

マイクロ波アシスト磁化反転における熱活性の影響

水谷聡志^{1,2}、菊池伸明²、畑山正寿^{2,3}、島津武仁³、岡本聡^{2,4}

(¹東北大工、²東北大多元研、³東北大学際研、⁴東北大 CSIS)

The effect of thermal activation on microwave assisted magnetization switching

S. Mizutani^{1,2}, N. Kikuchi², M. Hatayama^{2,3}, T. Shimatsu³, S. Okamoto^{2,4}

(¹Eng. Dept. Tohoku Univ., ²IMRAM Tohoku Univ., ³FRIS Tohoku Univ., ⁴CSIS Tohoku Univ.)

はじめに

マイクロ波アシスト磁化反転 (Microwave assisted magnetization switching : MAS) においては, GHz 帯のマイクロ波磁場により磁化の歳差運動を励起して反転磁場を低減させる. その反転磁場はマイクロ波磁場周波数に比例して低減し, 臨界周波数においてアシスト効果が消失する. MAS における実効的なエネルギー障壁高さは, 直流磁場やマイクロ波磁場の周波数・振幅によって複雑に変化する^{1,2}. 本研究では, Co/Pt 多層膜ナノドットアレイを用いて様々な条件で MAS の際の緩和時間を測定することで MAS への熱活性の影響について調べた.

実験方法

試料は, 熱伝導率の高い Si 基板上にマイクロ波磁場印加用の高周波線路を作製し³, その上に絶縁層を介して異常ホール効果測定用の電極層及び Co/Pt ドットアレイを作製した. ドット直径は $d = 70, 200$ nm とした. MAS 実験は電磁石により膜面垂直方向に直流磁場, 面内方向にマイクロ波磁場を印加し, 異常ホール効果により磁化状態を検出した. マイクロ波磁場は幅 $t_{\text{pulse}} = 20$ ns, 周期 $t_{\text{period}} = 2 \times 10^{-8} - 2 \times 10^{-1}$ s のパルス波として印加した.

実験結果

Fig.1 に直径 $d = 70$ nm の Co/Pt ドットアレイの保磁力のマイクロ波周波数依存性を実効緩和時間 $t_{\text{eff}} = 10^{-6} - 10$ s について示す. マイクロ波磁場振幅は $\mu_0 h_{\text{rf}} = 38$ mT である. 実効緩和時間 t_{eff} は測定時間中にマイクロ波磁場を印加した時間とし, $t_{\text{eff}} = 10 \times (t_{\text{pulse}}/t_{\text{period}})$ と定義した. いずれの t_{eff} においても周波数の増加に伴って保磁力が低減し, 明確なアシスト効果が得られた. 周波数に対する保磁力低下の傾きには t_{eff} に対して大きな変化は見られない. 同じ周波数で比べると t_{eff} の増加に伴い保磁力は低減し, 臨界周波数は高周波側へとシフトした. Fig.2 に異方性磁場 H_k および共鳴周波数 $2\pi/|\gamma|$ で規格化した直流磁場 H_{dc} , マイクロ波磁場周波数 f_{rf} に対して計算した実効的なエネルギー障壁高さ $\Delta E/E_0$ を示す. マイクロ波磁場振幅は $H_{\text{rf}}/H_k = 1.8 \times 10^{-2}$ である. エネルギー障壁高さ $\Delta E/E_0$ と緩和時間 t_{eff} は 1 対 1 に対応する. そのため, Fig.1 中の t_{eff} を一定として測定した結果は $\Delta E/E_0$ の等高線を実験的に求めていることに相当し, t_{eff} の増加に伴う保磁力の低減と臨界周波数の高周波化は熱揺らぎによって説明できることが分かる.

謝辞 本研究の一部は ASRC の支援を受けて行われた.

参考文献

- 1) H. Suto et al., Phys. Rev. B. **91**, 094401 (2015).
- 2) N. Kikuchi et al., Phys. Rev. B **105**, 054430 (2022).
- 3) N. Kikuchi et al., J. Appl. Phys. **126**, 083908 (2019).

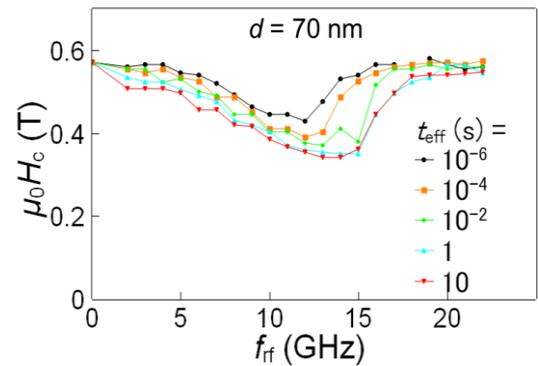


Fig. 1 Microwave field frequency f_{rf} dependence of coercivity of Co/Pt nanodot array with diameter $d = 70$ nm for $t_{\text{eff}} = 10^{-6} - 10$ s.

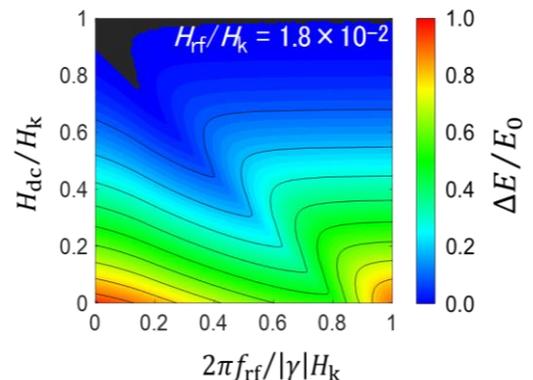


Fig. 2 The calculated effective energy barrier height $\Delta E/E_0$ as functions of microwave field frequency $2\pi f_{\text{rf}}/|\gamma|H_k$ and dc field H_{dc}/H_k for microwave field amplitude $H_{\text{rf}}/H_k = 1.8 \times 10^{-2}$.

磁性膜厚のマイクロ波アシスト磁化反転挙動への影響

菊池伸明¹、佐藤勝成¹、畑山正寿^{1,2}、島津武仁^{2,3}、岡本聡^{1,4}
 (1) 東北大多元研、(2) 東北大学際研、(3) 東北大通研、(4) 東北大 CSIS)

Effect of film thickness on microwave assisted switching behavior

N. Kikuchi¹, K. Sato¹, M. Hatayama^{1,2}, T. Shimatsu³, S. Okamoto^{1,4}

(¹IMRAM Tohoku Univ., ²FRIS Tohoku Univ., ³RIEC Tohoku Univ., ⁴CSIS Tohoku Univ.)

はじめに

マイクロ波アシスト磁化反転 (Microwave Assisted Switching: MAS) は超高密度磁気記録を実現する技術として期待されている。すでにドライブとしての研究も進められている一方で、特にグラニューラー媒体での実験での報告は少なく膜構造の影響などについて未解明な点も多い。我々のグループではこれまでに、膜厚 15 nm の CoCrPt-SiO₂ グラニューラー薄膜において MAS 実験を行い、そのマイクロ波磁場振幅や周波数依存性は熱揺らぎを考慮することにより説明できることを報告している[1]。今回は、膜厚の異なる試料を用いて MAS 実験を行い、熱揺らぎの影響を調べることにした。

実験方法と結果

ノンドープの Si ウェハ上幅 1 μm のマイクロ波磁場印加用 Au 線路を作製し、厚さ 100 nm の SiO_x 絶縁層を形成した。その上に下地層・保護層とともに CoCrPt-30vol.%SiO₂(*t*) グラニューラー磁性膜を製膜した。*t* は膜厚で 10 および 15 nm である。Au 線路上の磁性膜を、電子線リソグラフィおよび Ar イオンエッチングにより長さ 3 μm、幅 0.6 μm の矩形状に加工した。その後、下地層を磁気特性評価のための異常 Hall 効果 (AHE) 測定用の電極形状に加工した。磁化曲線の測定は膜面に垂直な磁場を印加して行い、マイクロ波磁場は、Au 線路に GHz 帯の高周波電流を流すことにより膜面内に発生させた。

Fig. 1 にマイクロ波磁場を印加しない場合と、マイクロ波磁場振幅 $\mu_0 h_{rf} = 48 \text{ mT}$ 、周波数 $f_{rf} = 25 \text{ GHz}$ において測定した AHE 曲線を示す。膜厚は (a) 10 nm、(b) 15 nm であり、磁場の掃引方向が $- \rightarrow +$ の曲線だけを表示してある。マイクロ波磁場を印加しない場合の保磁力は $t = 10 \text{ nm}$ の試料で低下しているが、磁気異方性定数には大きな差がなく熱揺らぎの影響が主である。いずれの試料においても明瞭なマイクロ波によるアシスト効果が見えているが、この周波数においては、 $t = 10 \text{ nm}$ の試料の方がより大きなアシスト効果が得られ 0.2 T にも達する。Fig. 2 にこれらの試料の保磁力のマイクロ波磁場周波数依存性を示した。マイクロ波磁場振幅は $\mu_0 h_{rf} = 48 \text{ mT}$ で一定である。いずれの試料でも低周波領域ではマイクロ波磁場の周波数に伴いほぼ線形に保磁力が低下したが、その傾きは試料による差異は見られない。いずれの試料でも $f_{rf} = 20 \text{ GHz}$ 以上では周波数に対する反転磁場の低下が緩やかになるが、 $t = 10 \text{ nm}$ の試料の方がより高周波までアシスト効果が持続している。これらの挙動は、マイクロ波磁場下でのエネルギー障壁の計算結果から予測されるもので説明できる[1, 2]。

参考文献

[1] N. Kikuchi et al., Phys. Rev. B 105, 054430 (2022).

[2] H. Suto et al., Phys. Rev. B. 91, 094401 (2015).

謝辞 本研究の一部は ASRC の支援を受けて行われた。

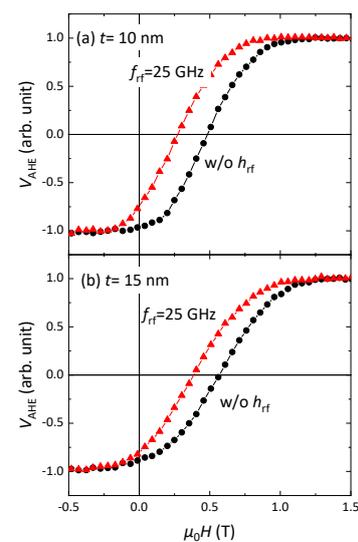


Fig. 1 AHE curves of CoCrPt-SiO₂ media measured without and with microwave field of $f_{rf} = 25 \text{ GHz}$ and $\mu_0 h_{rf} = 48 \text{ mT}$.

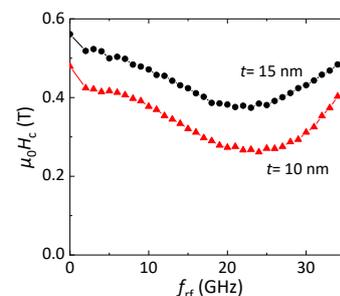


Fig. 2 Coercivity of CoCrPt-SiO₂ media as a function of microwave field frequency. ($\mu_0 h_{rf} = 48 \text{ mT}$.)

近似計算手法を用いたマイクロ波アシスト磁化反転磁界の推定

川上高輝¹, 牙暁瑞², 田中輝光¹

(¹九州大学大学院システム情報科学府, ²九州大学マス・フォア・インダストリ研究所)

Estimation of microwave-assisted magnetization switching field by energy approximation

K. Kawakami¹, X. Ya², and T. Tanaka¹

(¹ISEE Kyushu University, ²IMI Kyushu University)

はじめに

近年、磁気記録の分野において超高密度記録を実現する記録方式の一つとしてマイクロ波アシスト磁気記録(MAMR)が注目されている¹⁾。直流磁界の印加方向が磁化容易軸に反平行の場合、マイクロ波のアシスト効果は理論的に定式化されており^{2,3)}、磁化容易軸方向に大きさ $\omega/\gamma H_k$ の磁界が印加されること等価であることが知られている。一方で、直流磁界の印加方向が磁化容易軸に非平行の場合、マイクロ波アシスト磁化反転(MAS)の解析的な推定は困難であり、磁化反転閾磁界 h_{sw} のような磁化反転条件は定式化されていないためマイクロマグネティックシミュレーションを用いる必要がある。本研究では直流磁界の印加方向が磁化容易軸に非平行な場合の h_{sw} を近似的に推定した。

近似計算手法

本研究における磁化および磁界の近似モデルを Fig. 1 に示す。磁化容易軸は z 軸方向で直流磁界 h_{DC} は z 軸に対して θ の角度で印加され、円偏波交流磁界 h_{AC} は面内方向に角周波数 ω で印加されると仮定する。なお、各磁界は異方性磁界 H_k で規格されている。 φ は磁化の z 軸に対する歳差運動軸の傾き角を示し、 φ_1, φ_2 は磁化の x 成分がそれぞれ最大・最小をとるときの z 軸に対する磁化の傾き角を示す。我々の先行研究から本モデルにおける x 方向、 z 方向の各磁界成分(h_x, h_z)は Eqs. (1)で近似的に表され、 $h_{DC} = h_{sw}$ のとき、アステロイド曲線 Eq. (2)におおよそ一致する。

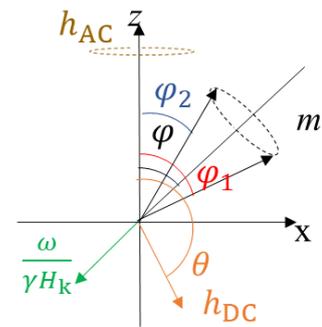


Fig. 1. Schematic of the equivalent field

$$h_x = h_{DC} \sin \theta - \frac{\omega}{H_k \gamma} \sin \varphi + h_{AC}, h_z = h_{DC} \cos \theta - \frac{\omega}{H_k \gamma} \cos \varphi \quad \text{Eqs. (1)}$$

$$h_x^2 + h_z^2 = 1 \quad \text{Eq. (2)}$$

上式を用いて h_{sw} を近似的に求めた。 φ は φ_1 と φ_2 の平均値として近似的に取り扱った。なお、 φ_1 および φ_2 は実効磁界を考慮したエネルギー平衡条件($\partial E/\partial \varphi_{1,2}=0$)から推定される。なお E は $\omega/\gamma H_k$ を考慮したゼーマンエネルギーと異方性エネルギーの和を示す。

近似計算手法

本近似手法とマイクロマグネティックシミュレーションそれぞれから得られる h_{sw} のマイクロ波周波数依存性を Fig. 2 に示す。 h_{AC} は $h_{AC} = 0.05$ とした。このときの近似計算値とマイクロマグネティックシミュレーションの結果との差は最大で約 2%程である。

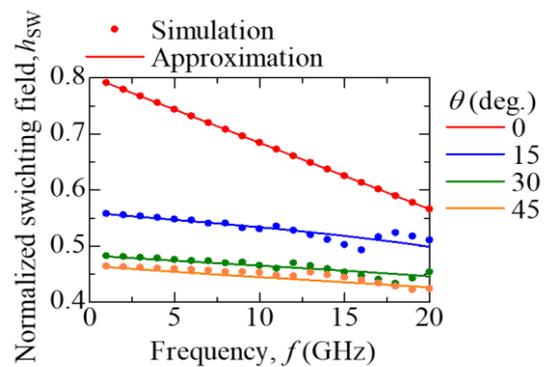


Fig. 2 Comparison between approximation and micromagnetic simulations.

