

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24310071

研究課題名(和文)量子ビームマルチスケール評価法を用いた癌温熱治療中に生じる散逸構造の解明

研究課題名(英文) Study on dissipative structures of magnetic nanoparticles in large alternating magnetic fields using small angle scattering technique

研究代表者

間宮 広明 (Hiroaki, MAMIYA)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・先端材料解析研究拠点・主幹研究員

研究者番号：30354351

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：磁性流体ハイパーサーミア治療に関して高周波磁場照射下での磁性ナノ粒子の振舞についてシミュレーションを行い、従来の通念とはかけ離れた非平衡定常構造が現れることを見出した。そこで、粒径・形状を制御され素性の明らかなマグネタイトナノ粒子を合成し、それらの振舞がシミュレーションの予測と一致するかどうかを、透過力の高い量子ビームを用いたマルチスケール評価法で検証し、癌温熱療法 of 最適設計に必要な知見を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have predicted that novel dissipative structures of magnetic nanoparticles are formed during hyperthermia treatment. For verifying this finding, we have prepared monodisperse magnetite nanoparticles and observed small angle scattering of the nanoparticles in the large alternating magnetic field. The knowledge obtained here sheds new light on the design of targeted magnetic hyperthermia treatments.

研究分野：磁気物理

キーワード：磁性ナノ粒子 がん温熱療法 非平衡定常構造 高周波磁場 磁鉄鉱

1. 研究開始当初の背景

磁性ナノ粒子の磁気損失を用いた癌温熱療法は、モノクローナル抗体との複合化により「みえない転移癌」に対する低副作用の治療法として古くから期待されてきたが、その利用が現実味を帯びてきたのは分子標的化合物の開発が進み、ヒートショックタンパク質の解明が進んだ最近のことである。この間、昇温の癌組織に対する効果に関心が集まり、発熱の物理的メカニズムについて議論が深まることはなかった。すなわち、磁性ナノ粒子の交流磁場(100 kHz 帯)による磁化反転や粒子自身の回転について、零磁場極限で成り立つ熱平衡状態からの線形応答や零温度極限で成り立つ純力学模型に基づいておおまかな議論がなされてきた。しかしながら、実際の磁性ナノ粒子の発熱挙動には、こうした単純な模型を逸脱した振舞が観測されている。

そこで、代表者らは、癌温熱療法条件下、有限温度の膜結合固定環境及び粘性流動環境下で孤立した磁性ナノ粒子に大振幅交流磁場を印加した際の振舞について熱活性型磁化反転を取り入れた粒子回転(Brownian Dynamics)シミュレーションを初めて試みた。その結果、例えば、粘性流動可能な強磁性体ナノ粒子に大振幅交流磁場を印加した場合、ゼーマンエネルギーの観点から磁場方向に磁化容易軸が配向した構造が現れるはずであるが、振幅が異方性磁場より小さければ、自由エネルギーの大小にかかわらず磁場方向に垂直な面に磁化容易軸が配向することが予測された。そして、この動的構造形成の結果、強磁性体ナノ粒子のヒステリシス損失が最大となる磁場振幅は、固定され回転できない場合より、高磁場側にシフトしてしまうと計算された。このように、散逸をともなう動的構造の形成は、磁気損失を最大化する条件に大きな影響を与えることがわかった。

大量の熱の散逸による加熱治療を目的としたこの系での自由エネルギーに束縛されない動的構造の形成はむしろ当然であるが、これまでの研究でこうした視点はすっぱり抜け落ちており、このシミュレーションの結果と比較できるような実験は皆無である。また、この孤立粒子の結果は、「ナノ粒子の密度が局所的に高く相互作用が無視できない場合、交流磁場中でも、静磁場中の熱平衡状態で生じるような鎖状構造と同様の構造が形成されるであろう」という従来の描像にも疑問を抱かせる。このように、磁性ナノ粒子からの発熱量に大きな影響を与える大振幅交流磁場下で生じる散逸をともなう動的構造の解明と最適な交流磁場照射条件の提示は、これから癌温熱療法が実用化を目指し設計を詰めていく段階で必須の知見であるばかりでなく、磁場に対する磁性粒子の応答に関してこれまでの平衡状態に立脚する見方に一石を投じるといって意味で学術的にも興味深い。

