

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14693

研究課題名(和文)次世代診断技術の実用化を目指した磁性ナノ粒子の磁化ダイナミクスモデル構築

研究課題名(英文)Evaluation of magnetization dynamics of magnetic nanoparticles for development of magnetic particle imaging

研究代表者

大多 哲史(Ota, Satoshi)

静岡大学・工学部・助教

研究者番号：30774749

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文):磁性ナノ粒子を用いた次世代画像診断技術である磁気粒子イメージングの発展には、磁性ナノ粒子の磁場に対する応答機構の解明が必要不可欠である。交流磁場下での磁化応答においては、磁化の緩和現象であるネール緩和と粒子自体の物理的回転に起因するブラウン緩和に大別される磁気緩和現象が重要となる。本研究では、交流磁化曲線計測、数値シミュレーション、高速で応答するパルス磁場を用いた観測手法により、従来理論では表しきれない磁気緩和現象を観測した。特に、パルス磁場を用いた計測では、高速で応答するネール緩和に追従する、低速で応答するブラウン緩和を計測し、2つの重畳する緩和機構の分離に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁性ナノ粒子の磁場に対する磁化応答機構の解明を実現することで、磁性ナノ粒子を用いた次世代画像診断技術の実用化に貢献する。例えば、がん細胞に特異的に結合する抗体を、磁性ナノ粒子に修飾して、体内に注射し、イメージングを実施することで、がん早期診断が可能となるため、社会的意義は大きい。磁性ナノ粒子の磁気緩和現象は、磁化応答の正確な計測が困難であったため、未解明な状態であった。このため、その計測技術を開発することは、学術的にも意義深い。

研究成果の概要(英文):To develop biomedical applications using magnetic nanoparticles such as hyperthermia and magnetic particle imaging, the evaluation of magnetization dynamics is important. Magnetic relaxations divided into the Néel and Brownian relaxations determine the magnetization dynamics, which was observed by measurement of alternating current (AC) magnetization curve, the numerical simulation based on Landau-Lifshitz-Gilbert equation, and observation under fast responding pulse magnetic field. In particular, the magnetization response associated with the Néel relaxation and two-step relaxation process where the Brownian relaxation was occurred after Néel relaxation were clearly observed under the pulse field. The Néel and Brownian relaxations were isolated from an experimentally observed superposition relaxation system by theoretical fitting.

研究分野：バイオ磁気工学

キーワード：磁性ナノ粒子 磁気緩和 磁化曲線

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

体内の磁性ナノ粒子を可視化することで診断や治療、薬剤輸送のモニタリングを可能とする磁気粒子イメージング(Magnetic particle imaging: MPI)が注目されており、次世代の診断技術として実用化が急務である。MPI は磁気共鳴画像法(MRI)よりも高感度で陽電子断層撮影法(PET)よりも高解像度であり、さらに高速撮影が可能であるという画期的な診断技術である。例えば、がん細胞に特異的に結合する抗体を粒子に修飾することで、粒子をがん腫瘍に集積させることができるため、がん腫瘍の検出が可能となる。MPI では、粒子に交流磁場を照射することで得られる粒子特有の高調波信号を取得することで位置検出を行う。その信号から解析関数を用いて粒子濃度分布を得る。MRI では、画像から診断部位の判別が困難なことに加えて、造影剤として磁性ナノ粒子を用いた場合も、粒子と空気等が同様の影として観測されてしまう。対して MPI では、粒子特有の磁化信号を観測するため、粒子を判別可能であり、この点でも MPI は革新的である。MPI における解像度、感度には、磁性ナノ粒子の磁化特性が深く関わっている。

MPI に用いる粒子の磁化特性として、低磁場で急峻に磁化増加が生じる強い非線形特性が要求される。コア粒径が 20~30 nm といった強磁性粒子が MPI に適しているとする報告(University of Washington, *J. Magn. Magn. Mater.*, 2014 年)や、粒径分布の狭い粒子が強い高調波信号を示すことも明らかにされた(九州大学, *J. Appl. Phys.*, 2013 年)。このように MPI 用粒子開発に係る研究は盛んであるが、基盤にある磁化ダイナミクスは未解明である。このため、目標とされる磁化特性は明らかであるが、その磁化特性を示す粒子設計が困難な現状である。

### 2. 研究の目的

本研究では、MPI 用粒子開発に係る研究は盛んであるが、基盤にあり未解明である磁化ダイナミクスの解明を目的とする。図 1 に示すように、磁化を計測する際に、従来手法では、磁化応答を表現するパラメータの一つである磁化率の測定が一般的であった。しかし磁化率では、具体的な磁化回転の様子が明確でないため、本研究では、交流磁場に対する磁化応答を直接表した磁化曲線の計測と、3. 研究の方法以降に示すさらに発展した手法により、磁化応答解析を実施する。