参考文献

- 1) Jian-Gang Zhu, et al., IEEE Trans. Magn., Vol. 44, pp.125-131 (2008).
- 2) G. Bertotti, et al., Phys. Rev. Lett., Vol. 86-4, pp. 724-727 (2001).
- 3) S. Okamoto, et al., J. Appl. Phys., Vol. 107, 123914 (2010).

3次元熱アシスト磁気記録方式における記録層の膜厚と層間のスペーシングの検討

前田航弥、赤城文字

(工学院大学 大学院 工学研究科 電気・電子工学専攻)

Study of thicknesses of recording layers and spacing between them for 3D heat-assisted magnetic recording

K. Maeda, and F. Akagi

(Graduate School of Electrical Engineering and Electronics, Kogakuin Univ.)

はじめに

近年、磁気ディスク装置では、テラビット級の高記録密度化のために、熱アシスト磁気記録 (heat assisted magnetic recording: HAMR)方式の研究・開発が進んでいる。また、HAMR とビットパターン媒体 (bit-patterned media : BPM)を組み合わせた heated-dot magnetic recording : HDMRが 5-10 Tb/in²の記録密度を達成できるとして提案されている。しかし、ドットサイズの超常磁性限界を考慮すると新たな記録方法が必要になる。本研究では、記録層を二層に増やした 3次元熱アシスト磁気記録 (3D HAMR)方式の検討を行っている[1]。本報告では、記録層の膜厚、及び記録層間のスペーシングと記録特性との関係について記録層間に働く静磁界に着目して検討を行った。

計算方法及び計算モデル

3D HAMR の記録過程は、Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG)方程式を解いて求めた。媒体モデルは、ドット径 8 nm の円柱の磁性ドットが、ドット間隔 16 nm で規則的に並んでいると仮定した。上層ドットの膜厚は 4 nm、下層ドットの膜厚は 3 nm とした。上層のキュリー温度を 550 K、下層のキュリー温度を 650 K とした。記録は、DC イレーズ後まず下層に 1,0 の記録を行い、その後上層に 0,1 の記録を行った。記録の評価はビットエラーレート (BER) (記録トラックエラードット数 / 記録トラックの総ドット数) × 100 % を用いた。

計算結果

図 1 は、スペーシング 3 nm において、下層を上昇温度 250 K で記録した後、上層の記録を行った時の BER である。これより、上層の BER は上昇温度 170 から 175 K で 0% となったが、下層は 150 K を超えると温度上昇とともに増大した。図 2 は、下層の熱揺らぎのみを除去して上層の記録を行った結果である。これより、下層の BER は全ての条件で 0% となったことから、下層 BER はキュリー温度より低温でも熱揺らぎの影響を受けることがわかった。上下層間の静磁界との関係については発表当日報告する。

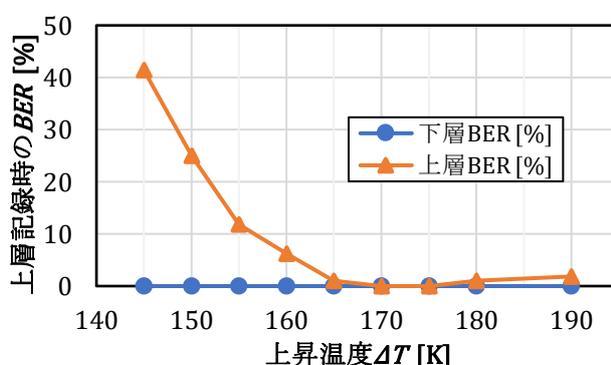
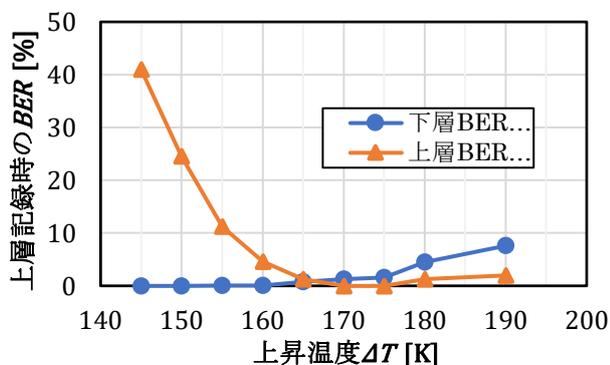


図 1. 上層記録後の BER の上昇温度依存性

図 2. 下層の熱揺らぎを除去した時の BER の上昇温度依存性

謝辞：本研究で用いたプログラムは(株)日立製作所から貸与されております。

参考文献

- 1) F. Akagi, Y. Sakamoto, and N. Matsushima, 2021 IEEE International Magnetic Conference, (2021) pp. 1-5.

U-Net image segmentation for statistical analysis of granular FePt recording media and automated dataset generation

N. Kulesh, A. Bolyachkin, I. Suzuki, Y. K. Takahashi, and H. Sepehri-Amin
National Institute for Materials Science, Tsukuba 305-0047, Japan

Progress in the development of next-generation heat assisted magnetic recording (HAMR) media strongly depends on the optimization of existing processing technology for further decrease of grain sizes while maintaining a large coercivity in FePt granular media. Thus, current target areal density of 4 Tb/in² requires L1₀-FePt granular media with an average grain size of 4-5 nm with standard deviation (SD) below 15 %^{1,2}. These requirements imply the precise and fast analysis of microstructural data; *e. g.* transmission electron microscopy (TEM) images. In this work, we propose an automated method combining segmentation using convolutional neural network with the U-Net architecture and computer vision algorithms for fast acquisition of all relevant statistical information from TEM images. We demonstrate that the workflow capable of processing an arbitrary number of images in a highly uniform way can be useful for generating a high-quality dataset for further analysis by machine learning algorithms. As proof of concept, we considered a series of FePt-C granular films for which a dataset was generated, combined with sputtering conditions and magnetic properties, and analyzed by machine learning.

Samples of FePt-C granular films were deposited in several stages onto MgO(001) substrates by magnetron sputtering at elevated temperatures. The U-Net model was built using Keras and TensorFlow Python libraries and was trained using 1200 images and corresponding manually segmented masks obtained by cutting 10 TEM images acquired on the area of 300 × 300 nm². The U-Net model was further used for automatic segmentation of 70 large TEM images (sample image with recognized grains marked with colors is shown in Fig. 1 a). The obtained binarized images were used for measuring area of each grain, estimating diameter, distance to the center of the nearest grain, and roundness parameter. As a result, average values of each parameter together with SDs were extracted. In Fig. 1 b, a comparison of the two histograms of grain diameters obtained from manually and automatically segmented images are shown. Using the automatically generated dataset, simple regressor models for predicting coercivity and microstructural parameters were built and used for finding an optimal set of sputtering conditions leading to the desired combination of coercivity and grain size. The proposed approach can be useful for fast and unbiased microstructure analysis of FePt granular media. At the end of the talk, we will discuss how machine learning assisted microstructure analysis can be beneficial for optimization of the processing parameters toward realization of desired microstructure in the L1₀-FePt granular media for HDDs with an areal density of 4 Tb/in².

References

- 1) D. Weller et al. IEEE Trans. Magn. 50 (2014) 3100108
- 2) K. Hono *et al.* MRS Bull. 43 (2018) 93-99

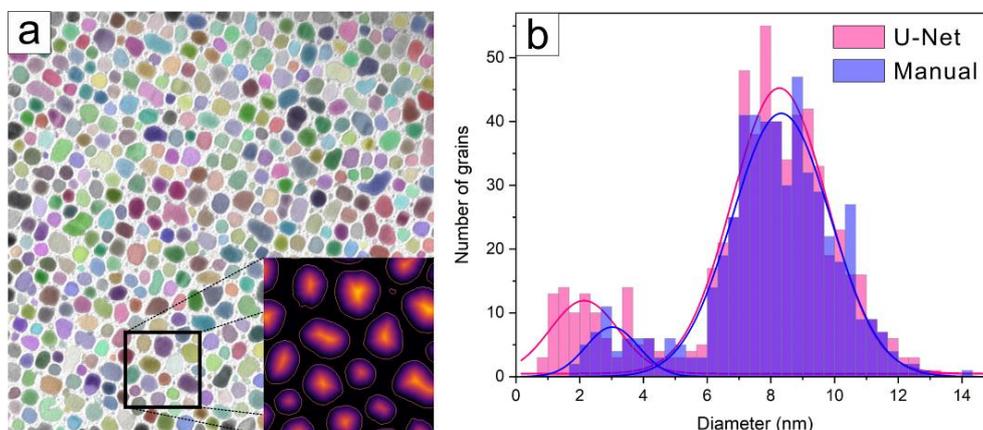


Figure 1 (a) TEM image with recognized grains highlighted with colors. The inset shows Euclidian distance map used for estimating distances between centers of neighboring grains. (b) Distributions of estimated grain's diameters extracted from TEM images segmented manually and by the U-Net model.

単位胞解析による L1₀ 型 FePt 基薄膜中の 磁性結晶粒への軽元素固溶の評価

○岩動 大樹¹, 田中 元人¹, 齊藤 節¹, タム キム コング², 小川 智之¹, 齊藤 伸¹

(1. 東北大学, 2. 田中貴金属工業)

Evaluation of light atomic element dissolved in magnetic grains
with unit cell analysis for L1₀-typed FePt based films

○Daiki Isurugi¹, Gento Tanaka¹, Takashi Saito¹, Kim Kong Tham², Tomoyuki Ogawa¹, and Shin Saito¹

(1. Tohoku Univ., 2. TANAKA KIKINZOKU KOGYO K. K.)

はじめに 熱アシスト磁気記録媒体の記録層では、室温で高い一軸結晶磁気異方性エネルギーを有する L1₀ 型 FePt 相が有力な候補材料であり、C や BN を粒界材 (Grain boundary material: GBM) として用いたグラニューラ薄膜の実用開発が進められている。我々はグラニューラ薄膜の飽和磁化 (M_s) が GBM の融点と相関し、C や BN 等の融点の高い GBM を用いたグラニューラ薄膜では M_s の低下が著しいことを指摘した¹⁾。この原因は成膜時に FePt と GBM との分離が不十分な状態で析出凝固が起きるため、GBM を構成する軽元素 B、C、N が磁性結晶粒内に残存してしまっていることが考えられ、固溶量の評価が求められる。しかしながらシングルナノメートル膜厚のグラニューラ薄膜であって、しかも磁性結晶粒内に存在する軽元素について定量評価することは容易ではなく、これまでほとんど議論されてこなかった。今回我々はグラニューラ薄膜中の L1₀ 型 FePt 相の単位胞体積が、格子中に固溶した軽元素量に敏感な指標となる傍証を得たので報告する。

評価の方法と評価結果 Fig. 1 は、L1₀ 相の単位胞を解析するための格子定数のグラフである。 c を縦軸、 a を横軸にとると、軸比 c/a の等値線は右上がりの直線 (破線)、単位胞体積 (a^2c) は右下がりの曲線 (記載範囲ではほぼ直線: 実線) として描かれる。このグラフ上に様々なプロセス条件で作製される FePt 基薄膜の L1₀ 相の格子定数 (a, c) をプロットすれば、単位胞変化に関する情報が得られる。一例として Fig. 1 には基板温度を 250 - 630 °C まで変化させてスパッタ成膜した FePt 合金薄膜中の FePt 相の格子定数をプロットした。試料の層構成は FePt-30 vol.%BN (5 nm)/MgO (5 nm)/a-Co₆₀W₄₀ (80 nm)/Sub. である。試料中の FePt 結晶粒は c 軸配向していたため、In-plane X 線回折による(200)面ならびに Out-of-plane X 線回折による(002)面からの回折線のブラッグ角から格子定数 (a, c) を算出した。プロットによると合金薄膜の (a, c) のプロットは基板温度を上げて作製するほど右下にシフトし (a : 増加, c : 減少)、 c/a が低下していくことがわかる。これは添え書きした規則度の向上とも対応している。一方これらの試料の単位胞体積は、成膜時の基板温度に依らず 55.55 Å³ で一定値を示している。これは FePt 合金薄膜では規則-不規則の構造変化の過程で単位胞体積はほとんど変化しないことを示している。Fig. 2 には、基板温度 550°C のもと Ar ガスに N₂ ガスを添加して成膜した FePt 合金薄膜中の L1₀ 相の格子定数 (a, c) を示した。窒素流量比を 0 から 50% まで増加させると、(a, c) のプロットはグラフ中で上側にシフトし (c : 増加)、 c/a が 1 に近づいていくことがわかる。一方この場合の単位胞体積は 55.55 から 56.89 Å³ まで増大している。添え書きした規則度の減少も考え合わせると、N₂ ガスの添加成膜では、添加窒素量の増加にともない窒素が FePt 結晶粒内に固溶してしまい、Fe と Pt の規則配列の形成を妨げている描像が伺える。講演では、FePt 合金薄膜に加え FePt-GBM グラニューラ薄膜について、N₂、H₂、NH₃ 等のガスを用いてガス添加成膜やガス雰囲気ポストアニールを施した試料の解析結果についても紹介する。

参考文献 1) S.Saito et al., *J. Appl. Phys.*, **59**, 045501 (2020).