2. 研究の目的

本研究の目的は、詳細な議論に耐えられる粒径・形状の揃った素性の分かった磁性ナノ粒子を合成し、それらが癌温熱療法に用いられるような交流磁場照射条件下でのシミュレーションにより予測されたような特異な動的構造を形成するかどうかを、透過力の高い量子ビームを用いたマルチスケール評価法で明らかとすることで、予測の妥当性を見極めることにある。そして、こうして検証されたシミュレーションと実際の実験結果を相補的に考察することで、治療に用いる磁性ナノ粒子のサイズや形態、照射する交流磁場の強度や周波数に関して最適設計を行うための基礎的知見を確立する。

3. 研究の方法

本研究の主題である動的構造は、各ナノ粒子固有の磁気異方性に左右される磁化反転と周囲の粘性に支配される粒子回転の協調と競合が有限温度の大振幅交流磁場中で生み出す現象である。したがって、その厳密な検証には、各々のナノ粒子の磁気異方性の制御が不可欠である。ところが、近年のナノテクノロジーの発展にともなう粒径・形状の制御技術の飛躍的な向上にもかかわらず、粒径・形状と磁気異方性の関係はあいまいなままである。数千年前からよく知られ癌温熱療法に最もよく用いられるマグネタイトナノ粒子でさえ、その磁気異方性の起源が結晶磁気異方性にあるのか形状磁気異方性にあるのかすら明らかとなっていない。そこで、粒径・形状が制御された一連のマグネタイトナノ粒子を準備し、その磁気異方性について従来の見方を検証し、その本質を探る。

次に、こうして素性を明らかとした磁性ナノ粒子を希薄に孤立・分散させ、癌温熱療法に用いられるような交流磁場照射条件下でのマグネタイトナノ粒子の配向・配列における動的構造を明らかとし、我々のシミュレーション予測の原理的な検証を行う。上述の研究で準備したナノ粒子において結晶磁気異方性が卓越している場合には主に回折法を用いて、形状磁気異方性が卓越している場合には小角散乱法を用いて、大振幅高周波交流磁場中での磁化容易軸の配向状態を推定し、その結果によりシミュレーションの妥当性を検討する。そしてシミュレーションの有用性が明らかとなった場合には、それをもって観測結果が欠けているところを補い、癌温熱療法の本格的な実用化に必須の発熱効率の高い磁性ナノ粒子の粒径・形状及び励磁条件に関する基礎的知見を確立する。

4. 研究成果

まず、磁性ナノ粒子の合成に関しては、オレイン酸とオレイルアミンを用いた無溶媒熱分解法により、これまで作製が難しかった粒径15-20nmのマグネタイトナノ粒子をサイズを制御して合成することに成功した。また、

形状についても等方的な粒子に加え、立方体形状の粒子や三角板上の粒子など様々な形状のマグネタイトナノ粒子の製作も可能となった。しかしながら、こうした、従来の倍を上回るサイズでは粒径の6乗に比例して増大する粒子間の双極子相互作用の影響が極めて大きく、その本質的な磁気異方性が粒子間の相互作用に隠れ、その詳細を議論することができなかった。そこで、この粒子間相互作用の影響を排除して磁気異方性の議論を進めるために、作製した粒子をシリカで十分に被覆しマグネタイトナノ粒子間の距離を確保することを試みた。具体的には、シクロヘキサミンに分散させた酸化鉄ナノ粒子溶液にアンモニア水とオルトケイ酸テトラエチルを加え攪拌してシリカシェルを形成させた。この際の混合比や反応時間その他を調節することで、数nmから数十nm範囲で層厚を制御し、かつ一つのシリカシェルに一つのマグネタイトナノ粒子を内包する一連の試料の合成に成功した。こうして得られたコアシェルナノ粒子の First Order Reversal Curve を測ると、粒子間の相互作用磁場はシリカ層厚の増大とともに減少し、層厚が20nm、すなわち粒子間隔が50nmを超えると概ね消失することが明らかとなった。この相互作用の影響を受けないマグネタイトナノ粒子は、結晶構造が立方晶であるにもかかわらず、一軸異方性で極めてよく説明できる一連の振舞を示し、その起源が粒子形状の非等方性に関連した磁気異方性に由来することが明らかとなった。

