

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：11301
研究種目：若手研究
研究期間：2020～2022
課題番号：20K20210
研究課題名(和文)多機能型複合体マイクロ@ナノ磁性微粒子の研究開発と次世代癌磁気温熱療法への応用

研究課題名(英文)Development of multifunctional composite magnetic micro@nano particles and application to next generation cancer hyperthermia

研究代表者
TON・THAT LOI (TON THAT, LOI)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：90844499

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)：2020年度では、磁気温熱療法に適した高機能磁性微粒子の開発を目的とし、熱分解法で磁性ナノ粒子を新たに合成し、超常磁性を有する単分散酸化鉄ナノ粒子を得ることに成功した。さらに、簡易型自動定温加熱治療システムを開発することにも成功した。2021年度では、発熱効率を従来比4倍向上したResovistを用いた動物実験にて、高精度な温度制御を確立した。また、「がん診断・治療装置」に向けてハイブリッド金@酸化鉄ナノ粒子を新たに研究開発することにも成功した。2022年度では、強磁性共鳴に基づいたFe₃O₄@Auナノ粒子の超高速温度上昇率も初めて実験的に評価し、従来の磁気ハイパーサーミアよりも2桁高かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

癌は世界で主要な死因の一つであり、その治療技術の高度化は急務となっている。本研究により簡易型治療システムや高機能磁性ナノ粒子の開発を通じて、磁気温熱療法の研究開発の進展が期待される。また、これまでに極小で複数の機能を有する磁性微粒子が望ましいがん治療・診断などの用途に向けてナノ粒子を開発することは困難であった。本研究では、世界で初めて多機能型複合磁性粒子を開発した。この粒子は磁気温熱療法のみならず、がん画像診断等にも活用でき、その波及効果は著しく広い。これまで共鳴磁性を利用したFe₃O₄@Auナノ粒子による磁気温熱治療技術は確立されておらず、本研究と同様の試みは国内外でも類を見ない。

研究成果の概要(英文)：In the fiscal year 2020, we aimed to develop high-performance magnetic nanoparticles suitable for magnetic hyperthermia therapy. By employing a thermal decomposition method, the synthesis of magnetic nanoparticles was successfully achieved, resulting in monodisperse iron oxide nanoparticles exhibiting superparamagnetic properties. Furthermore, we succeed in developing a simplified automatic temperature-controlled heating treatment system. In 2021, through animal experiments utilizing Resovist, which achieved a four-fold improvement in heat generation efficiency, we established high-precision temperature control in vivo. Additionally, we succeeded in developing hybrid gold-iron oxide nanoparticles for cancer diagnostic and therapeutic applications. In 2022, we first demonstrated experimentally the ultra-fast temperature rise rate of Fe₃O₄@Au nanoparticles based on ferromagnetic resonance, surpassing conventional magnetic hyperthermia by two orders of magnitude.

研究分野：ものづくり技術

キーワード：磁気ハイパーサーミア 機能性磁性ナノ粒子 金ナノ粒子 酸化鉄ナノ粒子 磁気温熱治療装置 定温加熱制御 強磁性共鳴 ナノセラノスティクス

1. 研究開始当初の背景

癌は世界で主要な死因の一つであり、その治療技術の高度化は急務となっている。近年、癌細胞は正常細胞よりも熱感受性が高いことを利用した磁気温熱療法が次世代の癌治療法として国内外で注目されている。磁性微粒子を癌部位に集積させ、体外から高周波磁場を印加することで、癌部位を局所的に加熱(40-45°C)すると収縮される。この療法は手術・化学・放射線療法の癌の三大療法に比べ侵襲性や副作用が少なく、化学放射線療法と併用することで治療効果を増強する等の知見も報告されている。磁気温熱療法は1957年に癌治療として初めて試みられ、過去数十年間に実施され、大幅な進歩があり、神経膠芽腫腫瘍に関する臨床試験がいくつか成功を取っている。最近の進歩にもかかわらず、磁気温熱療法はまだがん治療の標準治療の一部になっておらず、従来の磁気温熱療法には依然として困難な障害が存在する。主な欠点は、ほとんどの磁性ナノ粒子の加熱効率が比較的低いため、効果的な治療効果を得るには大量の磁性ナノ粒子を直接注射する必要がある、潜在的な細胞毒性の問題を引き起こす可能性があることである。また、腫瘍または腫瘍付近の温度を正確に制御するには、速い応答時間で瞬時に治療温度に到達することが望ましい。このため、磁性ナノ粒子の加熱効率または加熱速度を向上させることが依然として強く望まれている。治療温度を高めれば、がんをより確実に死滅させることができるが、その周囲の正常組織も高温環境へ晒し、正常組織を損傷させる危険性がある。したがって、温熱療法の確立には、正常組織には害を及ぼさず、がん組織のみを治療できる温度や加熱時間の解明と温度制御システムの開発が求められる。

