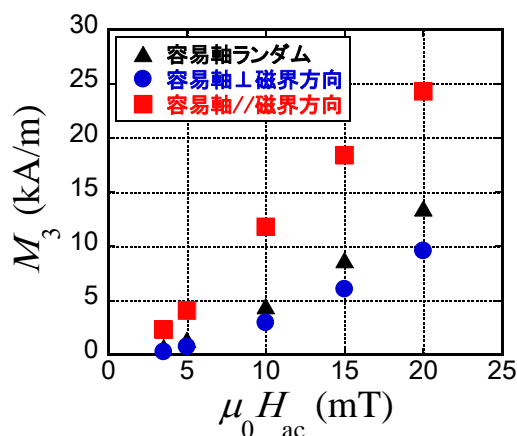


図 2 第三高調波磁化の磁界強度依存性 (実験結果)

4 まとめ

本研究では磁気ナノ粒子を固定した固相サンプルについて、その磁化容易軸と高調波磁化特性の関係について調べた。磁化容易軸を励起磁界の方向に揃えることで、サンプルからの高調波磁化が大きくなることをシミュレーションと実験から確認した。これを応用することで、磁気粒子イメージングの高感度化や装置の小型化が期待できる。

参考文献

- [1] B. Gleich and J. Weizenecker, "Tomographic imaging using the nonlinear response of magnetic particles," *nature*, Vol. 435(2005), pp.1214-1217.
- [2] T. Yoshida, S. Bai, A. Hirokawa, K. Tanabe, K. Enpuku, "Effect of viscosity on harmonic signals from magnetic fluid," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 380(2015), pp. 105-110.