次に、交流磁場照射条件下でのマグネタイトナノ粒子の配向・配列のその場観察に関しては、既設の小角散乱装置のX線源を透過力の大きなモリブデンの特性X線源に交換し、それを平行ビームに収束させるX線ミラーを取り付けた。また、試料位置に、ファインメットまたはソフトフェライトコアを共振回路に組み込んだ高周波磁場照射機構を付け加え、交流磁場照射中溶液ナノ構造その場計測装置として完成させた。最大照射磁場振幅は、最終的に400 Oe、周波数は100 kHzである。そして、実際にこれを用いて広い磁場強度範囲で直流・交流磁場中のマグネタイトナノ粒子の再配列・配向による構造因子・形状因子の変化の観察を行った。この結果を前述のシミュレーションの予測と比較したところ、定性的には概ね一致するもの細部ではかなりの相違がみられた。そこで、保磁力ごとの残留熱減衰曲線等を用いて詳細な分析を行い、この差異が、同じサイズのマグネタイトナノ粒子といっても合成法ごとに個々の粒子の挙動が異なっていることに由来していることが示唆された。すなわち、癌温熱療法の最適設計を行い実際にそれを実現するには、本課題で明らかとした高周波磁場照射化の磁性ナノ粒子の配向・配列現象の知見に加えて、ナノ粒子内部の歪や表面磁気異方性の解明と制御が必要であることがわかった。

以上のような、癌温熱療法に関連した熱源であるグネタイトナノ粒子に関連した問題、またそれと対になる照射装置の必要なスペック、さらにはそこに生身の体が絡むことから生じる課題等は、これまでほとんど注目されていなかったものの、癌温熱療法の研究において極めて重要であるため、今回得られた成果を含め招待講演や解説等にまとめ周知を図った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 18 件)

- ① H. Mamiya, B. Jeyadevan: “Nonequilibrium magnetic response of anisotropic superparamagnetic nanoparticles and possible artifacts in magnetic particle image” PLOS ONE 10 (2015) e0118156-1 DOI: 10.1371/journal.pone.0118156 (査読有).
- ② H. Mamiya, B. Jeyadevan: “磁性流体の高調波応答とセンサへの応用の可能性” 平成26年度磁性流体連合講演会磁性流体連合講演会論文集 1 (2015) 12-15 (査読有).
- ③ I. Furukawa, K. Takahashi, Jhon L. Cuya, H. Mamiya, H. Miyamura, B. Jeyadevan: “ポリアクリル酸を被覆した粒径20~30nm単分散マグネタイトナノ粒子の合成” 平成26年度磁性流体連合講演会磁性流体連合講演会論文集 1 (2015) 16-17 (査読有).
- ④ M. Fukunaga, I. Furukawa, H. Mamiya, Jhon L. Cuya, T. Iwamoto, H. Miyamoto, B. Jeyadevan: “シリカコートマグネタイトナノ粒子の作製と特性評価” 平成26年度磁性流体連合講演会磁性流体連合講演会論文集 1 (2015) 17-20 (査読有).
- ⑤ H. Mamiya, M. Demura, H. Kitazawa: “Aging and rejuvenation in a ferromagnetic Ni₃Al” Eur. Phys. J. B 88 (2015) 114-1, DOI: 10.1140/epjb/e2015-50868-0 (査読有).
- ⑥ H. Mao, J. Li, D. M. Ida, N. Kawazoe, Y. Takeda, H. Mamiya, G. Chen: “Cellular effects of magnetic nanoparticles explored by atomic force microscopy” BIOMATERIALS SCIENCE 3 (2015) 1284-1290, DOI: 10.1039/c5bm00141b (査読有).
- ⑦ A. Nagao, T. Ishimoto, M. Koyama, H. Miyamura, J. Cuya, B. Jeyadevan, “Molecular Dynamics Study on Diffusion Property of Pt Atoms in Ni-Pt nanoparticle,” Journal of Computer Chemistry of Japan, 14 (2015)