がん磁気治療効果を診断するために、コンピュータ断層撮影法(CT)と磁気共鳴画像法(MRI)が最も重要な2つのツールである。MRIは、優れた軟部組織のコントラスト、および機能的かつ分子的イメージング機能を提供するが、スキャン時間が長くなり、幾何学的精度が最適ではない。またコストが高く、実施可能な医療機関も限られている。一方CTは、軟部組織のコントラストが低く、放射線被曝に悩まされるが、高速なスキャン速度と高い空間分解能を得る事ができる。また、CT-MRI スキャナーを組み合わせることで、解剖学的小および機能的分子的イメージングを同時に可能にし、電離放射線への曝露を最小限に抑えることができる。これまでに磁気温熱治療とCT診断(またはCT-MRI組合せ)を同時に可能とするナノセラノスティクス剤が必要とされていたが、まだ実現には至っていない。磁性ナノ粒子の加熱効率は、外部から印加される磁場の周波数に比例する。これまでのところ、数百キロヘルツ範囲の磁場はMNPによって吸収され、その後ネールブラウン緩和および/またはヒステリシス損失によって解消され、比損失電力(SLP)または比吸収の値が報告されている。このメカニズムに基づくSAR値は10~1000 W/gである。一方、数ギガヘルツの比較的高い周波数で励起された強磁性共鳴(FMR)下での $\text{Fe}_3\text{O}_4@Au$ ナノ粒子の発熱効率は報告されていない。

2. 研究の目的

本研究では高機能磁性微粒子を開発すると共に、実用化に向けてこれまでに研究開発している磁気温熱治療システムを高度化することを目的としている。そこで、定温加熱制御できる磁気加熱システムを開発し、生体内での磁性流体の定温加熱制御を検討する。また、マウスを用いた動物実験では、磁気温熱療法の治療温度での定温加熱制御を評価する。さらに、がん診断・治療装置の実用化を目指し、この装置に使用する発熱体である酸化鉄ナノ粒子の表面に金コーティングしたハイブリッド金@酸化鉄ナノ粒子を開発する。強磁性共鳴(FMR)効果に基づいて、超小型の金でコーティングされた酸化鉄磁性ナノ粒子($\text{Fe}_3\text{O}_4@Au$ ナノ粒子)の超高速加熱速度を実験的に実証する。

3. 研究の方法

誘導加熱電源や光ファイバー温度計等を導入し、癌磁気温熱療法に向けた簡易型高周波誘導加熱システムを試作し、それを使用して合成した磁性ナノ粒子の発熱特性を評価した。さらに、PID制御機構を加えて自動定温加熱治療システムを開発した。磁気温熱療法に適した高機能磁性ナノ粒子の開発を目的とし、熱分解法で磁性ナノ粒子を新たに合成し、超常磁性を有する単分散酸化鉄ナノ粒子を得た。また、界面活性剤の添加や温度・時間調節などの合成条件を最適化することによりナノ粒子の粒径を制御できた。さらに、合成した磁性ナノ粒子のサイズと形状を透過電子顕微鏡により観察し、振動試料型磁力計により磁化特性を測定し、SQUID式磁気特性測定システムにより直流・交流磁化特性(温度依存性も含む)を評価した。 $\text{Fe}_3\text{O}_4@Au$ ナノ粒子は最初に様々な Fe_3O_4 ナノ粒子をシードとして合成し、次にシードの存在下で酢酸金を還元することにより、合成した。次に、合成したナノ粒子を透過型電子顕微鏡(TEM)、エネルギー分散型X線分光法(EDX)、X線回折(XRD)、および振動サンプル磁力計(VSM)分析によって特性を評価した。

強磁性共鳴および加熱効率測定用のために実験セットアップを構築した。強磁性共鳴を測定するには、ネットワークアナライザによって生成された磁性ナノ粒子の共振を駆動する高周波磁場が、マイクロストリップラインプローブを介して送信される。プローブは、直流電源によ