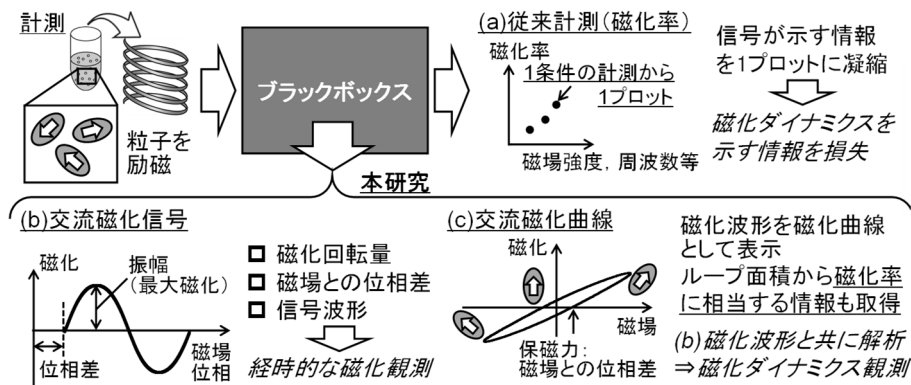


図 1 本研究における計測手法の特徴

### 3. 研究の方法

磁性ナノ粒子の磁気緩和は、磁化の緩和機構であるネール緩和と粒子自体(容易軸)の緩和機構であるブラウン緩和に区別される。この2種類の磁気緩和機構を観測するために、実測においては、磁性ナノ粒子が液体中に分散した試料と、エポキシ樹脂を混合して、粒子自体の物理的回転が生じないようにした固体試料を用意した。具体的な計測や解析手法は、研究ごとに異なるため4. 研究成果に記したが、本研究では主に、交流磁化曲線、Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を用いた数値シミュレーション、そして高速で応答するパルス磁場を印加することによる磁化回転の観測を実施した。

## 4. 研究成果

### 4.1 液中における粒子の物理的回転の実験的予測

コア粒径 5 nm、二次粒径 59 nm の  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ナノ粒子、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(Liquid)、寒天により粒子を固定した固体試料(Solid)を濃度 28 mg-Fe/mL で用意した。ブラウン緩和による容易軸の回転状態を観測するために、液中試料の磁化信号から固体試料の磁化信号の差分の信号(Subtracted)を磁化曲線として示した。ここで差分の磁化曲線は、容易軸の回転を直接表しているのではなく、容易軸回転によって誘導された磁化回転を示している。この差分磁化曲線の応答から、磁場に対する容易軸の応答が予測可能である

図 2 に周波数 0.2 kHz、100 kHz、最大磁場強度 2–8 kA/m の交流磁場を印加した際の、液中、固体、差分の磁化曲線を示した。0.2 kHz では、磁気緩和時間に対して十分に低い周波数であること、超常磁性粒子であるため、液中、固体試料において、保磁力はほとんど確認されなかった(図 2(a, b))。対して 100 kHz においては、磁気緩和における位相遅れが生じるため、液中、固体試料で 0.2 kHz に対して大きな保磁力が確認された(図 2(d, e))

差分の磁化曲線について、0.2 kHz において、残留磁化はほとんど確認されなかった。これはゼロ磁場において液中試料の磁化配向状態が固体試料と同じであることを示している(図 2(c))。したがって、ゼロ磁場では液中試料において容易軸はランダムに配向していると考えられる。磁場強度の増加に伴って、差分磁化曲線の磁化も増加した。これは液中試料では、容易軸が磁場方向へ配向していることで固体試料に比べて磁化が大きくなるためである。特に高磁場強度では、差分の磁化曲線においてヒステリシスが確認され、また磁化曲線は、一般的には反時計回りに変化をするが、図 2(c)では時計回りで変化している。このヒステリシスについては磁場増加過程の方が、減少過程に比べて、液中試料の固体試料に対する磁化増加が大きいことを示している。また差分磁化曲線が時計回りであることは、高磁場において生じている液中試料に対する固体試料の位相遅れに起因している。液中においては容易軸が磁化回転に追従して回転するため、実効的に異方性エネルギー障壁が低下する。このため、ブラウン緩和時間に比べて十分に低い周波数においては、異方性エネルギーに起因するヒステリシス(位相遅れ)が固体試料に比べて小さいと考えられる。

100 kHz において、液中試料の保磁力が固体試料に対して大きく、ブラウン緩和における位相遅れが確認された(図 2(d, e))。また残留磁化について、液中試料の方が固体試料に対して大きいため、ゼロ磁場においては、容易軸が磁場方向に配向していると考えられる。また最大磁化が、液中試料の方が固体試料よりも低いことから、磁化が増加する過程において、容易軸は磁化増加