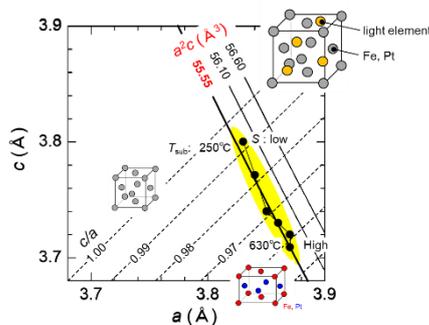


Fig. 1 Variation of the lattice constants a and c of the L1₀ phase in FePt alloy films deposited at different temperatures.

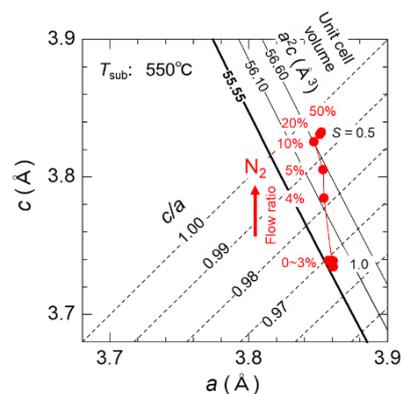


Fig. 2 Variation of the lattice constants a and c of the L1₀ phase in FePt alloy films sputtered with N₂ gas.

急速昇降温熱処理と微細加工を併用した 規則配置された $L1_0$ -FePt 微粒子群作製への検討

清水雄太¹, 吉川大貴², 塚本新²

(¹ 日本大学大学院理工学研究科, ² 日本大学理工学部)

Fabrication of regularly arranged $L1_0$ -FePt fine particulate with
combination of rapid thermal annealing and microfabrication

Yuta Shimizu¹, Hiroki Yoshikawa², Arata Tsukamoto²

(¹ Graduate School of Science and Technology, Nihon Univ.,

² College of Science and Technology, Nihon Univ.)

はじめに 垂直磁気異方性を有する FePt ナノ磁性体の微粒子化, またその規則配置・粒径の低分散化を含むパターン化は次世代高密度磁気記録媒体, 高機能磁気デバイス作製における基盤要素技術である. 我々は熱酸化 Si 基板上に積層した Pt / Fe 連続二層膜に対して短時間の急速昇降温熱処理 (RTA : Rapid Thermal Annealing) を行い分離, 凝集, $L1_0$ 規則合金化を一工程の熱処理で可能とする微粒子作製手法を報告している¹⁾. 更に本 RTA に電子線リソグラフィ (EBL) による微細加工を併用した手法も検討・報告している²⁾. 通常連続二層膜への RTA では粒径, 磁気特性分散の大きな微粒子群が形成される. しかし, RTA と微細加工を併用する本手法では, 各粒子体積の低分散化とともに分離・凝集プロセスの多様性を強く限定できると考えられる. 本研究では微細加工により孤立二層膜タイトルの体積を限定し, 微細加工体積による熱処理後形成粒子数, 粒子形状について検討する.

実験方法 リフトオフ法にて Si 基板上に総積層膜厚 3.75 nm の Pt / Fe 孤立二層膜タイトル群を RTA 前初期構造として作製した. 本構造は Fig.1 に示す微細加工タイトル辺長 L を 50 ~ 200 nm, 周期 P を $L + 100$ nm の 150 ~ 300 nm となるように描画を行い, Fe を 1.64 nm, Pt を 2.11 nm, DC マグネトロンスパッタリングにて積層し作製した. この試料に対して到達真空度 $< 1.0 \times 10^{-3}$ Pa の雰囲気下で, 昇温速度約 120 °C/sec., 到達温度 590 °C の急速昇温後, 降温速度 -140 °C/sec. の急速降温にて RTA を実施した. この試料に対して走査型電子線顕微鏡 (SEM) による観察し形成された粒子形状, 粒子数を評価する.

実験結果 一つのタイトルから一つの微粒子形成可能な臨界タイトルのサイズの有無, また粒子サイズを評価するために SEM を使用した. Fig.2 に示すように $L < 110$ nm では1タイトルあたりの形成粒子数は概ね1個であるが, $L \geq 110$ nm 付近から複数粒子の形成を確認した. これより分離が発現するタイトルサイズの臨界点は 100 ~ 110 nm 近傍であることを示した. また, タイルサイズの増加に伴い1タイトルあたりの平均形成粒子数は線形に増加することを確認し, 孤立二層膜体積の増加と形成粒子数に相関があると確認できる. 粒子サイズ評価からは Fig.2 に示すように $L < 100$ nm ではタイトルサイズの増加とともに単調な平均粒子直径の増加が確認され, 複数粒子が形成された範囲では平均粒子直径が約 60 nm で飽和する. この RTA を用いた形成粒子サイズに対する臨界現象の存在により粒子数のタイトルサイズ依存性が生じているものと考えられる. 一方, EBL の電子線散乱により RTA 前初期構造が設計よりも約 10 ~ 20 nm 程度肥大化する傾向が確認されるものの, RTA の凝集効果により描画面積の約 60% に凝集した. これにより, RTA を併用する本形成手法において描画配列周期を維持したまま加工サイズよりも微小な構造を形成できる可能性も示した.

謝辞 本研究の一部は, 情報ストレージ研究推進機構の助成により行った.

参考文献

- 1) Y. Itoh, T. Aoyagi, A. Tsukamoto, K. Nakagawa, A. Itoh and T. Katayama : Jpn. J. Appl. Phys., **43**, 12, 8040(2004).
- 2) T. Naeki, K. Miyoshi, H. Yoshikawa, A. Tsukamoto : "T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)", **3**, 1 - 6 (2019).

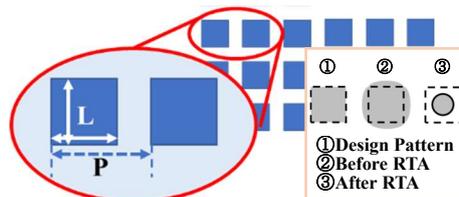


Figure1 Design tile pattern and Stepped microstructure

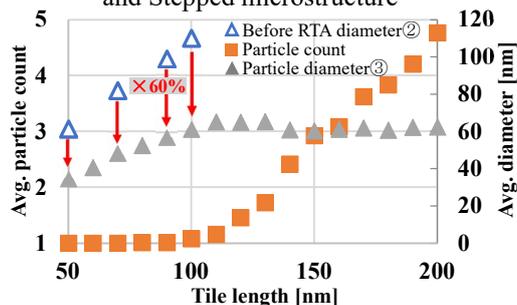


Figure2 Tile length characteristics

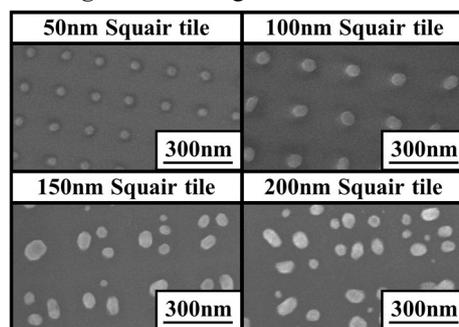


Figure3 Observation of nano particle shape by SEM.

脳神経構造可視化ツールを用いた分散ストレージ Ceph のデータアクセス性能の評価検討

川田悠貴, 田中陽一郎
(東北大)

Evaluation study of data access performance of distributed storage Ceph, using a brain neuronal structure visualization tool

Yuki Kawada, Yoichiro Tanaka
(Tohoku Univ.)

はじめに ストレージシステムの巨大化に伴うデータアクセス性能の向上が課題となっている。本実験では、大容量の回転ストレージデバイス(HDD)とレイテンシーの短いフラッシュデバイス(SSD)を組み合わせた大容量ストレージシステムの高性能化、高効率化に向け検討を行う。本実験で用いた分散ストレージシステム Ceph[1]は、柔軟なアクセス方式、優れた拡張性、高信頼性を持つオブジェクトストレージであり、ストレージ基盤としての活用が期待される。

実験方法 分散ストレージ Ceph を Compute Node-1 上のディレクトリにマウントし、ニューロンデータ(約 472GB)を格納した。Compute Node-2 上の脳神経構造可視化ツールを用いて初期表示のための一部データを Ceph クラスタから読み込み、データ通信量を測定した。ストレージデバイスとして NL-HDD を Storage Node-1, 2 に各 10 台, SATA SSD を Node-1, 2 に各 4 台, Node-3 に 1 台用いた。

実験結果 ①データ, メタデータの配置デバイスによる比較を行った。データの配置デバイス(HDD または SSD)による性能差は大きい, メタデータの配置デバイスによる影響は見られなかった。②データを HDD に配置し, 内部メタデータ(DB)/内部ジャーナル, Write-ahead ログ(WAL)に SSD を用いた場合の比較を行った。DB/WAL とメタデータをどちらも SSD に配置した場合のみ, 平均通信時間が約 3.5%短縮した。どちらか一方のみ SSD に配置した場合, SSD を用いなかった場合は, 性能の差がほとんど見られなかった。③データレプリカの数による比較を行った。レプリカ数を 1 から 2 に変更した場合, 平均通信時間はデータを HDD に配置したとき約 3.4%, SSD に配置したとき約 2.0%長くなった。レプリカは冗長性の確保とストレージデバイス同士の状態監視に使用されるため, 分散読み出しのようなメリットは得られなかった。

まとめ 性能評価の結果, データの配置デバイス, レプリカ数によるデータアクセス性能の差異を確認した。データを HDD と SSD に配置した時の性能差はベンチマークの性能差に比べ小さく, HDD にデータを配置した場合, データのシーケンシャル利用と分散配置により SSD との性能差を縮小することができた。メタデータおよび DB/WAL の配置デバイスと使用環境のデータアクセス性能への影響の詳細検討, データ保全のためのレプリカとアクセス性能のトレードオフの解消が今後の課題である。

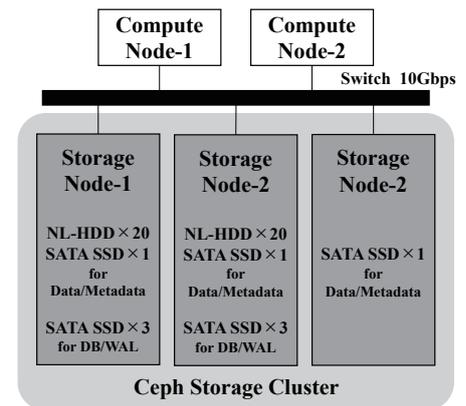


Fig.1 System Configuration

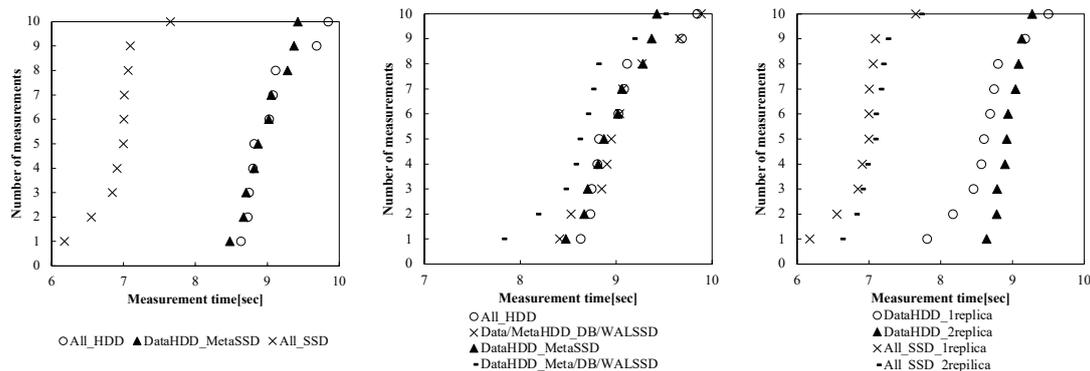


Fig.2 (From the left) ①Difference by data & metadata placement ②Difference when DB/WAL SSD is used
③Difference by number of replications