って生成される直流場がマイクロストリップ ラインプローブの長手方向と平行に印加できるように、ヘルムホルツ コイルの間に配置された。乾燥した磁性ナノ粒子をプローブ上に置くと、高周波磁場からのエネルギーを吸収することによって強磁性共鳴を誘発できる。直流磁場は 0 から 1600 Oe まで 200 Oe ずつ増加した。強磁性による加熱効率を評価するために、マイクロ波信号発生器によって生成された固定強度 40e および異なる周波数 3 および 4GHz の RF 磁場をプローブに印加した。

4. 研究成果

生体での定温加熱制御での検討を目的として、はじめに医用磁性流体 Resovist®の発熱特性の向上について調べた。Resovist®の体積当たりの粒子数を増やした試料を作製し、発熱特性が向上することを確認した。その発熱量は粒子数に比例して増加する。次に、磁性流体の加熱制御に関して、ジューグランドニコルスのステップ応答法と CHR 法の比較をおこなった。ステップ応答を用いることで磁性流体の発熱特性をモデリングでき、制御性に優れた PID パラメータを取得できることを示した。また、本研究で用いた定温加熱制御システムが発熱特性の異なる磁性流体を制御可能であることがわかった。さらにマウスを用いた動物実験にて、生体内での定温加熱制御に取り組む、定常状態での温度の標準偏差が 0.05 °C という定温加熱制御を確立した (図 1)。

がん診断・治療技術を可能とするナノセラノスティクス剤 ($\text{Fe}_3\text{O}_4@Au$ ナノ粒子) を新たに研究開発し、*in vitro* で発熱効率等を評価し、良好な結果が得られた。発熱特性をより高める目的で、異なるサイズの Fe_3O_4 ナノ粒子の酸化鉄/金複合ナノ粒子を合成した。 Fe_3O_4 ナノ粒子は、熱分解法により合成し、平均粒径が約 5nm、10nm、および 13nm の 3 種類を作製した (図 2)。それを 190°C に維持し、酢酸金を還元することにより、 Fe_3O_4 ナノ粒子の表面に金を堆積させることに成功した。 Fe_3O_4 ナノ粒子サイズが大きくなるにつれ、磁化の大きさや加熱効率 (SAR) が増加することも検証できた。 Fe_3O_4 の粒径が約 13nm で 74.7emu/g の磁化の大きさであり、5nm (52.4emu/g) の物に比較し約 1.4 倍になった。また、周波数 267kHz で磁界の大きさが 25.7kA/m の印加磁界の下で発熱効率を調べると、最大 136.7W/g (Fe_3O_4) および 23.4W/g ($\text{Fe}_3\text{O}_4@Au$) と高い値が得られた。これは、粒径 5nm に比べ 2 倍以上高い値となり、粒径が大きいほど SAR が高いことが検証できた。また、CT 造影剤として高いコントラスト (CT 値 = 851HU) を示した。これらの成果により、磁気ハイパーサーミアへの応用において、より優れた特性のナノセラノスティクス剤を得ることができ、この材料の潜在的な能力が十分あることを示すことができた。

当初計画に加えて、強磁性共鳴 (FMR) 効果に基づいた $\text{Fe}_3\text{O}_4@Au$ ナノ粒子の超高速温度上昇率も実験的に求めた (図 3)。構築されたセットアップを使用して、FMR でのナノ粒子の強磁性共鳴と温度上昇率を評価した。 $\text{Fe}_3\text{O}_4@Au$ ナノ粒子とそれらのコーティング前の Fe_3O_4 ナノ粒子の共振周波数は数 GHz であり、Kittel の式を用いて良好なフィッティングできた。 $\text{Fe}_3\text{O}_4@Au$ ナノ粒子の共振周波数は、特定の DC 磁場で Fe_3O_4 ナノ粒子の共振周波数よりもわずかに低くシフトした。初期温度上昇率は、FMR 条件の対応する DC 磁場で最大値に達した (たとえば $f_{AC}=4\text{GHz}$ の RF 磁場では $H_{DC}=1200\text{Oe}$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@Au$ および Fe_3O_4 ナノ粒子では $H_{AC}=4\text{Oe}$ で 1.3 および 3.9K/s)。これは、従来の磁気ハイパーサーミアの Neel-Brownian 緩和の値よりも 2 桁高かった。

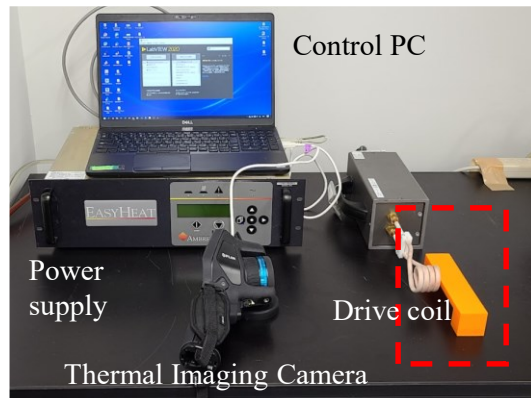


Fig.1 PID-based automatic heating-temperature control system.

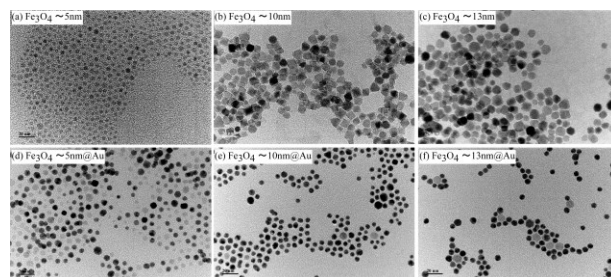


Fig.2 TEM images of Fe_3O_4 NPs with (a)~5nm, (b)~10nm, (c)~13nm, and their gold-coated $\text{Fe}_3\text{O}_4@Au$ NPs (d), (e), (f), respectively. All scale bar 20 nm.

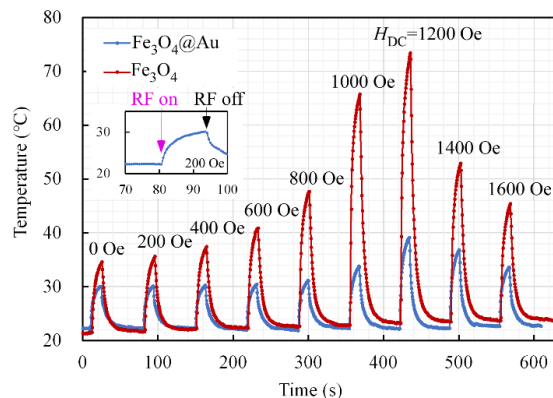


Fig.3 Temperature increments under resonant RF magnetic field of $f_{AC}=4\text{GHz}$ and $H_{AC}=4\text{Oe}$ for different DC field strengths of $H_{DC}=0\sim 1600\text{Oe}$ with a step of 200 Oe.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 鹿野 晃弘、トンタット・ロイ、桑波田 晃弘、アリウンブヤン・スフバートル、小玉 哲也、藪上 信	4. 巻 6
2. 論文標題 磁気温熱療法の定温加熱制御システムを用いた動物実験	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本磁気学会論文特集号	6. 最初と最後の頁 100 ~ 104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20819/msj.tmsj.22TR519	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 Yoneyama Tsuyoshi, Kuwahata Akihiro, Murayama Toru, Tonthat Loi, Yabukami Shin, Sato Yuya, Teramura Yuji, Ikeda-Ohtsubo Wakako, Ogawa Tomoyuki	4. 巻 58
2. 論文標題 Simplified Fabrication of Magnetic Nanoparticles With Directly Adsorbed Antibodies for Bacteria Detection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2022.3168360	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 Tonthat Loi, Yamamoto Yoshiyuki, Mitobe Kazutaka, Yabukami Shin	4. 巻 10
2. 論文標題 Effect of applied magnetic field on permeability and heating efficiency of multifunctional micro/nano-magnetic particles for hyperthermia therapy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 125324 ~ 125324
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/9.0000123	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 Tonthat Loi, Mitobe Kazutaka, Yabukami Shin	4. 巻 57
2. 論文標題 Development of an Automatic Localization System of Magnetic Particles for Hyperthermia Therapy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/tmag.2020.3008490	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 Tonthat Loi, Aki Fumitaka, Mitobe Kazutaka, Yabukami Shin, Yamamoto Yoshiyuki	4. 巻 82
2. 論文標題 Development of Elemental Technologies for Magnetic Hyperthermia in Cancer Treatment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IFMBE Proceedings, 11th Asian-Pacific Conference on Medical and Biological Engineering (APCMBE 2020)	6. 最初と最後の頁 272 ~ 277
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-66169-4_33	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 Shikano Akihiro, Tonthat Loi, Yabukami Shin	4. 巻 16
2. 論文標題 A Simple and High Accuracy PID Based Temperature Control System for Magnetic Hyperthermia Using Fiber Optic Thermometer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 1 ~ 3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/tee.23361	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 Yabukami S., Nozawa K., Tonthat L., Okita K., Sai R.	4. 巻 57