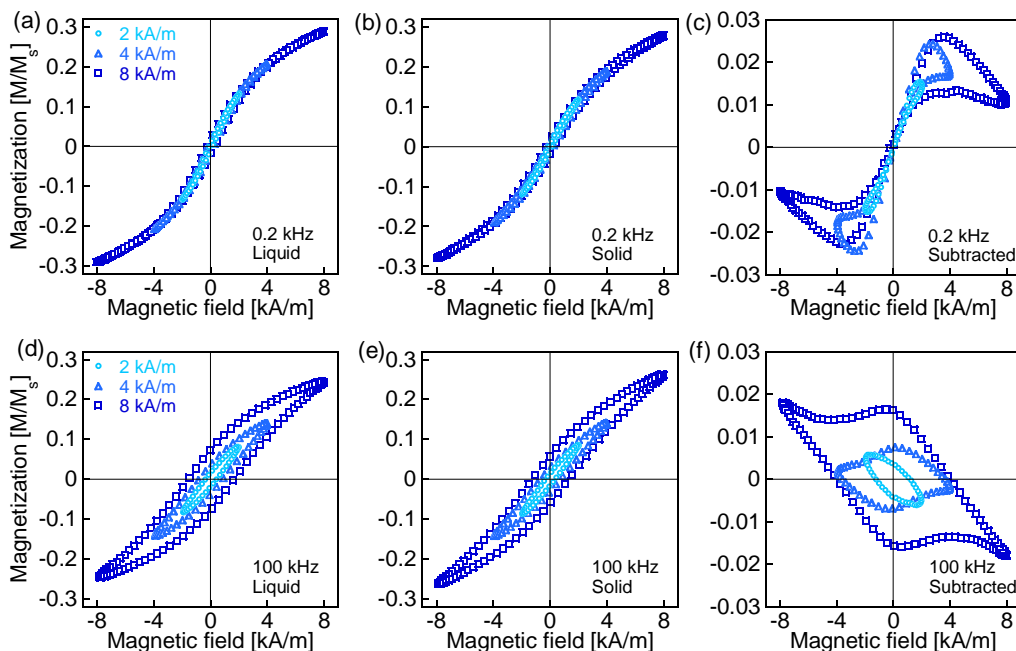


図 2 最大磁場強度 2–8 kA/m、周波数(a–c) 0.2 kHz、(d–f) 100 kHz、における液中(Liquid)、固体(Solid)、差分(Subtracted)の磁化曲線

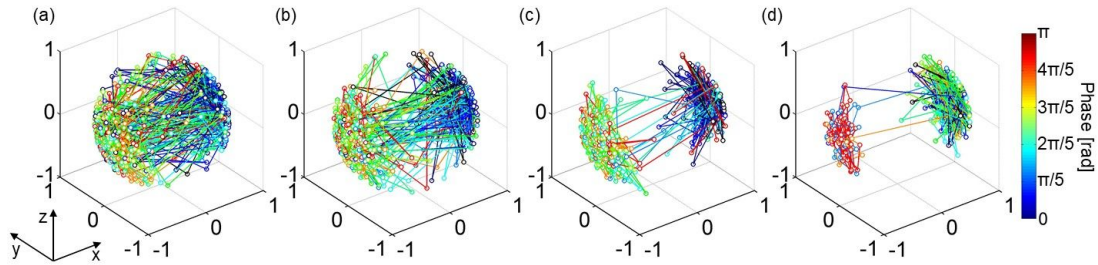


図3 単一粒子の磁化の経時変化( $K_u$ = (a) 8, (b) 9.8, (c) 14.7, and (d) 18  $\text{kJ/m}^3$ ,  $d_c = 11 \text{ nm}$ )

を妨げる方向に回転していることが示唆される。0.2 kHz のような低周波では、磁化の配向、緩和過程において、容易軸も配向、緩和をしている液中試料の方が固体試料に比べて常に高い磁化を示している。対して 100 kHz という高周波では、差分磁化曲線の  $\pi/2$  以上の位相遅れから、磁化の配向、緩和過程において、容易軸がそれぞれ緩和、配向過程にあると考えられる。

#### 4.2 磁化応答のコア粒径と異方性依存 (単一粒子の応答に注目した数値シミュレーション)

容易軸を  $x$  軸方向に配向させた固定状態の試料について、異方性定数に依存した単一粒子の磁化ダイナミクスのシミュレーション結果を図3に示した。異方性定数が大きくなることで、熱散乱によるランダムな磁化反転の回数が減少している。異方性定数とコア粒径については、表1に示すように、それぞれ  $K_u = 12 \text{ kJ/m}^3$ ,  $d_c = 11 \text{ nm}$  とした際に、異方性エネルギー  $\zeta = K_u V_M$  が、1.35, 1.65, 2.02, 2.47, 3.03 となるように条件設定した。また磁化の変化回数内、磁化反転が生じた回数の割合の異方性定数及びコア粒径依存を確認した。ここで磁化反転とは、 $x$  軸方向、 $z$  軸方向について、それぞれ  $yz$  平面、 $xy$  平面を跨ぐ磁化の変化に対応する。 $x$  軸方向の磁化反転については、異方性エネルギーの増加に伴い、その割合が減少していることが確認された。これは熱エネルギーに対して異方性エネルギーが増加することに伴って、 $x$  軸方向に固定されている容易軸に磁化が固定され、熱散乱に由来するランダムな磁化反転が生じにくくなったためである。 $z$  軸方向の磁化反転については、異方性エネルギーに対して一定値を取っている。これは、容易軸が  $x$  軸方向のため、 $z$  軸方向に関しては、熱散乱の影響のみを受けているためと考えられる。

$x$  軸における磁化反転において、 $d_c = 11 \text{ nm}$  とコア粒径を固定した場合と、 $K_u = 12 \text{ kJ/m}^3$  と異方性定数を固定した場合について、コア粒径が小さい方が統計的に磁化反転の回数が大きいことが確認された。磁性ナノ粒子のポテンシャルエネルギー  $E_p$  は、Stoner-Wohlfarth モデルに従って、

$$E_p = K_u V_M \sin^2(\theta \mp \varphi) - \mu_0 M_s V_M |\mathbf{H}_{\text{ex}}| \cos(\varphi), \dots \dots \dots (1)$$

と表される。 $\theta$ ,  $\varphi$  はそれぞれ容易軸と磁場、磁化と磁場の成す角である。ここで  $E_p$  の第一項目、第二項目はそれぞれ異方性エネルギー、ゼーマンエネルギーに相当する。コア粒径が増加することで、異方性エネルギーの増加に加えて、ゼーマンエネルギーの絶対値も増加する。つまりゼーマンエネルギーとしては、磁場強度が増加するのと同様の効果を得られ、磁場方向への磁化の固定が顕著になったと考えられる。図4に熱エネルギー  $k_B T$  ( $k_B$ : ボルツマン定数,  $T$ : 温度) で規格化した  $E_p$  ( $E_p / k_B T$ ) の  $\varphi$  に対する変化を示した。容易軸は磁場方向に固定されているため、 $\theta = 0 \text{ rad}$  とした。 $(K_u, d_c) = (8 \text{ kJ/m}^3, 11 \text{ nm})$ ,  $(12 \text{ kJ/m}^3, 9.61 \text{ nm})$  の時は  $\zeta = 1.35$  で、 $(K_u, d_c) = (12 \text{ kJ/m}^3, 11 \text{ nm})$  の時は  $\zeta =$

表1 異方性定数  $K_u$ 、コア粒径  $d_c$ 、異方性エネルギーと熱エネルギーの比  $K_u V_M / k_B T$  の設定値

$K_u$ [ $\text{kJ/m}^3$ ] ( $d_c = 11 \text{ nm}$ )	8	9.8	12	14.7	18
$d_c$ [nm] ( $K_u = 12 \text{ kJ/m}^3$ )	9.61	10.3	11	11.8	12.6
$\zeta$	1.35	1.65	2.02	2.47	3.03

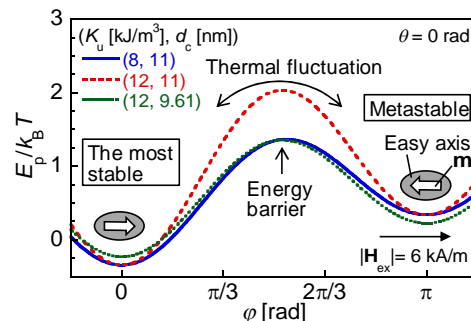


図4  $E_p / k_B T$  の異方性とコア粒径依存

2.02 と、コア粒径及び異方性定数がそれぞれ変化した際の  $E_p/k_B T$  について、エネルギー的に最安定の及び準安定の極小点と、エネルギー障壁を表す極大点の値に注目した。まず  $\zeta$  が大きい方が、エネルギー障壁が高くなり磁化反転が生じにくくなっている。そして  $\zeta = 1.35$  の場合について、 $(K_u, d_c) = (8 \text{ kJ/m}^3, 11 \text{ nm})$  の方が、 $(K_u, d_c) = (12 \text{ kJ/m}^3, 9.61 \text{ nm})$  よりも  $E_p/k_B T$  を比較すると、最安定状態の値が低下、準安定状態の値が上昇している。これは同じ  $\zeta$  であっても、コア粒径が大きい場合の方が、準安定から最安定状態にエネルギー的に遷移しやすいことを表している。このため、図4のように熱散乱によってエネルギー障壁を超えて磁化反転する回数がコア粒径の小さい方が多くなったと考えられる。

以上のように、単一粒子の磁化の継時変化に注目し、異方性エネルギーを変化させることで、磁化ダイナミクスの超常磁性から強磁性への遷移を明瞭に観測した。

#### 4.3 パルス磁場に対する磁化応答

純水中に分散した  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ナノ粒子について、粒子濃度 1.24, 2.47, 4.95, and 9.89 v/v% の試料を用意した。コア粒径は 11 nm、流体力学的粒径は 44 nm であった。