謝辞 本研究の一部は, JSPS 科研費・基盤研究(B)JP20H02194, 東北大通研共同プロジェクト R02A33, 東北大 AI Yotta の助成を受けたものです。ニューロンデータをご提供頂いた MIT 坂東洋介博士、脳神経構造可視化ツールを提供頂いたキオクシア株式会社に感謝します。

参考文献 [1] S.A.Weil, S.A.Brandt, E.L.Miller, D.D.Long, and C.Maltzahn, "Ceph: A scalable, High-performance distributed file system," Proceedings of the 7th symposium on Operating systems design and implementation, Nov.2006

磁性ナノ粒子分散液の磁気直線二色性周波数スペクトル解析

諏訪 雅頼、江村 一志、塚原 聡
(大阪大)

Frequency spectrum analysis of magnetic linear dichroism in suspension of magnetic nanoparticles

M. Suwa, H. Emura, S. Tsukahara
(Osaka Univ.)

はじめに

磁性ナノ粒子 (MNP) の交流磁場応答を利用した医療・計測技術の発展に伴い、液中に分散した MNP の動的キャラクターゼーション法が求められている。Usov らは数値計算から、交流磁場下における液中 MNP の挙動は、磁気モーメントと容易軸が一体となって回転する”Viscous モード”と、Néel 回転により磁化反転した磁気モーメントにつられて容易軸が回転する”Magnetic モード”に分けられることを示したり。動的磁化曲線の形状からある程度モードの判別ができるが、MNP 自体の回転を観測することでより確からしくなることが期待できる。そこで本研究では、交流磁場で MNP 分散液に誘起される磁気直線二色性 (MLD) から容易軸の回転挙動を観測した。MLD 周波数スペクトルを作成し、その形状から回転モードの判別を試みた。

MLD 測定実験

Voigt 配置 (磁場 ⊥ 光の進行方向) での光測定が可能な空芯スプリット型コイルにバイポーラ電源を接続し、周波数 0.3 Hz ~ 40 kHz、振幅 max. 45 mT の定常的な交流磁場を発生させた。磁場に対して 45° の偏光面を持つ直線偏光 (波長 405 nm) をコイル内の試料溶液に入射した。ウォラストンプリズムで透過光を磁場と平行及び垂直な偏光成分に分離、それらの強度差を差分増幅器で測定、オシロスコープおよびロックインアンプで信号を観察して MLD を見積もった。粒径の異なる酸化鉄 (IO) MNP (直径 14 nm, 22 nm, 30 nm) およびコバルトフェライト (CF) MNP (直径 21 nm) の分散液を測定した。

結果と考察

今回測定したすべての MNP 分散液の MLD は磁場周波数 f の 2 倍で振動した。この振幅 A_{2f} と位相をロックインアンプで精密に測定し、実部 A_{2f}^{Re} と虚部 A_{2f}^{Im} に分けて周波数に対してプロットした。Fig.1 に粒径の異なる IO-MNP の MLD 周波数スペクトルを示す。直径 14 nm と 22 nm の IO-MNP は典型的な緩和型スペクトルを示したが、30 nm の IO-MNP では A_{2f}^{Re} が 10 kHz 付近で負の値をとった。また、異方性定数の大きな CF-MNP でも 30 nm の IO-MNP と同様のスペクトルが観測された。MNP 体積に比例して異方性エネルギーが大きくなる。従って、このスペクトル形状変化は回転モードの違いによるものと考えられる。Magnetic モードと Viscous モードにおける容易軸の振動周波数の違いと、ロックインアンプで測定される $2f$ 信号の位相の値から、スペクトル形状の変化が説明できた。

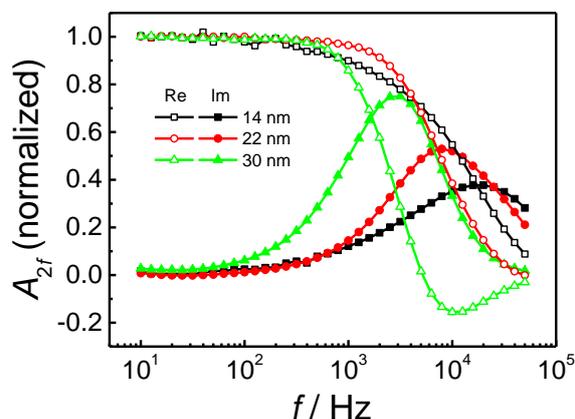


Fig. 1 Frequency spectra of MLD in MNP suspension. Open and filled symbols represent real (in-phase) and imaginary (out-of-phase) components in the $2f$ -oscillation of MLD. The amplitude of the field was 10 mT.

参考文献

- 1) N. A. Usov, B. Y. Liubimov, *J. Appl. Phys.*, **112**, 023901 (2012).

磁性ナノ粒子のパラメータ間相互依存性を考慮した分布推定

後藤春樹¹, 秋田祐加¹, 高橋廉¹, 平野陽豊³, 二川雅登¹, 竹村泰司², 大多哲史¹
(¹静岡大学, ²横浜国立大学, ³藤田医科大学)

Evaluation of distribution of interdepending parameters in magnetic nanoparticles

H. Goto¹, Y. Akita¹, R. Takahashi¹, H. Hirano³, M. Futagawa¹, Y. Takemura², S. Ota¹

(¹Shizuoka University, ²Yokohama National University, ³Fujita Health University)

はじめに

磁性ナノ粒子のバイオ医療応用において、磁性ナノ粒子設計や最適な磁場条件の決定には磁性ナノ粒子の磁気特性を詳しく評価する必要がある。先行研究において、振動試料型磁力計を用いて計測した磁化曲線からランジェバン関数を用いてフィッティングすることで粒径分布が推定されている^{1,2)}。本研究では磁化曲線から、粒径と飽和磁化を変数としてランジェバン関数でのフィッティングを行うことによる、パラメータ間相互依存性を考慮した分布推定に成功した。

実験方法・結果

実験に用いた粒子は市販の粒子である Resovist[®] (富士フィルム RI ファーマ)、synomag[®]-D (Micromod Partikeltechnologie GmbH) を用いた。純水中に分散した各粒子を解析資料として用意した。

Fig. 1 は Resovist[®]に含まれるパラメータ成分をマッピングした分布図を示している。Fig. 2(a)は Fig. 1 に関して式(1)の計算を行うことで粒径の分布としたもので、Fig. 2(b)は Fig. 1 に関して式(2)により飽和磁化の分布を計算したものである。

$$p(d_i) = \sum_k p(M_{s_k} | d_i) \quad (1)$$

$$p(M_{s_i}) = \sum_k p(d_k | M_{s_i}) \quad (2)$$

M_s は飽和磁化、 d はコア粒径、 p は確率を表しており、 k は観測系に含まれる各粒子を表す添え字である。Fig. 1 において、粒径の減少に伴い飽和磁化も減少した。粒子の凝集による双極子相互作用の影響で、飽和磁化が小さくなったと考えられる。Fig. 2(a)の粒径 3-4 nm 付近においては、コア粒子としての振る舞い、6 nm 以上でのピークは凝集体としての振る舞いを表していると考えられる。Resovist[®]の実効的な粒径の分布は、先行研究と概ね傾向が一致している^{1,2)}。講演では解析手法や各粒子の解析結果について詳細に述べる。

謝辞

本研究の一部は、JST ACT-X JPMJAX21A5 及び、科研費 20H02163, 20H05652 の助成を受けて実施した。

参考文献

- 1) T. Yoshida N. B. Othman, and K. Enpuku, *J. Appl. Phys.*, **114**, 173908 (2013).
- 2) S. Ota, S. B. Trisnanto, S. Takeuchi, J. Wu, Y. Cheng, and Y. Takemura, *J. Magn. Magn. Mater.*, **538**, 168313 (2021).

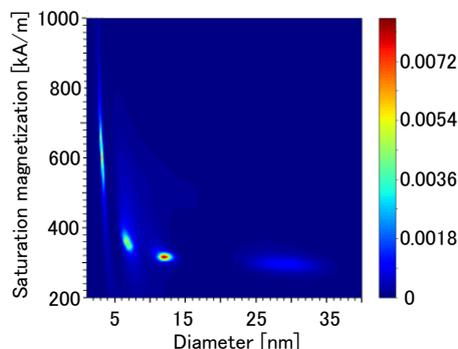


Fig. 1 Estimated distribution of saturation magnetization for each core diameters

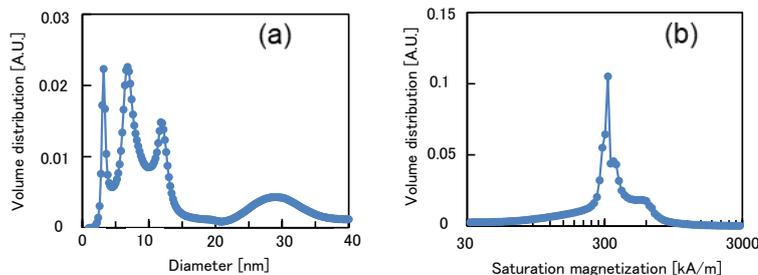


Fig. 2 Estimated distribution of core diameter and saturation magnetization calculated from Fig. 1

鎖状磁性ナノ粒子の磁化の個数依存性に関する基礎研究

張 昊晨、池田 一貴、笹山 瑛由、吉田 敬
(九州大学)Basic research on the number dependence of magnetization of chainlike magnetic nanoparticles
Zhang Haochen, Kazuki Ikeda, Teruyoshi Sasayama, Takashi Yoshida
(Kyushu University)

はじめに

磁性ナノ粒子(MNP)を用いた磁気粒子イメージングや磁氣的免疫検査などの医療応用が注目されている。MNPにはシングルコアと複数のコアが凝集体を形成するマルチコアがあるが、マルチコア型のMNPの磁気特性は定量的には未解明である。以前の研究では、鎖状マルチコア磁性ナノ粒子(CMNP)とそれと等価な鉄量をもつシングルコア磁性ナノ粒子(SMNP)の交流磁化特性について数値解析を行い、等価な鉄量を持つCMNPのほうがSMNPより磁化応答が良いことが分かった。本研究では、鎖状マルチコア磁性ナノ粒子(CMNP)の交流励起磁化特性の磁性コアの個数依存性を調べたので以下に報告する。

解析方法

Fig.1にCMNPのモデル図を示す。コア径と個数を変化させたときの磁化特性を調べた。コア直径6, 8, 10, 12, 14 nmそれぞれに対し、磁性コアの個数を2個から最大で30個まで繋げた鎖状マルチコア磁性ナノ粒子の交流励起磁化特性を解析によって求めた。

LLG方程式により、 i 番目のMNPの磁化の単位方向ベクトル \mathbf{u}_i の計算を行った。ただし、交流励起磁界 $H_{ex} = H_{ac} \sin \omega t$ は z 軸方向とした。

また、有効磁界 H_{eff} は、(1)式に示すように励起磁界 H_{ex} 、異方性磁界(第二項)、双極子相互作用磁界(第三項)、熱雑音磁界 H_{th} の和で表すことができる。

$$H_{eff} = H_{ex} + \frac{2K}{M_s} (\mathbf{u}_i \cdot \mathbf{n}_i) \mathbf{n}_i + \sum \frac{1}{4\pi r_{ji}^2} \left(\frac{3\mathbf{m}_j \cdot \mathbf{r}_{ji}}{r_{ji}^3} \mathbf{r}_{ji} - \mathbf{m}_j \right) + H_{th} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{n}_i は磁化容易軸の単位方向ベクトルを表しており、 z 軸方向に固定されているとした。(1)式の右辺第三項は双極子相互作用磁界であり、 \mathbf{m}_j は j 番目のMNPの磁気モーメントベクトルを表す。また、Fig.1に示すように、CMNPにおいて隣り合ったMNPは接触しているものとした。本解析では、 $\mu_0 H_{ac} = 10$ mT、励起周波数を100 kHz、飽和磁化 $M_s = 400$ kA/m、異方性定数 $K = 10$ kJ/m³とした。

解析結果

Fig.2に基本波磁化の実部の個数依存性を示す。磁性コアを10個以上繋げても磁化がほぼ一定になっていることが分かる。これは、10個以上磁性コアを繋げても磁性コア間の距離が遠くなるため、磁気双極子相互作用があまり増加(変化)しないためだと考えられる。また、コア径 d を大きくするほど励起磁界に対する双極子相互作用磁界が大きくなり、磁化が大きくなったが、Fig.3に示すように $d = 12$ nmから位相遅れが表れ、 $d = 14$ nmでは磁化が大きく下がっていた。これは、コア径が大きくなると、一つ一つの磁性コアの交流励起磁界に対する応答性が低下するためである。以上の結果から、本研究の交流励起磁界の条件では、磁性コアサイズは10~12 nm程度で10個以上磁性コアを繋げることで、磁化が大きくなりほぼ一定の磁化が得られることが分かった。

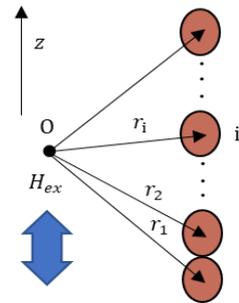


Fig.1. Schematic structure of chainlike MNPs.

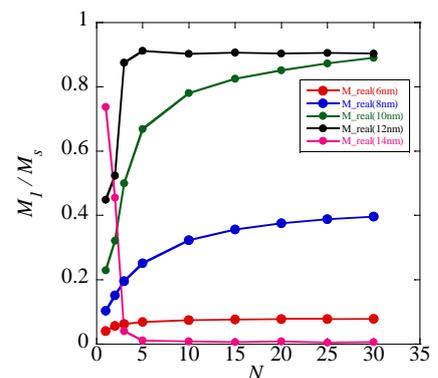


Fig.2. Relationship between the real part of the fundamental component of the magnetization and the number of MNPs.