2. 論文標題 Impact of Complex Permeability Measurements Up to Millimeter-Wave Frequency Range	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/tmag.2020.3011971	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 Tonthat Loi, Kimura Mone, Ogawa Tomoyuki, Kitamura Narufumi, Kobayashi Yoshio, Gonda Kohsuke, Yabukami Shin	4. 巻 13
2. 論文標題 Development of gold-coated magnetic nanoparticles as a theranostic agent for magnetic hyperthermia and CT imaging applications	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 025239 ~ 025239
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/9.0000592	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 Tonthat Loi, Murayama Toru, Kobayashi Nobukiyo, Yabukami Shin, Ikeda-Ohtsubo Wakako, Arai Ken Ichi	4. 巻 13
2. 論文標題 A simple antigen-antibody reaction using ultrasmall FeCo nanoparticles	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 025009 ~ 025009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/9.0000569	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 Pu Youcheng, Tonthat Loi, Murayama Toru, Okita Kazuhiko, Yabukami Shin	4. 巻 13
2. 論文標題 Method for measuring magnetic susceptibility of magnetic nanoparticles up to millimeter-wave frequency range	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 025129 ~ 025129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/9.0000589	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 Arackal Sarath, Nozawa Kouhei, Kahmei Ralandinliu, Loi Ton That, Yabukami Shin, Shivashankar S. A., Yamaguchi Masahiro, Bhat Navakanta, Sai Ranajit	4. 巻 121
2. 論文標題 Resonance frequency above 20 GHz in superparamagnetic NiZn-ferrite	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 062402 ~ 062402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0102965	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 Pu Y., Zhao H., Murayama T., Tonthat L., Okita K., Watanabe Y., Yabukami S.	4. 巻 47
2. 論文標題 Method for Rapid Detection of Bacteria Using Magnetic Nanoparticle Aggregates	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Magnetics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 66 ~ 69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3379/msjmag.2305R003	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 Loi Ton That、桑波田 晃弘、藪上 信	4. 巻 143
2. 論文標題 研究グループ 紹介：東北大学 大学院医工学研究科・工学研究科 藪上・桑波田研究室	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 NL4_4 ~ NL4_4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.143.NL4_4	査読の有無 無
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 Uchiyama Naomi、Shibata Yosei、Tonthat Loi、Matsuura Yuji	4. 巻 62
2. 論文標題 Improvement of near-infrared photoelectric conversion efficiency of solution-coated (C8BTBT)(F4TCNQ) films by adding Fe304 nanoparticles	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 056501 ~ 056501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acceec	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 -

