

## 磁性ナノ粒子の交流ヒステリシス測定と磁気損失

大多 哲史、山田 努、竹村 泰司  
(横浜国立大学)

Measurement of AC hysteresis curves of magnetic nanoparticles and their magnetic loss

Satoshi Ota, Tsutomu Yamada and Yasushi Takemura  
(Yokohama National University)

### はじめに

磁性ナノ粒子は、交流磁場中において磁気損失に相当する発熱を生じるために、ハイパーサーミア（がん温熱治療）の発熱体としての応用が期待されている。がん細胞にのみ存在する抗原と特異的に反応する抗体を結合させるなど、磁性ナノ粒子の表面修飾により生体機能を付与させることも可能である。現状の課題としては、(1) 高い発熱を生じる磁性ナノ粒子の作製、(2) 印加磁場強度・周波数の最適化、(3) 腫瘍部への磁性ナノ粒子の集積、に大別される。(2)については、より大きな強度と高い周波数、即ち高いエネルギーをもって磁性ナノ粒子を励磁することに越したことはないが、コイルの設計上、かなりの制限を受ける。人体深部に 100 kHz オーダーの高周波磁場を到達させるためのコイルは、低インピーダンス化、発熱の抑制と冷却などをクリアしなくてはならない。(1)の磁性ナノ粒子の作製においても、そもそも(2)の最適な磁場条件下での磁気特性を前提にしないといけない。本講演では、種々の磁性ナノ粒子の交流磁化率及び交流ヒステリシスの測定から、磁気損失やその溶媒中濃度依存などを評価し、現実的に磁性ナノ粒子がどの程度の発熱をもたらすか定量的に考察した結果を報告する。

### 実験方法・結果

高周波磁場下での磁性ナノ粒子の損失や発熱を評価する手段には、発熱温度の測定 (caloric measurement) や交流磁化率の実部・虚部の測定などがある。温度測定からは、SLP (specific loss power) という指標が、単位 [W/g]をもって算出される。SLP は、磁場強度  $H$  及び周波数  $f$  に依存するものの、実際に得られる発熱量を評価できることが特徴である。ILP (intrinsic loss power) は、SLP を  $H^2 \cdot f$  で規格化した値であり、励磁条件に依存しない材料本来の発熱指標と考えられる。

温度測定から求める SLP は、試料及びその周辺部の環境、磁気特性の濃度依存など留意すべき事項が多い。そこで我々は、交流ヒステリシス曲線から SLP や ILP を算出することを提案している。測定対象となる試料の重量に依存することなく、Fig.1 に示すように飽和磁化  $M_s$  で規格化することにより、SLP や ILP が算出可能であり、またヒステリシスの形状からは磁性ナノ粒子の特徴、振る舞いが考察できる、などの利点がある。

Fig.1 は、振幅 50 Oe で測定した Resovist<sup>®</sup> のマイナーループである<sup>1)</sup>。VSM で測定した DC マイナーループから、試料が超常磁性を示し、ヒステリシス損失がないことが確認される。交流磁場に対しては、磁性ナノ粒子の磁気モーメントの回転が印加磁場に対して遅れるために、10 kHz においてもヒステリシスを示す。周波数を増加させると、磁気モーメントの回転が印加磁場方向に追従できなくなり、見かけの保磁力は増加し、50 Oe 印加時の磁化の印加磁場成分は減少することが明瞭に観測される。周波数依存からは、Néel 緩和と Brownian 緩和の分離が可能である。SLP、ILP の算定と評価、磁性ナノ粒子の濃度依存などの詳細を当日発表する。

### 参考文献

- 1) Nakamura *et al.*, *IEEE Trans. Magn.* **49**, 240, 2013.

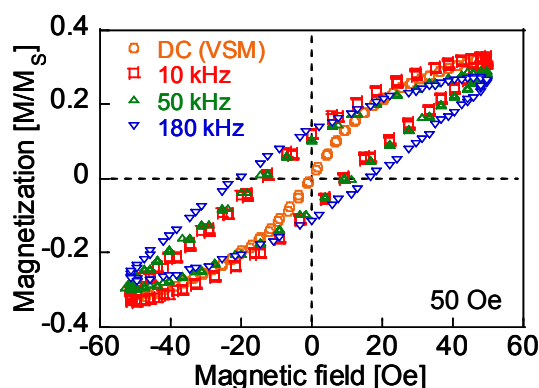


Fig. 1 Dc and ac minor hysteresis loops of Resovist<sup>®</sup> ( $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) measured under magnetic field of 50 Oe.