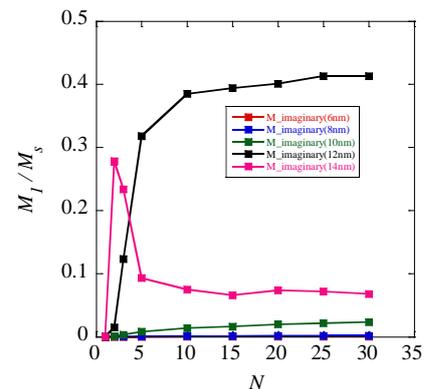


Fig.3. Relationship between the imaginary part of the fundamental component of the magnetization and the number of MNPs.

腫瘍内における磁性ナノ粒子の磁気特性評価

本多勁汰¹, 清水広介², 二川雅登¹, 竹村泰司³, 大多哲史¹
(¹静岡大学, ²浜松医科大学, ³横浜国立大学)

Evaluation of magnetic relaxation of magnetic nanoparticles in tumors

K. Honda¹, K. Shimizu², M. Futagawa¹, Y. Takemura³, and S. Ota¹

(¹Shizuoka University, ²Hamamatsu University School of Medicine ³Yokohama National University)

はじめに

磁性ナノ粒子を用いたハイパーサーミアは、身体的負担や副作用が少ない新たながん治療技術として期待されており、実用化に向けた研究が盛んに行われている。特に、実用化においては、粒子の磁気緩和特性の評価は必要不可欠である。既にマウスから切り離された腫瘍内での粒子に関して交流磁化測定を行い、磁気緩和特性の評価を行った研究が報告されている¹⁾。本研究では、マウスに移植された状態の腫瘍内に投与した磁性ナノ粒子についての磁化ダイナミクスを解明することを目的とし、パルス磁場を用いた磁気緩和特性測定²⁾を実施した。

実験方法・結果

本研究では、 γ -Fe₂O₃ ナノ粒子(Resovist®, FUJIFILM Toyama Chemical Co., Ltd.)を測定試料として用いた。腫瘍における計測では、短径 10.8 mm、長径 13.3 mm の腫瘍に、140 mg-Fe/mL の磁性ナノ粒子を 10 μ L 直接投与した。比較試料としては、溶媒の粘度が 0.089, 0.89, 8.9 mPa \cdot s の液状試料と、エポキシ樹脂により固定した固体状試料を用意し、特に粘度 0.89, 8.9 mPa \cdot s の液状試料については、水に加えてグリセリンにより粘度の調整を行った。直径 8.5 mm、高さ 9.5 mm の円柱状容器に粒子濃度が腫瘍内に近い 2.64 mg-Fe/ml になるように調整した。印加するパルス磁場に関するパラメータは、磁場強度を 0.79 kA/m、立ち上がり時間を 22.5 μ s とした。

Fig. 1 にパルス磁場を印加した際の、液体(89 μ Pa \cdot s)、高粘度(890 μ Pa \cdot s、8.9 mPa \cdot s)、固体の計 4 サンプルから得られた粒子の磁気緩和特性を示した。ここで、液状試料について、パルス磁場を印加することで 2 段階に変化する波形が得られ、特に 2 段階目の変化をブラウン緩和に由来する磁性ナノ粒子の磁気緩和特性と考えられる²⁾。本研究では、磁場の立ち上がり時間がネール緩和時間よりも遅いため、1 段階目の変化は、磁場の遷移に追従する磁気モーメントの回転が表れている。液体から高粘度になるに従い、ブラウン緩和時間が長くなるため、2 段階目の立ち上がりの時間が遅くなることを確認した。対して固体試料では、ブラウン緩和に相当する 2 段階目の立ち上がりが確認されなかった。

パルス磁場を印加した際の、マウスに移植された状態の腫瘍内から得られた磁性ナノ粒子の磁気緩和特性は固体サンプルに類似した状態にあることを確認した。講演では、液体、高粘度、固体サンプルの磁気緩和特性の結果及び、腫瘍内における粒子の磁気緩和特性の原因の考察について詳細に述べる。

謝辞

本研究の一部は、科研費 20H05652、20H02163 および、公益財団法人テルモ生命科学振興財団の助成を受けて実施した。

参考文献

- 1) S. Dutz, M. Kettering, I. Hilger, R. Miiller, and M. Zeisberger, *Nanotechnology*, **22**, 265102 (2011).
- 2) S. Ota and Y. Takemura, *J. Phys. Chem. C*, **123**, 28859–28866 (2019).

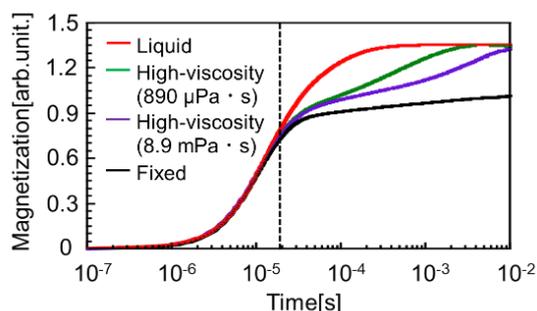


Fig. 1 Magnetic relaxation properties in the liquid high-viscosity, and fixed samples.

Development of gold-coated magnetic nanoparticles for magnetic hyperthermia and micro-CT imaging applications

Loi Tonthat¹, Tomoyuki Ogawa¹, Narufumi Kitamura², Yoshio Kobayashi³, Kohsuke Gonda², Shin Yabukami¹

¹Graduate School of Engineering, Tohoku University, Miyagi 980-8579, Japan

²Graduate School of Medicine, Tohoku University, Miyagi 980-8575, Japan

³Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, Ibaraki 316-8511, Japan

Gold-coated magnetic core-shell nanoparticles have attracted much interest due to their potential applications in cancer therapy through the combination of target drug delivery, diagnostic imaging, and magnetic hyperthermia which would greatly increase the treatment efficacy. In previous studies, we developed a simple magnetic hyperthermia system¹⁾, as well as synthesized water-soluble iron oxide magnetic nanoparticles²⁾ and gold nanoparticles³⁾ with a size of sub-10 nanometer. In this study, the development of gold-coated Fe₃O₄ (Fe₃O₄@Au) nanoparticles as therapeutic and diagnostic (theranostic) agents for magnetic hyperthermia and micro-CT imaging applications is presented.

The synthesis of Fe₃O₄@Au involved the sequential formation of the Fe₃O₄ core and Au shell. First, the Fe₃O₄ nanoparticles were synthesized via thermal decomposition method that reduced iron (III) oleate using 1,2-hexadecanediol in the mixture of oleylamine and oleic acid as capping agents. Gold was then deposited onto the surface of Fe₃O₄ nanoparticles by reducing gold acetate using 1,2-hexadecanediol in the mixture of oleylamine and oleic acid at 190°C (the mole ratio of Au precursor to Fe₃O₄ was approximately 7:1). The synthesized nanoparticles were characterized by TEM, XRD, EDS, DLS, and magnetization measurements. Figure 1 shows the TEM images and photographs of Fe₃O₄ and Fe₃O₄@Au nanoparticles and their magnetization curves at 300K. The Fe₃O₄ nanoparticles after coating with Au appeared much darker than the Fe₃O₄ nanoparticles due to the generation of contrast depending on the atomic number of atoms composing the nanoparticles. The average sizes of Fe₃O₄ and Fe₃O₄@Au are 5.2 nm and 6.1 nm, respectively, and the average thickness of the Au coating is 0.45 nm. The magnetization of Fe₃O₄@Au nanoparticles (9.7 emu/g-Fe₃O₄) at 300K was much smaller than that of Fe₃O₄ nanoparticles (52.4 emu/g-Fe₃O₄). This decrease is considered to be due to a decrease in magnetic moment coupling as a result of the increased interparticle spacing of the magnetic core by gold shell and organic capping agents. We are evaluating the synthesized Fe₃O₄@Au nanoparticles as a heating agent for magnetic hyperthermia and a contrast agent for micro-CT imaging.

References

- 1) A. Shikano *et al.*, *Trans. Magn. Soc. Jpn.*, 6(1), 100-104, (2022)
- 2) L.Tonthat *et al.*, *IEEE Trans. Magn.*, 54 (7), 5400506, (2018)
- 3) T. Inose *et al.*, *Colloids Surf. B: Biointerfaces*, 203, 111732, (2021)

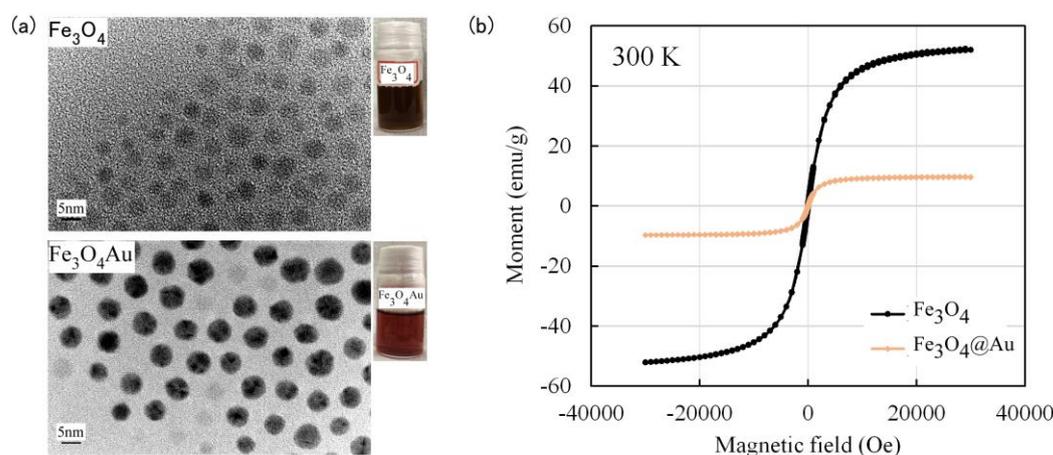


Fig. 1 (a) TEM images and photographs of the diluted hexane solutions of Fe₃O₄ and Fe₃O₄@Au nanoparticles, and (b) magnetization curves for dried Fe₃O₄ and Fe₃O₄@Au nanoparticles at 300K.

商用超磁性磁性ナノ粒子の交流磁化・自己発熱特性

尾花洋輝¹、大多哲史²、竹内誠治¹、Suko Bagus Trisnanto¹、山田努¹、竹村泰司¹
(¹横浜国立大学, ²静岡大学)

AC magnetization and self-heating properties of commercial superparamagnetic magnetic nanoparticles
Hiroki Obana¹, Satoshi Ota², Seiji Takeuchi¹, Suko Bagus Trisnanto¹, Tsutomu Yamada¹, Yasushi Takemura¹
(¹Yokohama National Univ., ²Shizuoka Univ.)

はじめに

磁性ナノ粒子を発熱体とする磁気ハイパーサーミアを広く臨床実用するためには、発熱量の向上、特に発熱効率の向上が求められている。そのためには発熱効率、即ちより低振幅かつ低周波数の交流磁界の印加で如何に高い発熱を得るかということが重要となる¹⁾。そのためのアプローチとして私達は磁性ナノ粒子の発熱特性、発熱機構の解明を目指している²⁾。本発表では、3つの商用超常磁性ナノ粒子としてResovist[®]、MS1 (Resovist[®]の原料であるFerucarbotranを磁気分画した比較的粒径の大きな粒子)³⁾、Synomag[®]-Dを試料として、それぞれの直流・交流磁化特性を測定し⁴⁾、発熱特性を考察した結果を報告する。

実験方法・結果

測定粒子として、MRIの肝臓造影剤として臨床利用されているResovist[®]、その原液であるFerucarbotranを磁気分画して抽出した比較的粒径の大きな粒子群であるMS1 (名糖産業株式会社)、及び γ -Fe₂O₃粒子が凝集して形成されたナノフラワー構造を持つマルチコア粒子であるSynomag[®]-Dの3種類を使用した。Resovist[®]が6–21 nmのコア径分布を有するところ、MS1のコア径は21.6 nm程度となる。液中試料及びエポキシで粒子を固定した固定試料を作製した。試料濃度はいずれも2 mg-Fe/mLとした。それぞれの試料の直流磁化特性、交流磁化特性を測定した。交流磁化測定では、 $H_{AC}=5\text{--}30\text{ mT}/\mu_0$ 、周波数 $f=1\text{--}600\text{ kHz}$ の交流磁界を印加した。

Fig. 1にSynomag[®]-Dの液中試料の直流・交流磁化曲線を示す。印加周波数が増加すると、最大磁化が減少することが確認できた。当日はこの結果についての詳細や他の粒子についての結果、算出した発熱量SLP、発熱効率ILPを報告する。

参考文献

- 1) H. Mamiya, B. Jeyadevan, *Sci. Rep.* 1, 157, 2011.
- 2) G. Shia *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.*, 473, 148-154, 2019.
- 3) T. Yoshida *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 114, 173908, 2013.
- 4) S. Ota *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.*, 535, 168313, 2021.

