

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K20982

研究課題名（和文）非定常電磁場における磁性体発熱現象を用いた超微小サーモタグの研究

研究課題名（英文）Investigation of minute thermo-tag using magneto-thermal phenomena under unsteady electric field

研究代表者

山西 陽子（Yamanishi, Yoko）

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：50384029

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は小型の生体を対象とする磁気を用いた識別法を開発し、タグの情報を素早く読み取るシステムを確立することを目的としサーモグラフィを用いた識別システムを提案し、基礎実験を行った。プリント型を想定した加熱実証実験を行い、液中での発熱を試みた。発熱を左右する因子を磁場強度・粒径・周波数・粒子組成・分散・濃度の因子に分解し、それぞれのパラメータを支配する電源・コイル・加熱サンプルを改良していくことで磁性流体のサンプルにおいて15 °C/minもの温度変化を達成した。基板上で乾燥させたサンプルは発熱が観測されたことより、凝集していても粒子が固定された状態でネール緩和が起きることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の挑戦的研究としての意義は超常磁性ナノ粒子の高周波磁場による発熱原理の一つであるネール緩和に着目し磁気モーメントの磁化遅れにより発熱する現象を利用したまったく新しいサーモタグを確立することにある。この原理の実用化の社会へのインパクトは大きくRFIDタグの市場を凌駕する、新しい微小なタグの誕生が見込まれるものである。特にネール緩和に着目し磁気モーメントの磁化遅れにより発熱する現象は微小な数nm～数十nmのサイズの磁性粒子にしか見られない特異な現象であり、センシングにおける空間分解能の向上が見込まれる。

研究成果の概要（英文）：This research developed an identification method using magnetism for small living bodies, and proposed an identification system using thermography for the purpose of establishing a system to quickly read information on tags, and conducted basic experiments. A heating demonstration experiment was conducted on the assumption of a printed type, and heat generation in liquid was attempted. The factors influencing the heat generation were decomposed into the factors of magnetic field strength, particle size, frequency, particle composition, dispersion, and concentration, and by improving the power supply, coil, and heated sample that govern each parameter, temperature changes of as much as 15 °C/min were achieved in a magnetic fluid sample. Heat generation was observed for samples dried on a substrate, indicating that Neel relaxation occurs with particles fixed in place, even when agglomerated.

研究分野：マイクロナノ工学

キーワード：タグ マイクロナノ工学 磁性 センサ 生体組織

1. 研究開始当初の背景

センシング・トレーシング技術の発展に伴って大量の物品を自動でより高速に識別できることが求められており、特に細胞の動態・生着・分化を追跡して細胞群の働きや機能の評価するための細胞トラッキングや魚に標識札をつけて放流したのちに再捕獲することで魚介類の資源量や回遊範囲を推定する放流調査など生体分野への応用が期待されている。現在の代表的な自動認識技術としては、商品のバーコード技術、カードに用いられる磁気ストライプ技術、RFID 技術、二次元コードの一種である QR (Quick Response) コードがあるが、現在の技術では低コストかつ水環境で長時間安定的な識別は難しい。個体固有の生体情報を識別するバイオメトリクスでも水生生物への応用例は少ない。RFID 技術は急速に発展してきており、大量生産によって低価格化も進んできている[1]が、水滴により電磁波が阻害されるため陸上の生物には使えても水辺では識別が難しくなる欠点がある。

本研究は長期間安定的に水辺の生き物を識別できるシステムの確立を目的としている。水環境に影響されにくい磁場に着目し、安価で容易に手に入る磁性体の発熱を用いたウェットな環境下でも生体の個々の情報を長時間識別できる方法を提案し、発熱に向けた基礎研究を行った。この研究が進むことでゲノム編集などの生体実験やセンシング・トレーシング技術への寄与があると考えられる。

2. 研究の目的

本研究は長期間安定的にウェット環境下での生体を識別できるシステムの確立を目的としている。そこで我々は水環境に影響されにくい磁場に着目し、安価で容易に手に入る微小な磁性体の発熱を用いて生体の個々の情報を長時間識別できる方法を提案し、磁性体発熱現象を用いた超微小サーモタグ実現へ向けた研究を行う。この研究が進むことでゲノム編集などの生体実験やセンシング・トレーシング技術への寄与があると考えられる。本研究の挑戦的研究としての意義は超常磁性ナノ粒子の高周波磁場による発熱原理の一つであるネール緩和に着目し磁気モーメントの磁化遅れにより発熱する現象を利用したまったく新しいサーモタグを確立することにある。この原理の実用化の社会へのインパクトは大きく RFID タグの市場を凌駕する微小なタグの誕生が見込まれるものである。

