

# 液中磁性ナノ粒子の磁化・容易軸ダイナミクス

大多哲史<sup>1</sup>, トリスナント・スコバグース<sup>2</sup>, 竹村泰司<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>静岡大学, <sup>2</sup>横浜国立大学)

Dynamics of magnetization and easy-axis of magnetic nanoparticles dispersed in liquid

S. Ota<sup>1</sup>, S. B. Trisnanto<sup>2</sup>, Y. Takemura<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Shizuoka University, <sup>2</sup>Yokohama National University)

## はじめに

ハイパーサーミアや磁気粒子イメージング(MPI)において、交流磁場に対する磁化ダイナミクスの解明が必要不可欠である。特に血中などの液中においては粒子（磁化容易軸）の回転も重要である。ネール緩和時間 $\tau_N$ とブラウン緩和時間 $\tau_B$ によって、 $1/\tau = 1/\tau_N + 1/\tau_B$ と表される実効的緩和時間 $\tau$ の理論に従うと、 $\tau_B \gg \tau_N$ において磁化回転に比べて遅い容易軸回転は実質的に生じない<sup>1)</sup>。しかし、我々は $\tau_B \gg \tau_N$ の条件下で、容易軸回転を観測するという実効的緩和時間の理論では説明できない現象<sup>2)</sup>を実験的に確認した<sup>3)</sup>。本研究では、磁化及び容易軸のダイナミクスを磁化曲線による定常的な応答とパルス磁場を用いた過渡的な応答の計測により初めて解明し、さらに数値解析により計測結果を裏付けると共に各粒子一つの応答を観測した。

## 実験方法・結果

超常磁性のマグヘマイト粒子（フェルカルボトラン）について、水中に分散させた液中試料と、寒天により容易軸回転を固定した固体試料を用意した。Figure 1 に液中試料と固体試料の磁化信号の差分を容易軸回転を表した磁化曲線として示した<sup>4)</sup>。差分磁化曲線の残留磁化はゼロであり、これはゼロ磁場において液中試料と固体試料の磁化が同一であることを示している。特に 0.2 kHz というネール緩和時間、ブラウン緩和時間と比較して低周波条件では、容易軸回転が磁化回転に追従し、磁化が完全に緩和するゼロ磁場において、容易軸も完全に緩和したと考えられる。磁化に追従した容易軸回転は数値計算でも示されている<sup>5)</sup>。高磁場では、差分磁化曲線がヒステリシスを示した。これは磁場増加過程（磁化配向過程）と磁場減少過程（磁化緩和過程）で固体試料に対する液中試料のエネルギー状態が異なることを示している。磁化の配向・緩和過程において、容易軸も配向・緩和することにより、固体試料に比べて液中試料の方が磁化回転が促進する。Figure 2 のようにパルス磁場を印加した際に、磁場の立ち上がりに伴う磁化増加に加えて、静磁場状態においても磁化の増加を確認した<sup>6)</sup>。これは最初に磁化のみが磁場増加に伴って回転して、磁化に遅れて容易軸が回転する過渡的な応答を示しており、特にコア粒径の大きな粒子で顕著である。発表では、数値解析によって各粒子一つの配向状態に注目した結果も示す。

## 謝辞

本研究の一部は、科研費 15H05764、17H03275、17K14693 の助成を受けて実施した。

## 参考文献

- 1) R. E. Rosensweig, *J. Magn. Magn. Mater.*, **252**, 370 (2002).
- 2) H. Mamiya and B. Jayadevan, *Sci. Rep.*, **1**, 157 (2011).
- 3) S. Ota, T. Yamada, and Y. Takemura, *J. Appl. Phys.*, **117**, 17D713 (2015).
- 4) S. Ota and Y. Takemura, *Appl. Phys. Express*, **10**, 085001 (2017).
- 5) T. Yoshida, S. Bai, A. Hirokawa, K. Tanabe, and K. Enpuku, *J. Magn. Magn. Mater.*, **380**, 105 (2015).
- 6) S. B. Trisnanto, S. Ota, and Y. Takemura, *Appl. Phys. Express*, **11**, in print (2018).

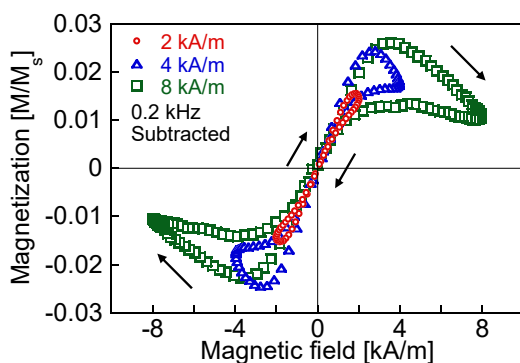


Fig. 1 AC magnetization curves in solid sample subtracted from those in liquid sample for Ferucarbotran<sup>4)</sup>.

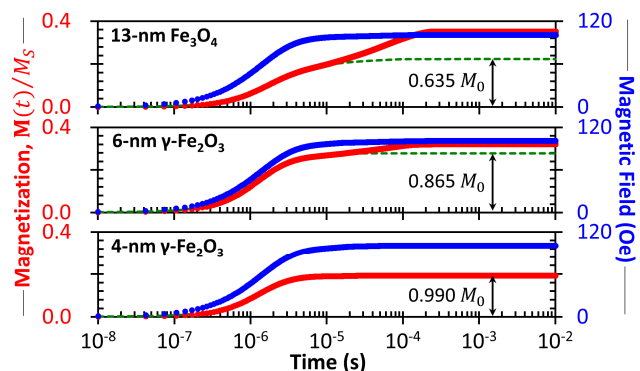


Fig. 2 Temporal magnetization response in applying pulse field with respect to magnetic nanoparticles of different core sizes<sup>6)</sup>.