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 Loi Tonthat
2. 発表標題 Development of Magnetic Hyperthermia Application: Current Status and Future Directions
3. 学会等名 Global Summit and Expo on Magnetism and Magnetic Materials (GSEMMM2021, Paris, France) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鹿野 晃弘, トンタット ロイ, 桑波田 晃弘, アリウンブヤン スフバートル, 小玉 哲也, 藪上 信
2. 発表標題 生体内における磁気温熱療法の定温加熱制御
3. 学会等名 令和3年度スピニクス特別研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Loi Tonthat
2. 発表標題 Development of magnetic hyperthermia system for cancer thermotherapy using functionalized magnetic particles
3. 学会等名 2nd World Nanotechnology Summit (Worldnano-2021, Miami, USA) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Loi Tonthat
2. 発表標題 Development of Magnetic Hyperthermia Application for Cancer Treatment
3. 学会等名 2nd International Conference on Cancer & Oncology (Oncology 2021, Zurich, Switzerland) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Loi Ton That, Kazutaka Mitobe, Shin Yabukami
2. 発表標題 Temperature Dependence of DC and AC Magnetization of Magnetic Particles with Low Curie Temperature for Magnetic Hyperthermia
3. 学会等名 2022 Joint MMM-Intermag Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Yoneyama, A. Kuwahata, T. Murayama, L Tonthat, S.Yabukami, Y. Sato, Y. Teramura, W. Ikeda-Ohtsubo, T. Ogawa
2. 発表標題 Simplified fabrication of magnetic nanoparticles with directly adsorbed antibodies for bacteria detection
3. 学会等名 2022 Joint MMM-Intermag Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Loi Tonthat, Kazutaka Mitobe, Shin Yabukami
2. 発表標題 An automatic localization system of magnetic particles for hyperthermia in cancer treatment
3. 学会等名 The International Magnetics Conference (INTERMAG 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Loi Tonthat, Fumitaka Aki, Kazutaka Mitobe, Shin Yabukami, Yoshiyuki Yamamoto
2. 発表標題 Development of elemental technologies for magnetic hyperthermia in cancer treatment
3. 学会等名 11th Asian Pacific Conference on Medical and Biological Engineering (APCMBE 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Loi Tonthat, Yoshiyuki Yamamoto, Kazutaka Mitobe, Shin Yabukami
2. 発表標題 Effect of applied magnetic field on permeability and heating efficiency of multifunctional micro/nano-magnetic particles for hyperthermia therapy
3. 学会等名 2020 Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Loi Tonthat, Kazutaka Mitobe, Shin Yabukami
2. 発表標題 磁気温熱療法のための発熱体とその温度および位置の検出技術の開発
3. 学会等名 第44回日本磁気学会学術講演会(シンポジウム)(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 トントット ロイ, 鹿野 晃弘, 藪上 信
2. 発表標題 A Constant Temperature Control Technology for Hyperthermia Therapy using Magnetic Particles
3. 学会等名 第54回日本生体医工学会東北支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Loi Tonthat, Ryuichi Hirota, Taiga Kitamura, Kazuhiko Okita, Shin Yabukami
2. 発表標題 A Simple Localization Method of Magnetic Particles for Hyperthermia Therapy using Figure-8 Coil
3. 学会等名 The International Magnetics Conference (INTERMAG 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Loi Tonthat, Mone Kimura, Tomoyuki Ogawa, Narufumi Kitamura, Yoshio Kobayashi, Kohsuke Gonda, Shin Yabukami
2. 発表標題 Development of gold-coated magnetic nanoparticles as a theranostic agent for magnetic hyperthermia and micro-CT imaging applications
3. 学会等名 67th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2022) Minnesota, America (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Loi Tonthat, Toru Murayama, Nobukiyo Kobayashi, Shin Yabukami, Wakako Ikeda-Ohtsubo, Ken Ichi Arai
2. 発表標題 Synthesis and antigen-antibody reaction of ultrasmall FeCo nanoparticles
3. 学会等名 67th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2022) Minnesota, America (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tonthat Loi, Tomoyuki Ogawa, Shin Yabukami
2. 発表標題 Development of magnetic nanoparticles for biomedical applications
3. 学会等名 令和 4 年電気学会 基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Loi Tonthat, 小川智之, 北村成史, 小林芳男, 権田幸祐, 藪上 信
2. 発表標題 Development of gold-coated magnetic nanoparticles for magnetic hyperthermia and micro-CT imaging applications
3. 学会等名 第46回日本磁気学会学術講演会 (Shinshu University, Nagano)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 L. Tonthat, 村山 徹, 小林伸聖, 藪上 信, 大坪和香子, 荒井賢一
2. 発表標題 A simple antigen-antibody reaction using ultrasmlal FeCo nanoparticles
3. 学会等名 第46回日本磁気学会学術講演会 (Shinshu University, Nagano)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Loi Tonthat
2. 発表標題 Magnetic Hyperthermia Application for Cancer Treatment
3. 学会等名 2nd Global Summit and Expo on Magnetism and Magnetic Materials (GSEMM2022, Copenhagen, Denmark) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Loi Tonthat
2. 発表標題 Development of Magnetic Hyperthermia System for Cancer Therapy using Functionalized Magnetic Micro/Nano Particles
3. 学会等名 Symposium on World Cancer Research 2022 (SWCR 2022, Singapore) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Loi Tonthat
2. 発表標題 Development of temperature and position detection techniques for magnetic particles for magnetic hyperthermia
3. 学会等名 International Meet on Magnetism and Magnetic Materials (MAGNETISMMEET2022, Tokyo, Japan) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 磁気加熱システム及び磁気加熱制御方法	発明者 藪上信、小玉哲也、 桑波田晃弘、トン タットロイ、他	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、P20220028	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

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
研究協力者	藪上 信 (Yabukami Shin)		
研究協力者	小川 智之 (Ogawa Tomoyuki)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	桑波田 晃弘 (Kuwahata Akihiro)		
研究協力者	小玉 哲也 (Kodama Tetsuya)		
研究協力者	スフバートル アリウンブヤン (Sukhbaatar Ariunbuyan)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関