3. 研究の方法

図1に本研究のコンセプトを示す。パルス波電流を用いた粒子埋め込み技術[2]によって生体皮膚に鉄ナノ粒子のパターンをプリントしたのちに、生体の付近に配置してある磁場印加用コイルで高周波磁場を発生させる。

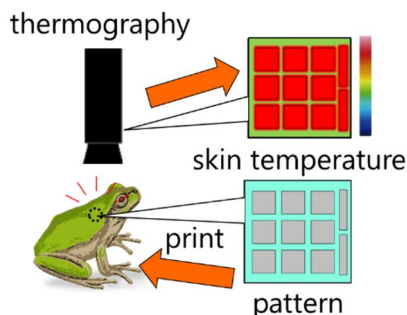
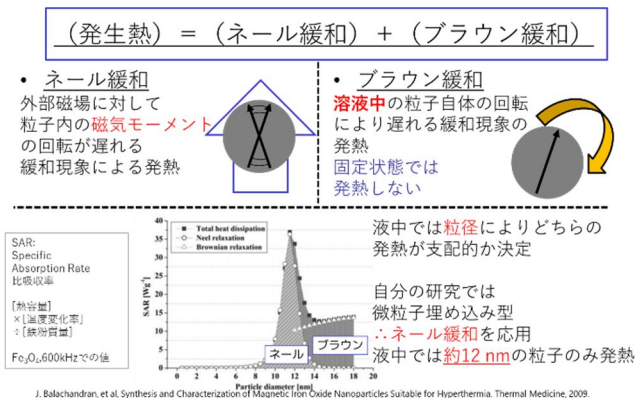


図1. 磁性体発熱現象を用いた超微小サーモタグの研究の概念図

パターン配置された鉄ナノ粒子はネール緩和の発熱機構により発熱するので生体皮膚にはパターン状に温度差が生じる。それをサーモグラフィで観察し、磁性体の有無による温度差から識別情報を得ることで、個体ごとの識別が可能になる。鉄粉の発熱は生体に安全といわれている範囲内での磁場強度で可能となっており[3]、発熱量は磁場強度より制御が可能なので識別可能な発熱量を選択することで生体へのダメージも少なく済む。この方法のメリットは、水環境での小型の水生生物の識別が安価にかつ長期間安定的に可能であること、複数体の識別が同時に可能であること、飼育しているケージ等の中で識別が可能で識別対象の移動の手間が省けることである。

次に発熱原理について述べる。超常磁性ナノ粒子の高周波磁場による発熱原理は二種類あり、ネール緩和とブラウン緩和に分けられる。ネール緩和は粒子の磁気モーメントの磁化遅れにより発熱する現象で、ブラウン緩和は液中で粒子が回転することで発熱する現象である。二種の緩和による総発熱は下記のように示される[6]。



$$P = \pi\mu_0\chi_0 \frac{2\pi f\tau_{eff}}{1 + (2\pi f\tau_{eff})^2} fH^2$$

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_N} + \frac{1}{\tau_B}$$

ネール緩和時間: $\tau_N = \tau_0 \exp\left(\frac{KV_M}{kT}\right)$

ブラウン緩和時間: $\tau_B = \frac{3\eta V_H}{kT}$

μ_0 : 真空の透磁率, χ_0 : 平衡磁化率, f : 周波数, H : 磁場強度
 τ_0 : 時定数(10⁻⁹sec), K : 磁気異方性定数
 V_M : 物理的粒子体積, k : ボルツマン定数, T : 絶対温度
 η : 溶液の粘度, V_H : 流体力学的粒子体積

粒径、周波数、磁界強度等が発熱量に影響

J. Balachandran, et al. Synthesis and Characterization of Magnetic Iron Oxide Nanoparticles Suitable for Hyperthermia. Thermal Medicine, 2009.

図2. 熱発生メカニズムについて(ネール緩和、ブラウン緩和)

4. 研究成果

(1) 鉄板と鉄粉懸濁液の発熱比較

図3に鉄粉発熱のための実験セットアップを示す。コイルに周期的に電流を流すことでin-vitro環境での加熱の検証を行った。高周波電源の用意が難しかったため、今回は液中プラズマ発生用パルス波電源で代用した。コイルの逆起電力により電流は減衰振動のような波形となる。コイルは二重綿巻リッツ線を50回巻きしたものを用いた。磁場印加用コイルの周囲に磁気シールドを置き、周囲に磁場が漏れないようにした。また、加熱の観察はサーモカメラを用いて熱分布の観察を行った。鉄粉での加熱が困難なことを考慮して、鉄粉ナノパウダー懸濁液(10nm、5mg/ml)および比較対象として穴をあけた鉄板(厚さt=0.5、1mm)と、二種類について加熱実験を行い比較した。図3はサーモカメラによって観察した熱分布画像である。加熱の結果、鉄板は加熱可能となったが、鉄ナノ懸濁液は加熱困難であった。鉄板の場合の発熱は誘導電流のジュール発熱及びヒステリシス損失によるもので、対象大きさが小さくなると電流量が制限されて発熱が難しくなる。鉄ナノ粒子は今回は発熱には至らなかったが、ネール緩和は電磁誘導とは発熱原理の異なる現象なので、より鉄ナノ粒子発熱に適したセットアップにする必要があることがわかった。