- 83-84, <http://doi.org/10.2477/jccj.2015-0044> (査読有).
- ⑧ T. Matsumoto, K. Takahashi, K. Kitagishi, K. Shinoda, J. L. Cuya Huaman, J.-Y. Piquemal and B. Jeyadevan, "Dissolution and reduction of cobalt ions in the polyol process using ethylene glycol: identification of the active species and its role," *New Journal of Chemistry* 39, (2015) 5008-5018, DOI: 10.1039/C5NJ00669D (査読有).
- ⑨ Nagao, K. Higashimine, J. L. Cuya Huaman, T. Iwamoto, T. Matsumoto, Y. Inoue, S. Maenosono, H. Miyamura, B. Jeyadevan, "Formation of Pt decorated Ni/Pt nanocubes through low temperature atomic diffusion-time-resolved elemental analysis of nanoparticle formation," *Nanoscale*, 7, (2015) 9927-9934, DOI: 10.1039/C5NR01816A (査読有).
- ⑩ H. Mamiya, B. Jeyadevan: "Magnetic hysteresis loop in a superparamagnetic state" *IEEE Trans. Magn.* 50 (2014) 4001604-1, DOI: 10.1109/TMAG.2013.2274072 (査読有).
- ⑪ H. Mamiya, N. Tsujii, N. Terada, S. Nimori, H. Kitazawa: "Slow dynamics in the geometrically frustrated magnet ZnFe₂O₄: Universal features of aging phenomena in spin glasses" *Phys. Rev. B* 90 (2014) 014440-1, DOI: 10.1103/PhysRevB.90.014440 (査読有).
- ⑫ H. Mamiya: "Recent advances in understanding magnetic nanoparticles in AC magnetic fields and optimal design for targeted hyperthermia" *JOURNAL OF NANOMATERIALS* 2013 (2013) 752973-1, DOI: 10.1155/2013/752973 (査読有).
- ⑬ H. Mamiya and S. Nimori: "Aging in the ferromagnetic phase of terbium" *J. Phys.-Condes. Matter* 24 (2012) 336006-1, DOI:10.1088/0953-8984/24/3/336006 (査読有).
- ⑭ 間宮広明: "磁性ナノ粒子の交流磁場応答と選択的がん温熱療法" 月刊誌「マテリアル インテグレーション」25 (2012) 11-23, http://www.tic-mi.com/publ/mi_new.html (査読有).
- ⑮ D. Kodama, K. Shinoda, R. Kasuya, M. Doi, K. Tohji, and B. Jeyadevan, "Potential of sub-micron-sized Fe-Co particles for antenna applications," *J. Appl. Phys.*, 111, (2012) 07A331-1-07A331-3 (査読有).
- ⑯ K. Fukuda, S. Fujieda, K. Shinoda, S. Suzuki and B. Jeyadevan, "Low temperature synthesis of FePt alloy nanoparticles by polyol process" *J. of Phys: Conf. Series*, 352, (2012) 012020 (1-6) doi:10.1088/1742-6596/352/1/012020 (査読有).
- ⑰ J. L. Cuya Huaman, K. Sato, S. Kurita, T. Matsumoto, H. Miyamura and B. Jeyadevan, "Synthesis of copper nanoparticles by polyol/alcohol reduction method," *MRS proceedings* 1400 (2012) DOI: <http://dx.doi.org/10.1557/opl.2012.144> (査読有).
- ⑱ H. Mamiya, B. Jeyadevan: "Formation of non-equilibrium magnetic nanoparticle structures in a large alternating magnetic field and their influence on magnet" *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS* 48 (2012) 3258-3261, DOI:10.1109/TMAG.2012.2197675 (査読有).
- [学会発表] (計 31件)
- ① A. Nagao, T. Ishimoto, M. Koyama, H. Miyamura, J. Cuya, J. Balachandran Experimental and theoretical investigation on the formation of platinum decorated nickel nanocubes, The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2015. 2015/12/15~12/20 Hawaii, USA.
- ② 間宮広明, バラチャンドランジャヤデワン: "磁性流体がん温熱療法の可能性と課題: 物理の視点から" 平成27年度磁性流体連合講演会 2015/12/03-04 静岡大学浜松キャンパス, 静岡県浜松市.
- ③ T. Naito, J. Cuya, H. Yokoyama, Y. Ido, A. Yoshioka, Y. Iwamoto, H. Yamaguchi, K. Sato, H. Miyamura, B. Jeyadevan, "Preparation and Thermal Conductive Properties of Silver Nanowire Dispersed in Magnetic Functional Fluid," 2015 MRS Fall Meeting & Exhibit, 2015/11/29~12/04, Boston, USA.
- ④ S. Sugiyama, J. Cuya, S. Ida, D. Kodama, K. Sato, H. Miyamura, Y. Hirokawa, B. Jeyadevan, "Synthesis of Ag NWs Using Mono Alcohol - Silver Nitrate - Copolymer System," 2015 MRS Fall Meeting & Exhibit, 2015/11/29~12/04, Boston, USA.
- ⑤ J. L. Cuya Huaman, K. Kitagishi, T. Akiyama, H. Miyamura, M. Nuys, S. Muthmann, B. Jeyadevan, "Solution-Based Synthesis and Optical Property Evaluation of Cu₂ZnSn(S_{1-x}Se_x)₄ Nanoparticles," 2015 MRS Fall Meeting & Exhibit, 2015/11/29 ~ 12/04, Boston, USA.

