

磁気ナノ粒子体積分布の混合対数正規分布によるモデル化

笹山 瑛由、吉田 敬、圓福 敬二
(九州大学)

Modeling of Volume Distribution of Magnetic Nanoparticles by a Mixture of Log-normal Distributions
Teruyoshi Sasayama, Takashi Yoshida, Keiji Enpuku
(Kyushu University)

1. はじめに

磁気マーカーイメージングや磁氣的ハイパーサーミア等に磁気マーカーが幅広く用いられている。磁気マーカーを用いる際には、その磁気特性を正確に把握する必要がある。一方、磁気マーカーは磁気ナノ粒子の凝集体からなるが、その凝集の程度は一様でないため、磁気マーカーの磁気ナノ粒子の体積は分布する。

代表的な磁気マーカーである Resovist の磁気ナノ粒子の体積分布を、2 つの混合対数正規分布でモデル化する報告¹⁾があるが、その妥当性については十分検証されていなかった。一方、この体積分布を磁気マーカーの $M-H$ カーブより分析する方法として、特異値分解法 (SVD 法) を用いた分析方法²⁾が提案されている。そこで本稿では、SVD 法によって得られた体積分布が混合対数正規分布でモデル化できるか否かについて検証する。

2. 方法

磁気ナノ粒子の直径 d_c に対する体積分布が、次式のような混合対数正規分布に従うとモデル化する。

$$n_c(d_c)V_c = \sum_{k=1}^K w_k \text{LN}(d_c; \mu_k, \sigma_k^2) \quad \text{where } \text{LN}(d_c; \mu_k, \sigma_k^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_k d_c} \exp\left[-\frac{(\ln d_c - \mu_k)^2}{2\sigma_k^2}\right]$$

ここで、 $n_c(d_c)$ および V_c はそれぞれ磁気ナノ粒子の直径が d_c の粒子数および一個当たりの体積、 K は体積分布のピーク数、 w_k は重み、 $\text{LN}(d_c; \mu_k, \sigma_k)$ は対数正規分布であり、 d_c の対数を取ったときに平均値 μ_k 、標準偏差 σ_k の正規分布に従う。この分布と SVD 法によって得られた体積分布との差の二乗和を最小とする最適化問題を解くことで w_k および σ_k を求めた。なお、 μ_k は SVD 法によって得られる体積分布においてピーク値を取る d_c より算出した。

また本稿では、SVD 法の適用前に $M-H$ カーブの磁気飽和部分の傾きを差分することで計測誤差を抑制した。

3. 結果

図 1 に SVD 法による磁気ナノ粒子体積分布の結果と、混合対数正規分布でモデル化した結果を示す。SVD 法によって得られた体積分布において、 d_c が 5.0 nm と 18.9 nm でピークが見られた。それぞれのピークに対応する対数正規分布の標準偏差は各々 3.8×10^{-1} 、 4.6×10^{-1} であった。図 1 の結果より、体積分布は 2 つの対数正規分布の混合分布に従っていると言える。この結果より、Resovist の磁気ナノ粒子の体積分布を 2 つの対数正規分布の混合分布でモデル化した他の報告¹⁾を裏付ける結果が得られた。

参考文献

- 1) D. Eberbeck, F. Wiekhorst, S. Wagner, and L. Trahms, Applied Physics Letters 98, 182502 (2011)
- 2) T. Yoshida, N. B. Othman., T. Tsubaki, J. Takamiya, and K. Enpuku, IEEE Trans. Magn. 48, 3788 (2012)

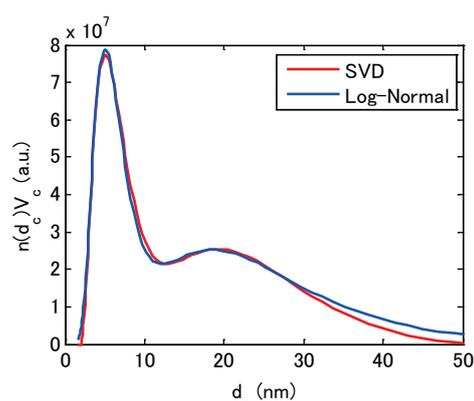


Fig 1. Volume distributions of the magnetic nanoparticles and the fitting of a mixture of log-normal distributions.