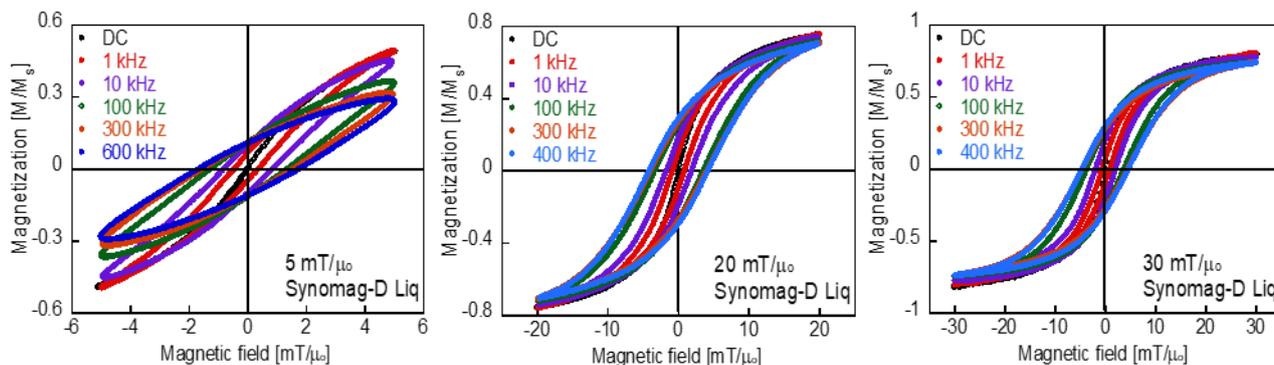


Fig. 1 AC hysteresis loops of the liquid sample of Synomag[®]-D.

高周波パルス磁界印加による磁性粒子の加熱

安達 友威¹, 桑波田 晃弘¹, 薮上 信¹, 中村 英滋²

(¹東北大学,²高エネルギー加速器研究機構)

Heating of magnetic particles by application of high frequency pulsed magnetic field

Yuui Adachi¹, Akihiro Kuwahata¹, Shin Yabukami¹, Eiji Nakamura²

(¹Tohoku University, ²High Energy Accelerator Research Organization)

1. はじめに

磁気ハイパーサーミア (Magnetic Hyperthermia) において、印加する交流磁界波形の変化が、磁性体の加熱効率の向上につながる^[1]。特に、波形の立ち上がり速度が速いパルス波は、磁性体の磁化と印加磁界の位相のずれを生むため、加熱効果が高いことが予想される^[2]。本研究では、高周波パルス磁界を印加した磁性粒子の加熱特性を測定し、加熱効率の高い磁界波形について報告する。

2. 実験系と実験方法

Fig. 1 にパルス磁界印加実験の実験系を示す。本実験系は、インダクタとコンデンサを用いたパルス磁界発生回路、加熱用コイル、光ファイバー温度計 (OptoTemp 2000, micromaterials) で構成される。磁性粒子加熱のためのコイルは、内径 12 mm, 外径 20 mm, ピッチ 51 mm の 8 巻である。パルス磁界発生回路は、インパルス磁界形成回路とロングパルス磁界形成回路の 2 種類であり、入力電源電圧 100 V で、それぞれ加熱用コイルに 22.5 A_{pp}, 16.0 A_{pp} の電流を出力することができる。波形の立ち上がりは、どちらも 2.0 μs である。直径 3 mm の炭素鋼球 30 個と水 1.5 ml をガラスビンに入れ、加熱用コイルの中心に設置し、インパルス磁界、ロングパルス磁界をそれぞれ 300 秒間印加し、温度変化を光ファイバ温度計で測定することで、2 種類の印加磁界がもつ加熱効率の比較を行った。測定は同条件で 3 回ずつ行い、平均値を求めた。

3. 結果

Fig. 2 に印加磁界波形と磁性粒子の温度変化 (インパルス) を示す。パルス磁界 4.0 mT_{pp} を 300 秒間印加した時の炭素鋼球の温度変化は、インパルス、ロングパルス磁界それぞれ +10.9 °C, +17.2 °C であった。つまり、等しい振幅値での加熱効果は、ロングパルス磁界の方が 1.58 倍大きいことが確認できた。

また、それぞれの磁界について、熱出力を加熱コイルの磁束密度による磁気エネルギーで規格化することで、加熱効率を求めた。その結果、インパルス磁界はロングパルス磁界と比較して 1.52 倍の加熱効率をもつことが確認できた。このことは、インパルス磁界の duty 比が、ロングパルス磁界と比べて小さいことに起因すると考えられる。磁化が外部磁界に対して十分に追従した場合、duty 比が小さい波形の方が入力エネルギーは小さいため、加熱効率は大きくなる。したがって、インパルス磁界の加熱効率が大きくなったと考えられる。

4. まとめ

2 種類の磁界を用いた磁性粒子加熱実験を行うことで、ロングパルス磁界と比較して、インパルス磁界の加熱効率が 1.52 倍大きいことを確認した。今後の予定として、正弦波磁界との加熱比較実験を行い、パルス磁界の加熱効率が大きいことを実証する。

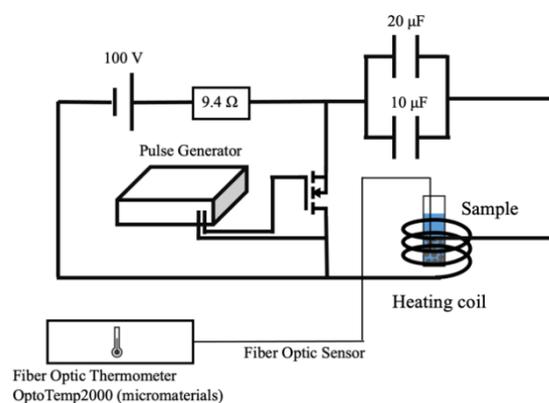


Fig. 1 Pulse heating experimental system

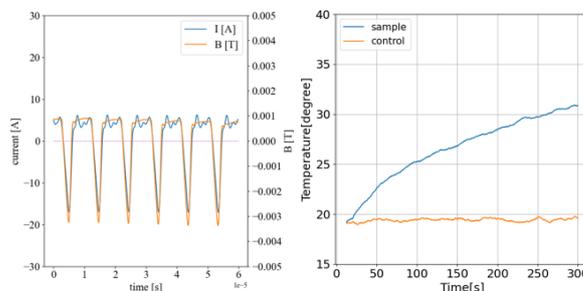


Fig. 2 Pulse waveform and Sample temperature

参考文献

- 1) M. Zeinoun et al. : *Nanomaterials*, Vol.97, 093705(2010)
- 2) S. Morgan et.al. : *Applied Physics Letters*, Vol.11, 123240(2021)

謝辞

本研究は、KEK 令和 4 年度加速器科学総合育成事業、及び KEK 共同開発研究 2022-ACCL-1, AMED プロジェクト (22ym0126802j0001) の支援を受けた。

多チャンネル計測のためのフィードバック型 Peak to Peak 検出 MI センサの開発

井立聖二、内山剛、馬家駒*
(名古屋大学、*豊田中央研究所)

Development of Feedback Type Peak to Peak Voltage Detector MI Gradiometer for multichannel measurement

S. Idachi, T. Uchiyama, J. Ma.
(Nagoya Univ., *Toyota Central R&D Labs., INC.)

はじめに

表皮効果を利用した Magneto-Impedance (MI) 磁気センサは小型で非常に高い磁場感度を持ち、広いダイナミックレンジを持つことからシールドルーム外において脳磁場や心磁場といった微小な生体磁場を計測するセンサとして期待されている。当研究室では Peak to Peak 検出 MI センサをグラジオメータ化することによりノイズフロア 700fT (at 10Hz) を達成している[1]。一方で、高い磁場感度により回路のダイナミックレンジが制限されることで、シールドルーム外において多チャンネル計測をすることが困難である。そこでアモルファスワイヤにフィードバックコイルを巻くことで、ダイナミックレンジの拡張および磁場感度の向上を目指す。

実験方法

図1に実験で使用した MI センサヘッドの模式図を示す。フィードバックの選送差 $F=1.86$ である。外部磁場をヘルムホルツコイルで準静的 (1Hz) に変化させたときの検出特性を計測した。

また、シールドルーム外における磁気ノイズスペクトル密度を計測し、フィードバックによるノイズフロアの影響を確認した。

実験結果

図2にフィードバックをかける前及びかけた後の、グラジオメータ MI センサの検出特性を示す。フィードバックをかける前の磁場感度がそれぞれ 255490V/T (センシング)、378940V/T (リファレンス) なのに対し、フィードバック後の磁場感度がそれぞれ 202640V/T (センシング)、221990V/T (リファレンス) となり、磁場感度差 Δ がフィードバック前では 48% なのに対し、フィードバック後は 9.5% となった。図2から、フィードバックによりグラジオメータの MI センサ同士の磁場感度差が減少することが分かった。

図3にフィードバックあり及びなしの時の磁気ノイズスペクトル密度比較を示す。図3よりフィードバック前は 20pT (at 10Hz) のノイズフロアが、フィードバック後は 10pT (at 10Hz) となり、ノイズフロアが低減することを確認できた。

参考文献

[1] J.Ma, and T.Uchiyama, IEEE Trans. Magn., VOL. 53, NO. 11, (2017).

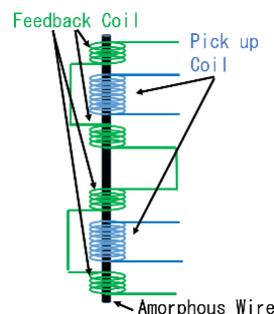


Fig. 1 Feedback Type MI sensor

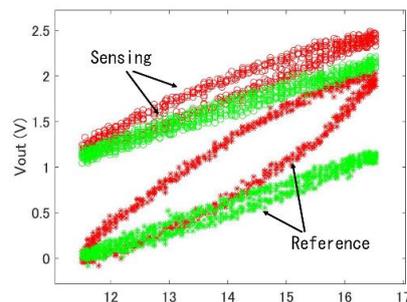


Fig. 2 Field detection characteristics of two MI element in the Feedback Type MI Gradiometer. Red line: Before Feedback. Green line: After feedback.

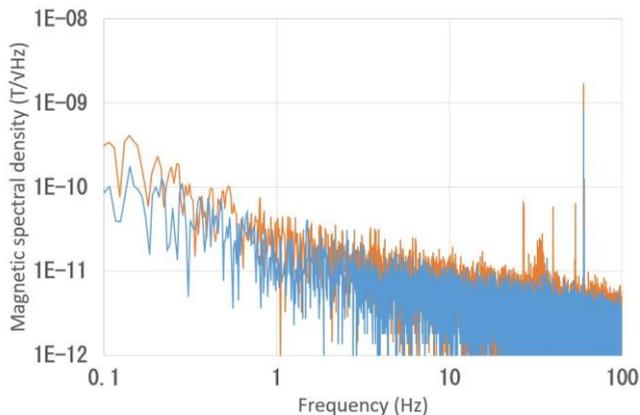


Fig. 3 Magnetic noise spectral density. Red line: Before feedback. Blue line: After feedback.

位置ずれを伴う心磁図の信号源推定における センサ位置と解析空間に関する研究

岩井守生¹, 小林宏一郎¹, 孫文旭²

¹ 岩手大学理工学部 ² 近畿大学工学部

Misalignment of Sensor Position and Analysis Area on Current Source Estimation of MCG.

Morio Iwai¹, Koichiro Kobayashi¹, Wenxu Sun²

¹Faculty of Science and Engineering, Iwate University, Iwate 020-8551, Japan

²Department of Engineering, Kinki University, Hiroshima 739-2116, Japan

はじめに

心磁図は、心疾患の診断に有効であり、近年臨床研究において注目されている、特に、心磁図は人体の透磁率が一定であることなどから、心筋内の電流分布の推定に有用である。現在多くの場合、空間フィルタ法を用いて心筋内の電流源推定が行われている。算出方法の違いにより、様々な手法が提案されているが、本研究では、再構成磁場精度が高く、過剰な広がりや抑制可能な eLORETA 法¹⁾を採用した。また、シミュレーションでは心臓を挟むように胸部側・背中側の2つの測定面を用いて信号源推定することで推定精度が向上することが知られている。しかし臨床データを用いた複数測定面の信号源推定では、胸部側・背中側の測定面の位置ずれを考慮する必要がある²⁾。そこで本研究では、特にセンサと心臓の位置関係による位置ずれについて検討する。位置ずれによる推定精度への影響を検討するため、心磁図の磁場分布に着目し、測定面と解析空間の位置を疑似的に修正する方法を提案する。測定面と解析空間の位置関係の違いによる推定解の影響を検討し、推定精度の向上を目指す。

検討方法

測定面が解析空間の直上に存在するとして解析する従来法、R波ピーク時の電流アロー図の電流強度最大の位置が解析空間のxy座標中心に位置するように各測定面および解析空間位置を変更する解析空間移動法および解析空間移動法後に得られた推定電流情報をもとに測定面の空間座標上に磁場を再構成する磁場再構成法を比較し、測定面と解析空間のずれによる推定解への影響を検討する。検討には実際の測定における位置ずれを再現した心臓モデルを用いて行った。

検討結果

3つの推定方法を比較した結果、測定面と解析空間のずれの影響により、推定解が広がることが分かった。表1に推定解の広がりや評価として各方法による推定解のボクセル数を示す。これらの結果より、実際に起こる位置ずれや測定対象の個人差によるずれを考慮して、推定を行う際の条件を最適化する必要性があることが分かったため報告する。

表1. 検討結果 (ボクセル数)

解析領域	従来法	解析空間移動法	磁場再構成法
ボクセル数	296	205	157

参考文献

- 1) R. D. Pascual-Marqui. "Discrete, 3D distributed, linear imaging methods of electric neuronal activity. Part 1: exact, zero error localization.", arXiv :0710.3341 [math-ph], vol. 1, pp. 1-16, Oct. 2007.
- 2) K. Kobayashi, M. Iwai, Y. Ono, W. Sun, M. Sugimachi, K. Kusano, and T. Shishido, "Magnetocardiography Current Source Estimation using Multiple Spatial Filters", J. Magn. Soc. Jpn., 45, 131-135 (2021)