- ⑥ 黒岩拓也, 太田浩司, ハワラティフ, 岸本幹雄, 柳原英人, 喜多英治, 間宮広明, 山本真平: “ナノ粒子分散体の交流磁化過程と直気特性の関係” 日本物理学会 2015 年秋季大会 2015/09/16-19 関西大学 千里山キャンパス 大阪府吹田市.
- ⑦ M. Fukunaga, I. Furukawa, Jhon Cuya, H. Mamiya and B. Jeyadevan, “Preparation and Magnetic Properties of Interaction-free Magnetite Nanoparticles,” ICM2015, 2015/07/05~10, Barcelona, Spain.
- ⑧ 間宮広明: “磁性ナノ粒子の高周波磁場に対する非線形非平衡応答シミュレーション” 日本物理学会第 70 回年次大会 2015/03/21-24 早稲田大学早稲田キャンパス, 東京都新宿区.
- ⑨ 間宮広明: “中性子散乱を利用した新しい軟磁性材料の研究” 平成 26 年度磁性材料研究会 2014/12/25 研究社英語センター大会議室, 東京都新宿区.
- ⑩ 間宮広明: “磁性ナノ粒子の非線形応答とその医療応用” 第 9 回機能性流体に関する公開研究会 2014/11/21 独立行政法人物質・材料研究機構 千現地区, 茨城県つくば市.
- ⑪ H. Mamiya, B. Jeyadevan: “磁性流体の高調波応答とセンサへの応用の可能性” 平成 26 年度磁性流体連合講演会 2014/11/20-21 独立行政法人物質・材料研究機構 千現地区, 茨城県つくば市.
- ⑫ I. Furukawa, K. Takahashi, Jhon L. Cuya, H. Mamiya, H. Miyamura, B. Jeyadevan: “ポリアクリル酸を被覆した粒径 20~30nm 単分散マグネタイトナノ粒子の合成” 平成 26 年度 磁性流体連合講演会 2014/11/20-21 独立行政法人物質・材料研究機構 千現地区, 茨城県つくば市.
- ⑬ M. Fukunaga, I. Furukawa, H. Mamiya, Jhon L. Cuya, T. Iwamoto, H. Miyamoto, B. Jeyadevan: “シリカコートマグネタイトナノ粒子の作製と特性評価” 平成 26 年度 磁性流体連合講演会 2014/11/20-21 独立行政法人物質・材料研究機構 千現地区, 茨城県つくば市.
- ⑭ 間宮広明, バラチャンドラン ジャヤデワン: “磁性ナノ粒子の非線形非平衡磁気応答とがんイメージングにおけるアーティファクト” 第 38 回日本磁気学会学術講演会 2014/09/02-05 慶應義塾大学日吉キャンパス, 神奈川県横浜市.
- ⑮ H. Mamiya, A. Seki, E. Kita, M. Tokunaga, B. Jeyadevan, T. Shinohara, K. Ohishi, J. Suzuki: “Nanostructural and magnetic studies on magnetic nanoparticles in large alternating magnetic fields” 2014 TJ Conf Magnetic Nanoparticles for Biomedical Application 2014/07/20-21 National Taiwan Normal University, 台北市, 台湾.
- ⑯ 間宮広明, 辻井直人, 寺田典樹, 二森茂樹, 北澤英明, 星川晃範, 石垣徹: “幾何学的にフラストレートした反強磁性体における特異なスローダイナミクスと高効率中性子粉末回折計を用いた時分割測定” 日本物理学会第 69 回年次大会 2014/03/27-30 東海大学湘南キャンパス, 神奈川県平塚市.
- ⑰ 間宮広明: “磁性ナノ粒子の非線形磁場応答・非平衡散逸とその医療応用” 第 9 回多元研-NIMS 連携ラボ公開シンポジウム 2014/03/14 東北大学 WPI 本館, 仙台.
- ⑱ 間宮広明, 高橋一真, バラチャンドラン ジャヤデワン, 篠原武尚, 大石一城, 鈴木淳市: “小角散乱による磁性流体のナノ構造解析” 日本中性子科学会第 13 回年会 2013/12/12-13 さわやかちば県民プラザ, 千葉県柏市.
- ⑲ 関淳史, 井坂大智, 菊地祐輔, 堀内あかり, 岸本幹雄, 間宮広明, 柳原英人, 喜多英治: “磁性流体の交流磁場中での磁化曲線と発熱特性” 平成 25 年度磁性流体連合講演会 2013/11/15-16 富山県民会館 富山県富山市.
- ⑳ H. Mamiya: “Multi-scale magnetic correlations in thermally assisted soft-magnetic phase of nano-granular films” Meeting on ferromagnetic amorphous and nano-crystalline material, 2013/10/04 東北大学 金属材料研究所, 仙台.
- 21 間宮広明, 大沼繁弘, 大沼正人, 鈴木博之, 藤森啓安: “ナノグラニューラ磁性薄膜における粒子間のスペロマグネティック秩序と熱アシスト型軟磁気特性” 第 37 回 日本磁気学会学術講演会 2013/09/03-06 北海道大学工学部, 札幌.
- 22 H. Mamiya, B. Jeyadevan: “Magnetic hysteresis loop in a superparamagnetic state” 3rd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications 2013/07/21-25 ホテル石庭, 山梨県笛吹市.
- 23 H. Mamiya, B. Jeyadevan: “Non-equilibrium structures of magnetic nanoparticles in AC magnetic fields” Conference for BioSignal and Medicine (CBSM) 2013, 2013/07/13-14 ホテル石庭, 山梨県笛吹市.
- 24 H. Mamiya, B. Jeyadevan: “Magnetic hysteresis loop in superparamagnetic nanoparticles and planar orientation of ferromagnetic nanoparticles in AC