図 5(a) に印加したパルス磁場を示した。立ち上がり時間は 18 ns であり、磁場強度は 0.38 kA/m を印加した。励磁コイルの内部に挿入した検出コイルによって粒子の磁束  $\Phi$  をファラデーの法則に従う誘導起電力  $V_{\text{ind}} = -d\Phi/dt$  として計測した。また本研究では、検出コイルについては、高速応答と低速応答の両方を計測するために巻き数の少なくインダクタンスが小さいものと、巻き数が多くインダクタンスが大きい計測される起電力も大きいものの 2 種類を用意した。磁化率計測のための交流磁場についても、パルス磁場と同様に、磁場強度は 0.38 kA/m とし、周波数は 1 kHz–8 MHz の範囲で計測した。

図 5(b) は、粒子濃度 1.24 v/v% の試料についての磁化応答を示している。18 ns よりも早い時間領域では、磁場の立ち上がり追随した応答が観測されているが、ネール緩和とブラウン緩和として、2 段階で応答する磁化の時間変化を観測した。さらに、以下の式(2)、(3)、(4)を用いて、実験結果をフィッティングすることで、実効的な磁化応答をネール緩和とブラウン緩和に関する応答に分離することに成功した。

$$M_{\text{eff}}(t) = M_N(t) + M_B(t), \dots\dots\dots(2)$$

$$M_R(t) = M_{R,\text{max}} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_R}\right) \right\}, \dots\dots\dots(3)$$

$$M_R(t) = \sum_{i=1}^n F(d_{R,i}) M_{R,i}(t) / \sum_{i=1}^n F(d_{R,i}), \dots\dots\dots(4)$$

$M_{\text{eff}}(t)$  は、ネール緩和とブラウン緩和が重畳した実効的な磁化の時間に依存した応答を表している。ネール緩和とブラウン緩和に由来する磁化応答は、それぞれ  $M_N(t)$ 、 $M_B(t)$  と表され、総称して  $M_R(t)$  と表記する。 $\tau_R$  もネール緩和時間  $\tau_N$  とブラウン緩和時間  $\tau_B$  を総称した表記である。

図 5(c) は、図 5(b) の磁化応答を示したイメージ図である。計測した粒子は、液中ではコア粒子が凝集した形態を取っており、第一に緩和時間の短いネール緩和過程では凝集体内部のコア粒子の磁気モーメントが応答し、続いてブラウン緩和過程において、ネール緩和過程の磁気モーメントの回転により生じる磁気トルクを受けて凝集体が応答する。

図 5(b) におけるフィッティングによるネール緩和とブラウン緩和の解析から、コア粒径  $d_c$ 、異方性定数  $K_u$ 、流体力学的径  $d_H$  をそれぞれ  $11.9 \pm 2 \text{ nm}$ 、 $18 \text{ kJ/m}^3$ 、 $40 \pm 11 \text{ nm}$  と見積もった。また式(2)、(3)における  $M_{N,\text{max}}$  と  $M_{B,\text{max}}$  の比である  $M_{B,\text{max}}/M_{N,\text{max}}$  は 3.7 であった。

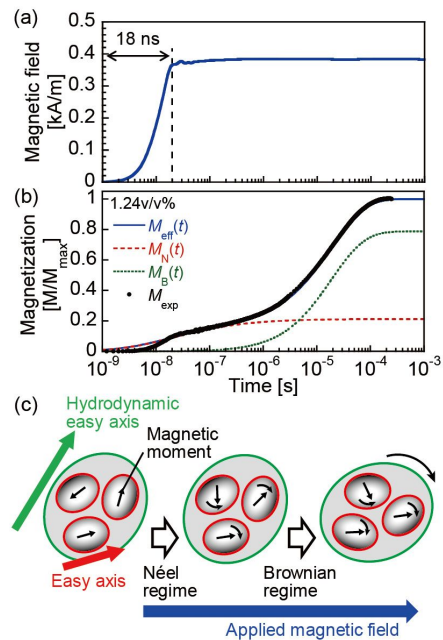


図 5 (a)印加したパルス磁場、(b)粒子濃度 1.24 v/v% の時の磁化応答、(c)磁化及び容易軸の応答モデル

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Ota Satoshi, Nishimoto Kizuku, Yamada Tsutomu, Takemura Yasushi	4. 巻 10
2. 論文標題 Second harmonic response of magnetic nanoparticles under parallel static field and perpendicular oscillating field for magnetic particle imaging	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 015007 ~ 015007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5129973	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ota Satoshi, Takemura Yasushi	4. 巻 123
2. 論文標題 Characterization of N <sup>2</sup> eI and Brownian Relaxations Isolated from Complex Dynamics Influenced by Dipole Interactions in Magnetic Nanoparticles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 28859 ~ 28866
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b06790	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Satoshi Ota, Yasushi Takemura	4. 巻 43
2. 論文標題 Dynamics of Magnetization and Easy Axis of Individual Ferromagnetic Nanoparticle Subject to Anisotropy and Thermal Fluctuations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Magnetism Society of Japan	6. 最初と最後の頁 34 ~ 41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3379/msjmag.1903R005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nishimoto Kizuku, Ota Satoshi, Shi Guannan, Takeda Ryoji, Trisnanto Suko Bagus, Yamada Tsutomu, Takemura Yasushi	4. 巻 9
2. 論文標題 High intrinsic loss power of multicore magnetic nanoparticles with blood-pooling property for hyperthermia	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 035347 ~ 035347
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5079875	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Asahi Tomitaka, Satoshi Ota, Kizuku Nishimoto, Hamed Arami, Yasushi Takemura, Madhavan Nair	4. 巻 11
2. 論文標題 Dynamic magnetic characterization and magnetic particle imaging enhancement of magnetic-gold core-shell nanoparticles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 6489 ~ 6496
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9NR00242A	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Satoshi Ota, Yuki Matsugi, Takeru Nakamura, Ryoji Takeda, Yasushi Takemura, Ichiro Kato, Satoshi Nohara, Teruyoshi Sasayama, Takashi Yoshida, Keiji Enpuku	4. 巻 474
2. 論文標題 Effects of size and anisotropy of magnetic nanoparticles associated with dynamics of easy axis for magnetic particle imaging	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 311 ~ 318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2018.11.043	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Guannan Shi, Ryoji Takeda, Suko Bagus Trisnanto, Tsutomu Yamada, Satoshi Ota, Yasushi Takemura	4. 巻 473
2. 論文標題 Enhanced specific loss power from Resovist <sup>®</sup> ; achieved by aligning magnetic easy axes of nanoparticles for hyperthermia	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 148 ~ 154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2018.10.070	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Suko Bagus Trisnanto, Satoshi Ota, Yasushi Takemura	4. 巻 11
2. 論文標題 Two-step relaxation process of colloidal magnetic nanoclusters under pulsed fields	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 075001 ~ 075001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/APEX.11.075001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ryoji Takeda, Satoshi Ota, Tsutomu Yamada, Yasushi Takemura	4. 巻 42
2. 論文標題 Dynamic Hysteresis Measurement of Magnetic Nanoparticles with Aligned Easy Axes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Magnetics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 55-61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3379/msjmag.1803R009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Guannan Shi, Suko Bagus Trisnanto, Keita Nakai, Shin-ichi Yusa, Tsutomu Yamada, Satoshi Ota, and Yasushi Takemura	4. 巻 42
2. 論文標題 Evaluation of Dispersibility in Liquid and AC Magnetization Properties of Polyion Complex-Coupled Magnetic Nanoparticles	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Magnetics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 41-48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3379/msjmag.1803R007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tomohiro Aoto, Katsuki Takahashi, Hiroki Hoshiyama, Yuta Yoshioka, Tsutomu Yamada, Satoshi Ota, Yoshio Ikehata, Sotoshi Yamada, Yasushi Takemura	4. 巻 137
2. 論文標題 Specific Loss Power of Magnetic Particles for Hyperthermia Excited by Pancake-type Applicator	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A (基礎・材料・共通部門誌)	6. 最初と最後の頁 476-480
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.137.476	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ota Satoshi, Takemura Yasushi	4. 巻 10
2. 論文標題 Evaluation of easy-axis dynamics in a magnetic fluid by measurement and analysis of the magnetization curve in an alternating magnetic field	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/APEX.10.085001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -



〔学会発表〕 計43件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 19件）

1. 発表者名 田中 靖也, 平野 陽豊, 二川 雅登, 大多 哲史
2. 発表標題 高調波解析による磁気粒子イメージングにおける解像度向上
3. 学会等名 日本材料学会東海支部第14回学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大多哲史, 竹村泰司
2. 発表標題 磁性ナノ粒子のネール・ブラウン緩和のパルス磁場印加による実験的観測
3. 学会等名 マグネティックス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Guannan Shi, Mamoru Ishikawa, Seiji Takeuchi, Satoshi Ota, Tsutomu Yamada, Yasushi Takemura
2. 発表標題 Specific loss power of magnetic nanoparticles with various particle orientation for hyperthermia
3. 学会等名 The Forth International Workshop on Magnetic Bio-Sensing (IWBS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shota Kobayashi, Tsuyoshi Yamaminami, Suko Bagus Trisnanto, Hibiki Sakakura, Mahoto Takeda, Tsutomu Yamada, Satoshi Ota, Yasushi Takemura
2. 発表標題 AC magnetization characteristics of oriented ferromagnetic single crystal nanocube in copper matrix
3. 学会等名 The Forth International Workshop on Magnetic Bio-Sensing (IWBS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuta Oka, Tsutomu Yamada, Satoshi Ota, Yasushi Takemura
2. 発表標題 Electrical properties of magnetic nanoparticles depending on their fluid pH and zeta potential
3. 学会等名 The Forth International Workshop on Magnetic Bio-Sensing (IWMB2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsuyoshi Yamaminami, Shota Kobayashi, Loi Tonthat, Kazutaka Mitobe, Shin Yabukami, Tsutomu Yamada, Satoshi Ota, Yasushi Takemura
2. 発表標題 Evaluation of AC magnetization and heat dissipation of Au-coated Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particles
3. 学会等名 The Forth International Workshop on Magnetic Bio-Sensing (IWMB2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Ota, Yasushi Takemura
2. 発表標題 Dynamics of magnetization and easy axis of magnetic nanoparticles for magnetic particle imaging
3. 学会等名 The Forth International Workshop on Magnetic Bio-Sensing (IWMB2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Ota, Kizuku Nishimoto, Tsutomu Yamada, Yasushi Takemura
2. 発表標題 Second harmonic response of magnetic nanoparticles enhanced by a static bias magnetic field perpendicular to an alternating excitation field for magnetic particle imaging
3. 学会等名 Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (2019 MMM Conference) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石川真守, 竹内誠治, 史冠男, 大多哲史, 吉田敬, 圓福敬二, 加藤一郎, 野原聡, 山田努, 竹村泰司
2. 発表標題 磁気分離したフェルカルボトランのSLP
3. 学会等名 第43回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林昌太, 山南豪, 坂倉響, 竹田真帆人, 山田努, 大多哲史, 竹村泰司
2. 発表標題 Cuマトリクス中に配向する強磁性単結晶ナノキューブの交流磁化特性
3. 学会等名 第43回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山南豪, 小林昌太, L. Tonthat, 水戸部一孝, 藪上信, 山田努, 大多哲史, 竹村泰司
2. 発表標題 AuコートFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 粒子の交流磁化特性と発熱特性
3. 学会等名 第43回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大多哲史, 竹村泰司
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第43回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大多哲史, 竹村泰司
2. 発表標題 単一粒子に注目したバイオ医療用磁性ナノ粒子の磁化ダイナミクス
3. 学会等名 マグネティックス/リニアドライブ合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Ota, Yu Ichikawa, Ichiro Kato, Satoshi Nohara, and Yasushi Takemura
2. 発表標題 Core and hydrodynamic sizes dependence of harmonic signal in blood-pooling magnetic nanoparticles
3. 学会等名 9th International Workshop on Magnetic Particle Imaging IWMPI 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大多哲史、竹村泰司
2. 発表標題 磁性ナノ粒子の磁化ダイナミクスと診断治療応用
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Ota
2. 発表標題 Functionalized magnetic nanoparticles for biomedical application
3. 学会等名 International conclave for the Advancements in Bio, Chemical & Pharmaceutical Technologies Bioflair 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大多哲史
2. 発表標題 がん治療診断，再生医療に向けた磁性ナノ粒子の応用
3. 学会等名 日本材料学会 第52回生体・医療材料部門委員会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu Ichikawa, Satoshi Ota, Yasushi Takemura
2. 発表標題 Effect of particle structure and hydrodynamic size of blood-pooling magnetic nanoparticles on harmonic signal intensity in magnetic particle imaging
3. 学会等名 Joint MMM-Intermag Conference (Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM) and IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG)) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kizuku Nishimoto, Suko Bagus Trisnanto, Tsutomu Yamada, Satoshi Ota, Yasushi Takemura
2. 発表標題 High intrinsic loss power of multi-core magnetic nanoparticles with long blood-pooling property for hyperthermia
3. 学会等名 Joint MMM-Intermag Conference (Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM) and IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG)) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Guannan Shi, Suko Bagus Trisnanto, Tsutomu Yamada, Satoshi Ota, Yasushi Takemura
2. 発表標題 High biocompatibility and specific loss power of magnetic nanoparticles for hyperthermia
3. 学会等名 Joint MMM-Intermag Conference (Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM) and IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG)) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Ota and Yasushi Takemura