高調波磁化を用いた磁性ナノ粒子の状態識別

山村柊哉、五藤仁哉、安武茉莉、圓福敬二、吉田敬
(九州大学)

State identification of magnetic nanoparticles using harmonic magnetization
Shuya Yamamura, Jinya Goto, Mako Yasutake, Keiji Enpuku, Takashi Yoshida
(Kyushu University)

はじめに

ナノメートルサイズの磁性ナノ粒子を用いた画像診断手法として、磁性ナノ粒子からの高調波磁化信号を検出し対象の位置を特定する、磁気粒子イメージング (Magnetic Particle Imaging, MPI) が提案されている。MPIにおいて、粒子が検出対象と結合したか否かを判別した上で正確な位置を特定する技術の開発が必要とされている。また、トレーサの候補としてMS1 (Meito Sangyo, Japan)、Synomag (Micromod, Germany)、Perimag (Micromod, Germany) がある。本研究では、これらの磁性ナノ粒子が検出対象と結合したか否かを液相と固相状態で模擬した混合サンプルにおいて状態を識別し、含まれる鉄量の推定を行った。さらに特異値分解法により鉄量推定の評価を行った。

実験方法

1つの容器に液相、固相状態の磁性ナノ粒子が混在しているサンプルに交流励起磁界を印加し、粒子の磁化信号から液相・固相それぞれに含まれる磁性ナノ粒子の鉄量推定を行った。推定するにあたり初めに、液相・固相それぞれの鉄量 $1 \mu\text{g}$ あたりの磁化信号を取得した。次に、磁化信号の第三、第五高調波成分の実部と虚部の中から、どの組み合わせを用いて推定を行うべきか、特異値を用いて評価した。最後に、すべての信号成分の組み合わせで鉄量推定を行い、推定誤差と特異値との関係性を評価した。

実験結果

励起周波数 20 kHz と 3 kHz の2条件について実験を行った。磁性ナノ粒子はPerimag, Synomag, MS1の3つを使用した。Fig.1 (a), (b)に励起周波数 20 kHz の場合の、MS1を用いて行った鉄量推定の結果と信号の組み合わせごとの特異値と誤差の標準偏差の関係をそれぞれ示す。特異値と装置のノイズから想定される誤差よりも大きな推定誤差が出たが、特異値と推定誤差に相関関係があり特異値を用いて推定に使用する信号を評価できることを確認した。再現性について確認すると測定誤差に比べサンプル誤差が大きくなっておりサンプル作製の精度が低いことが確認できた。3 kHz では固相の誤差が大きくなることと特異値が大きくなる組み合わせが20 kHzと異なっているという特徴があったが同様に特異値を用いて使用する信号を評価できた。

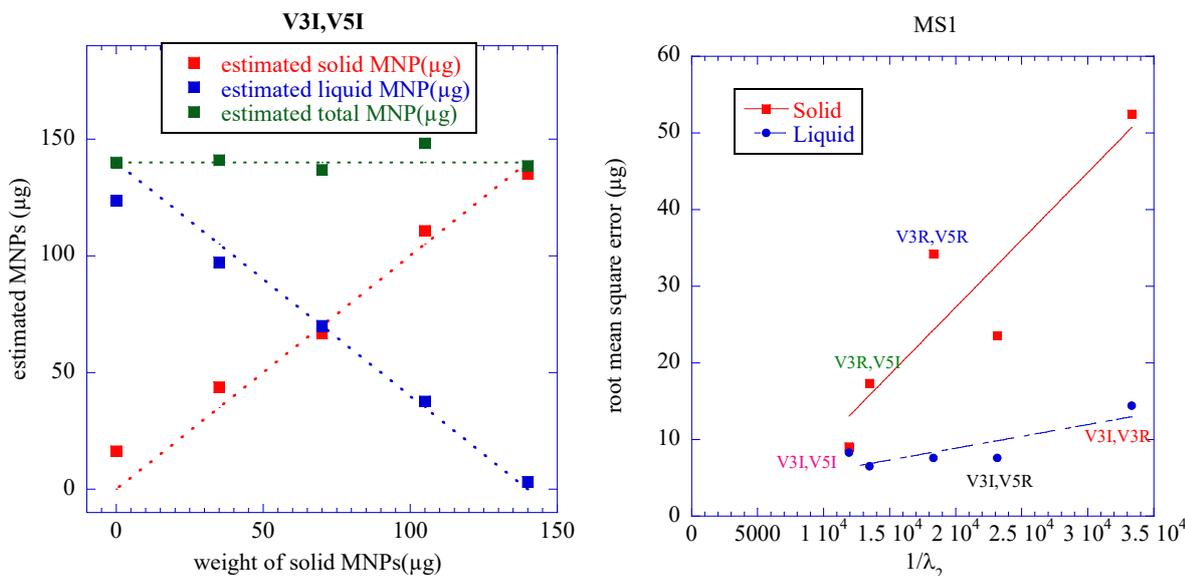


Fig.1 (a) Iron content estimation for MS1

(b) Root mean square error vs. singular value for MS1

Method for Rapid Detection of Bacteria Using Magnetic Nanoparticle Aggregates

Y. Pu¹, H. Zhao², T. Murayama³, L. Tonthat², K. Okita³, Y. Watanabe³, S. Yabukami^{1,2,3}

¹School of Engineering, Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan

²Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan

³Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan

A novel method for rapid detection of bacteria was developed using magnetic nanoparticles with antibodies embedded in them. Fig. 1 shows the basic structure of the detection system. The constructed system consists of drive coil, pick-up coil with yoke inside, magnet, signal generator (AWG1005), preamplifier (SR560) and lock-in amplifier (LI5640, sensitivity was 1 V and time constant was 300 ms). To detect bacteria, each sample contains magnetic nanoparticles (0.2 μl , 500 nm ϕ , Nanomag-D). And the OD (Optical Density) value of five *Fusobacterium nucleatum* samples varies from 0.0001 to 1 with ten times increase for each sample. One sample only magnetic nanoparticles without *Fusobacterium nucleatum* was added, which is six samples in total. It is necessary to put the sample on the yoke to get sample magnetized and aggregated, as such the stray field of the aggregate can be picked up easier by pick-up coil. As for drive and pick-up coils, an LVDT (Linear Variable Differential Transformer) structure was used to detect small signal generated from the aggregate as two output signals of pick-up coil cancel so the output voltage is theoretically zero before detection. According to the equation relationship between magnetization / magnetic field and voltage, it would be possible to calculate magnetic susceptibility when both two voltages detected. Considering the influence of microtube itself and solution of sample inside, the voltage of the sample was also measured and calculated to get higher accuracy. For each detection, signal generator generates five signals with a same voltage of 200 mV and different frequencies of 110, 310, 1010, 3010 and 10010 Hz. Fig. 2 shows the concentration dependence of magnetic susceptibility of *Fusobacterium nucleatum*. In all frequencies tested, it shows that when the concentration of the sample (OD value) increases, the magnetic susceptibility decreases. The reason for this phenomenon is that when the OD increases, the distances between magnetic particles also increase because there is a larger number of *Fusobacterium nucleatum* in the aggregate, thus magnetic field generated by aggregate gets weaker and causes this phenomenon. Furthermore, we found that as the frequency of input signal increases, the magnetic susceptibility decreases. It is considered that as the frequency increases, the change rate of the magnetic flux passing through the pick-up coil increases, which makes the voltage generated by drive coil increase, causing magnetic field of drive coil increase. As magnetic field of drive coil is considered as denominator during the calculation of magnetic susceptibility, thus magnetic susceptibility decreases.

Acknowledgement: This research was supported by AMED under Grant Number 22ym0126802j0001, and the Comprehensive Growth Program for Accelerator Sciences and the Joint Development Research 2022-ACCL-1 at High Energy Accelerator Research Organization (KEK). This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number 21K04090.

Reference

- 1) S. Yabukami et. al., *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58 (2022, in press).

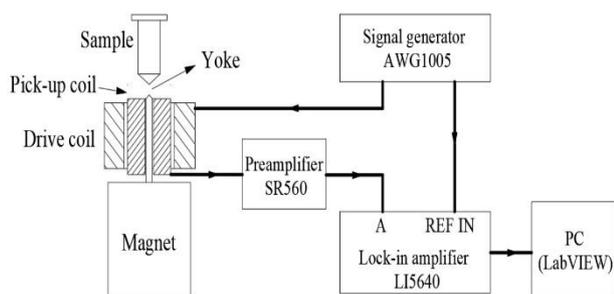


Fig. 1 Schematic view of the detection system.

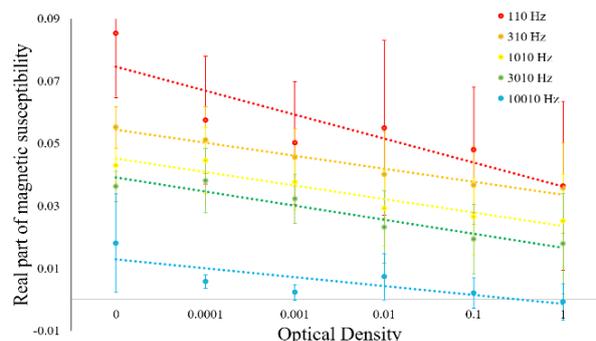


Fig. 2 Concentration dependence of *Fusobacterium nucleatum*.

A simple antigen-antibody reaction using ultrasmall FeCo nanoparticles

L. Tonthat¹, T. Murayama², N. Kobayashi³, S. Yabukami^{1,2}, W. Ikeda-Ohtsubo⁴, K.I. Arai³

¹Graduate School of Engineering, Tohoku University, Miyagi 980-8579, Japan

²Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku University, Miyagi 980-8579, Japan

³Research Institute for Electromagnetic Materials, Denjiken, Tomiya 981-3341, Japan

⁴Graduate School of Agricultural Science, Tohoku University, Miyagi 980-8570, Japan

Antibody-conjugated magnetic nanoparticles (MNPs) have attracted considerable attention in bioseparation and clinical diagnostics assays. By utilizing the antigen concentration-dependent magnetic response of MNPs-antibody-antigen aggregates under a switching magnetic field, we developed a user-friendly and rapid detection system of oral bacteria in the liquid phase for point of care testing¹⁻²). To improve the detection sensitivity for smaller antigens, we also synthesized ultrasmall iron oxide MNPs with an average particle size of 4 nm and proposed a novel method for adsorbing antibodies directly on their surface without coating any proteins³). Although the smaller MNPs have a greater surface-to-volume ratio to interact with bacteria or viruses, their saturation magnetization decreases with decreasing their size. Therefore, in this study, to enhance their magnetic moment without increasing their size, we examine FeCo nanoparticles with a high magnetic moment for bacteria or virus detection.

FeCo nanoparticles used in the experiment were collected by dissolving the fabricated FeCo-BaF films in water since Ba-F in the matrix was deliquescent. Here, the FeCo-BaF thin films composed of crystal phase of BaF₂ matrix and FeCo alloy MNPs (Fe:Co:Ba:F=14:11:21:54 at.%) were fabricated using a RF sputtering tool⁴). Our experiment showed that the FeCo nanoparticles well dispersed in water could not be collected by the magnet. As such, we used ultracentrifugal separation (110,000 rpm, 90 min) to collect them as well as the antibody (abcam ab53891)-conjugated FeCo MNPs and the antigen (*Candida albicans*)-antibody FeCo MNPs. Figure 1(a) shows the magnetization curve of FeCo-BaF film and the TEM image of FeCo MNPs. Considering that the magnetization of the film is caused by the FeCo alloy MNPs in the film, the magnetization of ~5 nm FeCo nanoparticles at 1.4 T could be estimated at approximately 13 kG. Figure 1(b) shows the number of *Candida albicans* counted from the micrographs of the aggregates of FeCo MNPs and *Candida albicans*. By adding sonication treatment of the film before bounding them to antibodies, the number of bacteria bound to FeCo MNPs increased significantly. The success of antigen-antibody reaction of ultra-small magnetic nanoparticles improves detection sensitivity as well as offers potential detection for smaller biomolecules.

Acknowledgements: This research was supported by AMED under Grant Number 22ym0126802j0001, by High Energy Accelerator Research Organization (KEK) under the Comprehensive Growth Program for Accelerator Sciences and the Joint Development Research 2022-ACCL-1, and Japan Society for the Promotion of Science through Grants-in-Aid for Scientific Research (KAKENHI) under Grant 20K20210 and 21K04090.

References

1) L.Tonthat *et al.*, AIP Advances, 9 (12), 125325 (2019); 2) S. Yabukami *et al.*, IEEE Trans. Magn., 58, (2022) (in press); 3) T. Yoneyama *et al.*, IEEE Trans. Magn., 58, (2022) (in press); 4) N. Kobayashi *et al.*, Electron Comm Jpn., 104 (2), e12308 (2021)

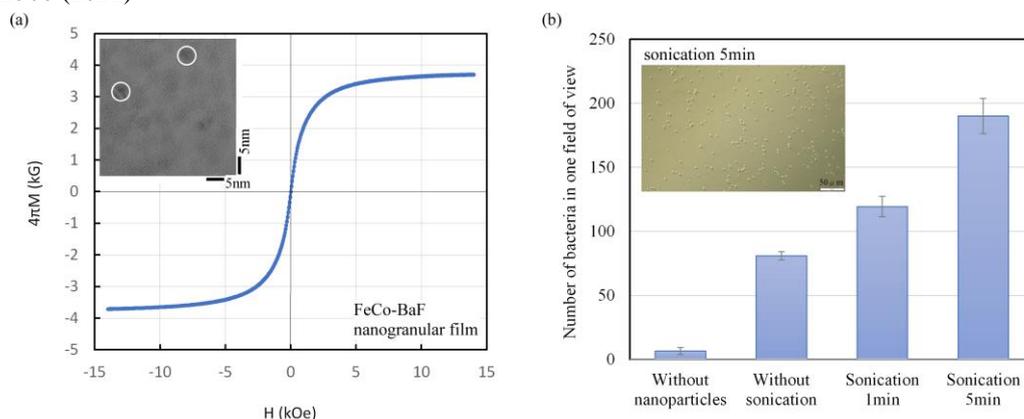


Fig. 1. (a) Magnetization curve of FeCo-BaF thin film at 300K and TEM image and (b) the number of *Candida albicans* after sonication treatment and the micrograph of the aggregates of FeCo nanoparticles and the *Candida albicans*.