- magnetic field” 8th International Conference on Fine Particle Magnetism, 2013/06/24-27, Place Armand Lanoux, Perpignan, フランス.
- 25 A. Mizuno, M. Takehara, H. Mamiya, J. Cuya, H. Miyamura, B. Jeyadevan, “Modified Solvent-free Thermal Decomposition Technique to Synthesize Monodispersed Magnetite Nanoparticles in Wide Size Range” 8th International Conference on Fine Particle Magnetism Perpignan 2013/06/24-27, Place Armand Lanoux, Perpignan, フランス.
- 26 H. Mamiya: “Supermagnetism in magnetic fluids and nanogranular soft-magnetic films” Supermagnetism Workshop 2013, 2013/05/24, National Institute for Materials Science, Tsukuba.
- 27 Hiroaki Mamiya, Influence of Non-equilibrium and Non-linear Magnetic Response in Large Alternating Magnetic Fields to Magnetic Particle Imaging, 11th International Conference on Ferrites 2013/4/15-2013/4/19 Okinawa Convention Center 沖縄県宜野湾市.
- 28 間宮広明: “磁性粒子イメージングにおける大振幅交流磁場への非線形非平衡応答” 平成 24 年度 磁性流体連合講演会 2012/11/29 同志社大学室町キャンパス, 京都府京都市.
- 29 H. Mamiya, B. Jeyadevan: “Non-equilibrium steady states of magnetic nanoparticles in alternating magnetic fields and the biomedical applications” 2nd International Conference Asian Union of Magnetics Societies 2012/10/02-05 Nara Prefectural New Public Hall, Nara, Nara.
- 30 間宮広明, バラチャンドランジャヤデワン: “がんの新しい温熱治療の際に生じる強磁性ナノ粒子の非平衡配向状態” 日本物理学会 2012 年秋季大会 2012/09/18-21 横浜国立大学, 横浜市.
- 31 間宮広明: “がん温熱治療中に生じる磁性ナノ粒子の非平衡定常配向構造と発熱特性” 第 43 回ナノバイオ磁気工学専門研究会 2012/06/01 中央大学駿河台記念館, 東京都千代田区.

[図書] (計 2 件)

- ① 間宮広明 他 : 磁気便覧 丸善 (2016) 11~17.
- ② 間宮広明 他 : 粉体工学ハンドブック 朝倉書店 (2014) 148~154.

[産業財産権]
○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

間宮 広明 (MAMIYA Hiroaki)
国立研究開発法人物質・材料研究機構・先端材料解析研究拠点・主幹研究員
研究者番号 : 30354351

(2) 研究分担者

寺田 典樹 (TERADA Noriki)
国立研究開発法人物質・材料研究機構・先端材料解析研究拠点・主任研究員
研究者番号 : 60442993

バラチャンドランジャヤデワン
(BALACHANDRAN Jeyadevan)
滋賀県立大学・工学部・教授
研究者番号 : 80261593

篠原 武尚 (SHINOHARA Takanao)
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・J-PARC センター・研究副主幹
研究者番号 : 90425629

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :