

# パルス磁場を用いた磁性ナノ粒子の ネール緩和とブラウン緩和過程の重畳観測

大多哲史<sup>1</sup>, 竹村泰司<sup>2</sup>

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

Superposition of Néel and Brownian relaxations of magnetic nanoparticles in applying pulse field

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

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

## はじめに

磁性ナノ粒子のハイパーサーミアや磁気粒子イメージング(Magnetic particle imaging: MPI)といった医療応用を考える際に、磁気緩和をはじめとする磁化ダイナミクスを解明は必要不可欠である。著者らはネール緩和とブラウン緩和の重畳を交流磁化曲線計測及び、パルス磁場を印加することによる二段階の磁化上昇を実験的に観測することで、Rosensweigの示した実効的緩和時間 $\tau_{\text{eff}}$ がネール緩和時間 $\tau_N$ とブラウン緩和時間 $\tau_B$ の逆数の和 $1/\tau_{\text{eff}} = 1/\tau_N + 1/\tau_B$ で表されるとした理論<sup>1)</sup>では、表現できない磁気緩和現象を解明した<sup>2,3)</sup>。また数値シミュレーションにおいても、磁気緩和の重畳は観測されている<sup>4)</sup>。本研究では、ネール緩和時間以下の高速で応答するパルス磁場を用いて、磁化の線形応答領域の磁場強度におけるネール緩和とブラウン緩和が重畳した磁化応答を観測し、2つの緩和過程を分離した解析を行った。

## 実験方法・結果

純水中に分散した $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ナノ粒子を試料として、立ち上がり時間は18 ns、磁場強度は384 A/mのパルス磁場を印加した。粒子体積濃度は1.24 v/v%とした。実効的磁化応答 $M_{\text{eff}}(t)$ は、以下の式で表すことができる。

$$M_{\text{eff}}(t) = M_N(t) + M_B(t) = M_{N,\text{max}} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_N}\right) \right\} + M_{B,\text{max}} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_B}\right) \right\} \quad (1)$$

ここで、ネール過程 $M_N(t)$ とブラウン過程 $M_B(t)$ の最大磁化をそれぞれ $M_{N,\text{max}}$ ,  $M_{B,\text{max}}$ としたときに、コア粒径 $d_c$ 、実効的磁気異方性 $K_u$ 、流体力学的粒径 $d_H$ 、 $M_{N,\text{max}}$ に対する $M_{B,\text{max}}$ の比率 $M_{B,\text{max}}/M_{N,\text{max}}$ を見積もった。緩和時間は、 $\tau_N = \tau_0 \exp(K_u V_M / k_B T)$ 及び $\tau_B = 3\eta V_H / k_B T$ として、ここで $\tau_0$ は磁気回転に関わる試行時間、 $V_M$ はコア粒子の体積、 $k_B$ はボルツマン定数、 $T$ は温度、 $\eta$ は溶媒粘度、 $V_H$ は流体力学的体積である。

Figure 1に計測した磁化 $M_{\text{exp}}$ と、計算値である $M_{\text{eff}}(t)$ ,  $M_N(t)$ ,  $M_B(t)$ を示した。実測では、ネール過程の後にブラウン過程が続く二段階の緩和過程が明瞭に観測された。式(1)を用いた計算では、粒径分布を考慮することで良好な実験値へのフィッティングを行えた。最小二乗法により見積もった計算に用いたパラメータは、 $d_c = 11.9 \pm 2.0$  nm,  $K_u = 18$  kJ/m<sup>3</sup>,  $d_H = 40 \pm 11$  nm,  $M_{B,\text{max}}/M_{N,\text{max}} = 3.7$ であった。以上より、式(1)のようなネール緩和とブラウン緩和の重畳は2つの磁化過程の和として表されることを実験的に確認した。本研究では、さらに2つの緩和過程の支配度である $M_{B,\text{max}}/M_{N,\text{max}}$ と緩和時間の関係性についても、粒子濃度を変えた試料について計測を行うことで、双極子相互作用の磁気緩和への影響を合わせて解析した。

## 謝辞

本研究の一部は、双葉電子記念財団、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) S. Ota, T. Yamada, and Y. Takemura, *J. Appl. Phys.*, **117**, 17D713 (2015).
- 3) S. B. Trisnanto, S. Ota, and Y. Takemura, *Appl. Phys. Express*, **11**, 075001 (2017).
- 4) H. Mamiya and B. Jayadevan, *Sci. Rep.*, **1**, 157 (2011).

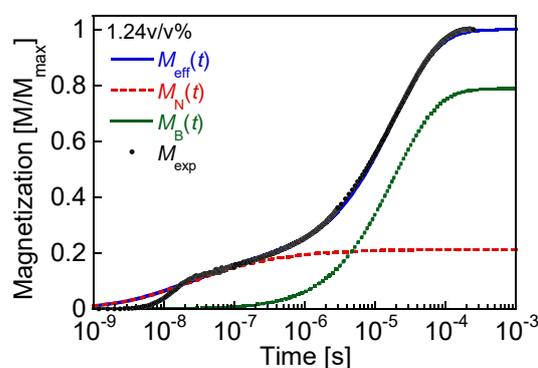


Fig. 1 Experimental magnetization  $M_{\text{exp}}$ , and calculated values of effective magnetization  $M_{\text{eff}}(t)$ , Néel relaxation regime  $M_N(t)$ , and Brownian relaxation regime  $M_B(t)$ .