MR センサアレイを用いた pT 級磁気信号の視覚化 と磁気粒子イメージング

Suko Bagus Trisnanto¹、笠島多聞²、悪七泰樹²、竹村泰司¹

(¹横浜国立大学、²TDK 株式会社)

pT-field mapping by using magnetoresistive sensor array for magnetic particle imaging

Suko Bagus Trisnanto^{*1}, Tamon Kasajima², Taiju Akushichi², Yasushi Takemura¹

(¹Yokohama National University, ²TDK Corporation)

はじめに

磁気粒子イメージング(magnetic particle imaging, MPI)は、体内に注入させた磁性ナノ粒子を磁化させ、画像化する技術である^{1,2)}。人体サイズへの適応に向けて、高周波磁界に対する安全性や磁気刺激等の観点から励磁強度・周波数の制限下での最小感度推定やシステム設計が重要である。本講演では、磁気抵抗効果(MR)センサアレイを用いた pT 級磁気信号のマッピングを報告する。高感度な MR センサにより MPI における励磁周波数の低減や磁性ナノ粒子の検出感度向上が期待される³⁾。

実験方法と結果

心磁界などの生体磁気計測に用いられている 6×6=36 チャンネルの TDK 製 MR センサアレイを使用した⁴⁾。静磁界で磁化した磁性ナノ粒子の単一 MR センサを用いた磁気信号マッピングを報告しているが⁵⁾、本研究では、磁気モーメントのモデルとして、直径 1 mm、長さ 5 mm、40 巻きのコイルから磁界を発生させた。このミニコイルをアレイの中心から 50、100、若しくは 150 mm の距離に設置した。距離 50 mm においてコイル電流 30 mA、200 Hz とした場合の 36 チャンネル、各 MR センサで同時測定した検出信号を Fig.1 に、CH16 の検出信号を Fig.2 に示す。これらの結果は磁気シールドルーム内で測定したものであるが、シールドルーム外でも測定を行った。交流磁気信号に対する検出感度<1 pT@10 kHz の測定結果⁶⁾などの詳細も当日報告する。

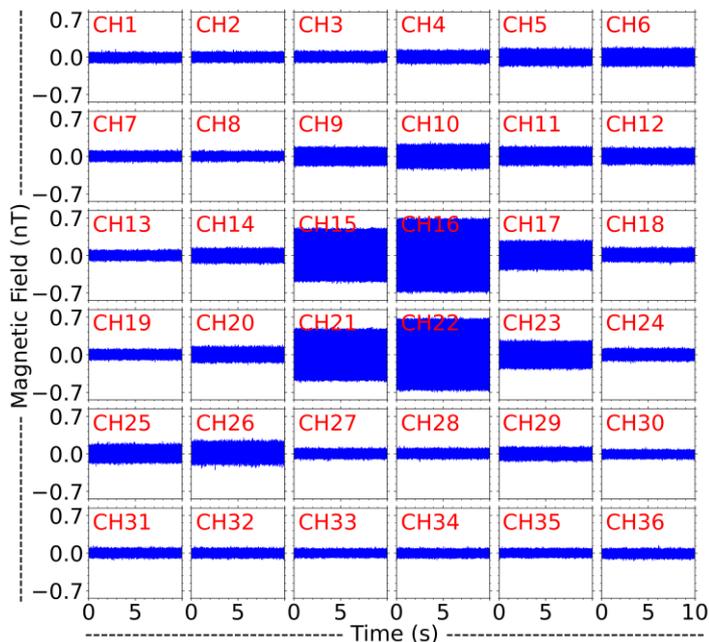


Fig. 1 Simultaneous signal acquisition of 36-channels MR sensor array for a given magnetic field from mini coil at 200 Hz.

参考文献

- 1) B. Gleich, J. Weizenecker, *Nature*, **435**, 1214, 2005.
- 2) 吉田、日本磁気学会 まぐね, **13**(4), 161, 2018.
- 3) S. B. Trisnanto, T. Kasajima, T. Akushichi, Y. Takemura, *Applied Physics Express*, **14**, 095001, 2021.
- 4) 寺園、澁谷、大川、日本磁気学会 まぐね, **14**(4), 211, 2019.
- 5) S. B. Trisnanto, T. Kasajima, T. Akushichi, Y. Takemura, *Journal of Applied Physics*, accepted.
- 6) S. B. Trisnanto, T. Kasajima, T. Akushichi, Y. Takemura, to be submitted.

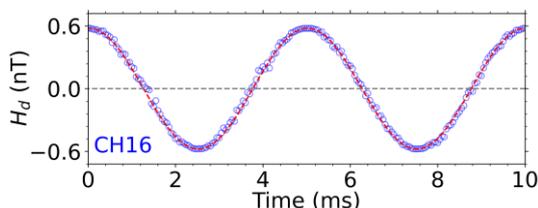


Fig. 2 Signal waveform detected by MR sensor of channel 16 (CH16 in Fig.1).

磁気粒子イメージング装置の大型化に向けた超伝導傾斜磁界コイル および交流励起磁界コイルの開発

森岡大陽¹、吉本昌史¹、笹山瑛由¹、竹村泰司²、吉田 敬¹
(¹九大、²横国大)

Development of Superconducting DC Gradient and Copper AC Magnetic Field Coils for Large-sized
Magnetic Particle Imaging Scanner

Hiroaki Morioka¹, Masafumi Yoshimoto¹, Teruyoshi Sasayama¹, Yasushi Takemura², Takashi Yoshida¹
(¹Kyushu Univ., ²Yokohama National Univ.)

1. はじめに

磁性ナノ粒子からの磁化信号を検出し、疾病領域を高感度・高分解能にイメージングする磁気粒子イメージング (MPI) が注目されている。人体サイズ MPI の実現に向けた課題の1つとして、傾斜磁界コイルの開発が挙げられる。本研究では、超伝導傾斜磁界コイルを導入したボア径 12 cm の 1/5 モデル MPI スキャナーの開発を目指し、直流傾斜磁界測定と交流励起磁界コイル作製を行った。

2. 直流傾斜磁界測定

YBCO 高温超伝導線材 (SCS4050-API, SuperPower) を用いて 40 Turn×2 Layer (コイル直径 180 mm) の超伝導コイルを二つ試作した。77 K での四端子法による I - V 特性を Fig.1 に示す。電界基準を $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ とすると、電圧 4.5 mV 時の電流が臨界電流となる。Fig.1 より、臨界電流は 60 A 前後であり、以降、負荷電流 50 A で傾斜磁界コイルの設計を行った。

続いて試作した超伝導コイル 2 つをコイル間距離 300 mm で配置、および逆接続し、50 A 通電時のコイル中心軸上での直流傾斜磁界の測定を行い、ビオ・サバールの法則による理論値と比較した。Fig.2 に示すように、測定値と理論値が非常に近い値となっており、理論通りの傾斜磁界が発生していることが確認できる。また、今後開発予定の超伝導傾斜磁界コイル (片側 90 Turn×2 Layer×3) では、理論計算によりおよそ 0.63 T/m の傾斜磁界が発生可能であることが分かった。

3. 交流励起磁界コイル作成および通電試験

銅線のリッツ線を用いて交流励起磁界コイルの作製に取り組んだ。ビオ・サバールの法則を基に数値計算を行うことで、振幅 12.1 mT を得ることが可能な 7 Turn×25 Layer の交流励起磁界コイルを設計した。実効値 10 A、周波数 15 kHz で交流励起した場合、コイルに 5500 V という大きな電圧が生じる。よって、安全面・資格面からコイルに発生する電圧を低圧に分類される交流 600 V 以下に抑制する対策を講じた。具体的には、コイルを 25 層に分割し、分割した層ごとに適切な静電容量を持つコンデンサを取り付けて LC 直列共振回路を作製することにより、電圧を抑制した。実際にコイルを作製し、10 A の通電試験を行ったところ、コイル全体では 30 V の電圧が生じている結果となり、目標値である 600 V 以下に抑えることができた。また、各端子間でも同様に電圧測定を行い、600 V 以下に抑えられていることを確認した。

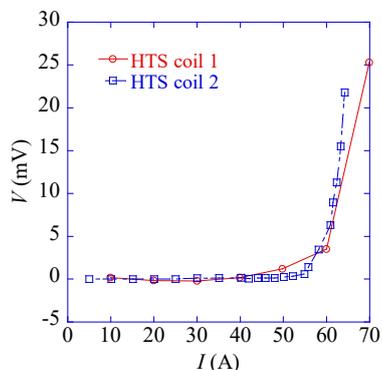


Fig.1 I - V characteristics of the developed superconducting coils

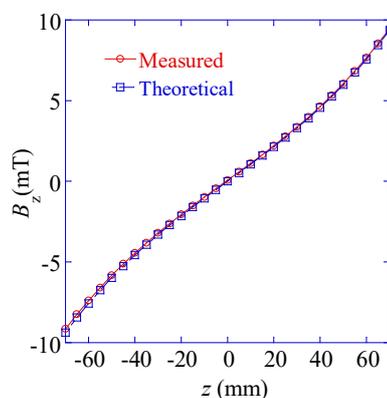


Fig.2 Measured and theoretical values of gradient field

頭部サイズの磁気粒子イメージング用励磁・検出コイル

鈴木健太¹, Hyuna Ahn¹, Suko Bagus Trisnanto¹, 山田努¹, 大多哲史², 吉田敬³, 竹村泰司¹
(¹横浜国立大学, ²静岡大学, ³九州大学)

Drive and receive coils for head-size magnetic particle imaging

Kenta Suzuki¹, Hyuna Ahn¹, Suko Bagus Trisnanto¹, Tsutomu Yamada¹, Satoshi Ota², Takashi Yoshida³,
Yasushi Takemura¹
(¹Yokohama National Univ., ²Shizuoka Univ., ³Kyushu Univ.)

はじめに

人体を対象とする磁気粒子イメージング^{1,2)}において、交流磁界の人体への影響の観点から特に頭部に対しては低強度かつ低周波の励磁磁界条件に抑えることが望まれる。本研究では、頭部の画像診断^{3,4)}を想定し、頭部サイズの励磁コイル及び検出コイルを用いた測定を行っている。

磁気粒子イメージングにおいて、(1)微量の磁気粒子を検出すること(検出感度)、及び(2)画像分解能(磁気粒子検出の空間分解能)を向上することが重要である。本発表では主に前者の磁気粒子の検出感度について報告する。

実験方法・結果

頭部サイズの検出コイルはソレノイド形状やヘルメット形状などが用いられる。ここでは、Fig. 1の左側にある開口部 186 mm 径のヘルメット形状の検出コイルを使用した研究結果を紹介する。磁気粒子イメージングでは励磁コイルにより磁気粒子に交流磁界を印加し、その磁化回転に伴う磁気モーメントの時間変化を検出コイルへの誘導起電力として測定する。Fig. 2に示した測定では、交流励磁した磁気粒子を通電したミニコイルで模擬した。ミニコイルはコイル長 5 mm、巻き数 40 turn であり、頭部サイズの検出コイルの中心に設置した。ミニコイルへの通電は周波数 4 kHz として、振幅を変化させながら検出コイルに生じる誘導起電力を測定した。Fig. 2の横軸はミニコイルから生じる磁界を飽和磁化の 50%で磁化変化($M/M_s=0.5$)すると仮定した Fe_3O_4 の重量に換算している。

検出コイルにキャンセルコイルを直列接続した場合など測定結果の詳細や励磁コイルを含めた頭部サイズの磁気粒子イメージングなどについて当日報告する。

参考文献

- 1) B. Gleich, J. Weizenecker, *Nature*, **435**, 1214, 2005.
- 2) 吉田、日本磁気学会 まぐね, **13(4)**, 161, 2018.
- 3) M. Graeser *et al.*, *Nature Communications*, **10**, 1936, 2019.
- 4) 清野他、第 45 回日本磁気学会学術講演会、01aA-5、2021.



Fig. 1 Coil system for head-size magnetic particle imaging.

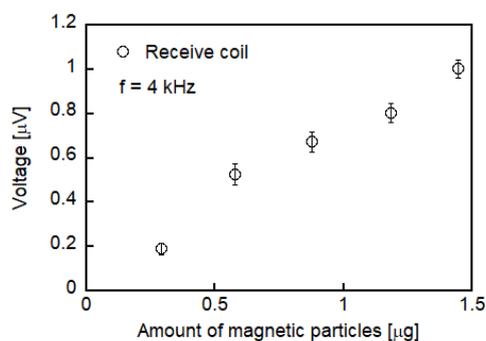


Fig. 2 Signal voltage induced in the receive coil. The equivalent amount of Fe_3O_4 is calculated by the amplitude of the excitation AC field from the mini coil.