2. 発表標題 Analysis on magnetization dynamics of magnetic nanoparticles for hyperthermia
3. 学会等名 The Third International Workshop on Magnetic Bio-Sensing (IWBS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yu Ichikawa, Tsutomu Yamada, Satoshi Ota, Yasushi Takemura
2. 発表標題 Dependence of harmonic signal intensity in magnetic particle imaging on particle size
3. 学会等名 The Third International Workshop on Magnetic Bio-Sensing (IWBS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Guannan Shi, Suko Bagus Trisnanto, Tsutomu Yamada, Satoshi Ota, Yasushi Takemura
2. 発表標題 Specific loss power of biocompatible magnetic nanoparticles for hyperthermia
3. 学会等名 The Third International Workshop on Magnetic Bio-Sensing (IWBS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 峰松 泰浩, 山本 将也, 大多 哲史, 平野 陽豊, 小松 満, 二川 雅登
2. 発表標題 土中水分量広範囲計測に向けた精密時間同期が不要なインピーダンス計測に関する研究
3. 学会等名 第35回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上村 深介, 大石 竜太, 大多 哲史, 平野 陽豊, 二川 雅登
2. 発表標題 感応膜ドリフト抑制に向けたトストライプゲート型半導体pHセンサの開発
3. 学会等名 第35回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大多 哲史, トリスナント・スコバグース, 竹村 泰司
2. 発表標題 液中磁性ナノ粒子の磁化・容易軸ダイナミクス
3. 学会等名 第42回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 史冠男, 竹田遼二, 西本築, トリスナント・スコバグース, 山田努, 大多 哲史, 竹村 泰司
2. 発表標題 Resovistの磁化容易軸配向によるSLP向上
3. 学会等名 第42回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Yoshida, Satoshi Ota, Takuru Nakamura, Ryoji Takeda, Yasushi Takemura, Ichiro Kato, Satoshi Nohara, and Keiji Enpuku
2. 発表標題 Evaluation of harmonic magnetization properties of clinical magnetic nanoparticles for magnetic particle imaging
3. 学会等名 第42回 日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大多哲史, 竹村泰司
2. 発表標題 実測に基づいた磁性ナノ粒子の磁化・容易軸ダイナミクスの解析
3. 学会等名 マグネティクス研究会「ナノスケール構造磁性体, 永久磁石, 磁性材料, 磁気応用一般」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上村溪介, 大石竜太, 大多哲史, 平野陽豊, 二川雅登
2. 発表標題 長期pH 計測に向けたストライプゲート型pH センサの提案
3. 学会等名 平成30年度E部門総合研究会(電気学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasushi Takemura, Satoshi Ota
2. 発表標題 Magnetic Hyperthermia using Magnetic Nanoparticles -for Maximizing Temperature Rise-
3. 学会等名 5th International Conference of Asian Union of Magnetics Societies (IcAUMS 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Guannan Shi, Ryoji Takeda, Kizuku Nishimoto, Suko Bagus Trisnanto, Tsutomu Yamada, Satoshi Ota, Yasushi Takemura
2. 発表標題 Enhanced specific loss power from Resovist achieved by aligning magnetic easy axes of nanoparticles for hyperthermia
3. 学会等名 12th International Conference on the Scientific and Clinical Applications of Magnetic Carriers (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 Satoshi Ota, Yuki Matsugi, Takeru Nakamura, Ryoji Takeda, Yasushi Takemura, Ichiro Kato, Satoshi Nohara, Teruyoshi Sasayama, Takashi Yoshida, Keiji Enpuku
2. 発表標題 Effects of size and anisotropy of magnetic nanoparticles associated with dynamics of easy axis for magnetic particle imaging
3. 学会等名 12th International Conference on the Scientific and Clinical Applications of Magnetic Carriers (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Matsugi, Satoshi Ota, Takeru Nakamura, Ryoji Takeda, Yasushi Takemura, Ichiro Kato, Satoshi Nohara, Teruyoshi Sasayama, Takashi Yoshida, Keiji Enpuku
2. 発表標題 Evaluation of magnetic particle imaging using blood-pooling magnetic nanoparticles
3. 学会等名 8th International Workshop on Magnetic Particle Imaging (IWMPI) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Satoshi Ota
2. 発表標題 Evaluation of magnetization properties of magnetic nanoparticles in liquid state and cellular environment by measurement of magnetization curves
3. 学会等名 The Second International Workshop on Magnetic Bio-Sensing IWMS (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大多哲史, 大橋成美, 竹村泰司
2. 発表標題 細胞培養液中に分散させたマルチコア磁性ナノ粒子の磁化特性評価
3. 学会等名 第41回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 西本築, 大多哲史, 山田努, 竹村泰司
2. 発表標題 励磁方向に垂直な磁性ナノ粒子の交流磁化測定
3. 学会等名 第41回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹田遼二, 大多哲史, 山田努, 竹村泰司
2. 発表標題 磁化容易軸を配向させた磁性ナノ粒子の交流磁化特性評価
3. 学会等名 第41回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 市川裕, 大多哲史, 竹田遼二, 山田努, 加藤一郎, 野原聡, 吉田敬, 圓福敬二, 竹村泰司
2. 発表標題 血中滞留の長い磁性ナノ粒子のMPI高調波信号とその粒径・粒子構造依存
3. 学会等名 第41回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松木優樹, 中村啄流, 大多哲史, 竹田遼二, 竹村泰司, 加藤一郎, 野原聡, 笹山瑛由, 吉田敬, 圓福敬二
2. 発表標題 血中滞留の長い磁性ナノ粒子のMPI画像
3. 学会等名 第41回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 青戸知広, 山田努, 大多哲史, 池畑芳雄, 山田外史, 竹村泰司
2. 発表標題 ハイパーサーミア用人体サイズコイルの磁場・電場の効果
3. 学会等名 第41回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 史冠男, トリスナント・スコバグース, 中井啓太, 遊佐真一, 山田努, 大多哲史, 竹村泰司
2. 発表標題 磁性PIC会合体の液中分散と交流磁化特性の評価
3. 学会等名 第41回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. B. Trisnanto, G. Shi, R. Takeda, T. Yamada, S. Ota, Y. Takemura
2. 発表標題 Relaxation responses of magnetic nanoparticles immobilized by hydrocolloid polymer (agar)
3. 学会等名 第41回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

静岡大学大多研究室ホームページ  
<https://wpp.shizuoka.ac.jp/eng-e-otalab/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----