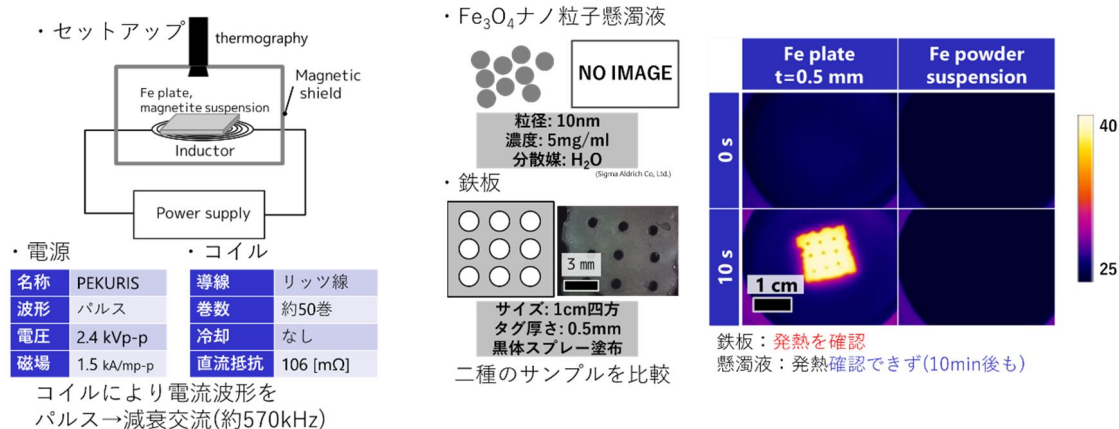


図3. 鉄粉発熱のための実験セットアップ。

(2) 液中での発熱検証

鉄ナノ粒子加熱のためのセットアップについて図4に示す。今回のセットアップでは電源とコイルの間に整合器を挟み、コイルとコンデンサの共振を利用してコイルからの反射電力を有効活用するインピーダンスマッチングを行った。

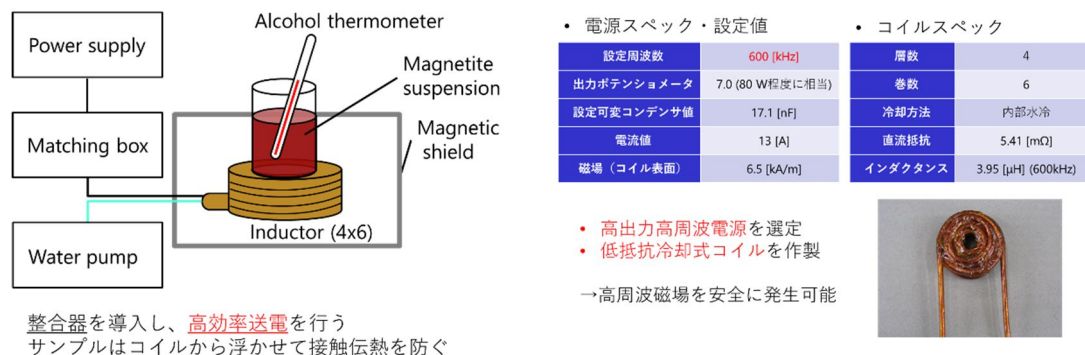


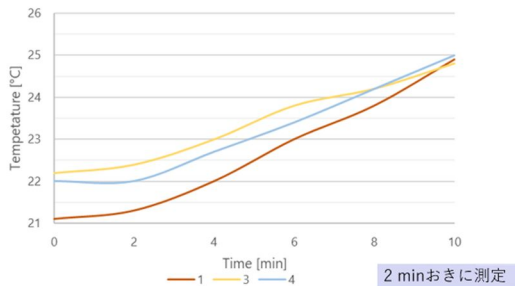
図4. 鉄ナノ粒子加熱のためのセットアップ。

インダクタンスは 600 kHz において 3.95 μH であり、電源で観測する反射波が最小となるよう整合器の静電容量を調整すると 17.1 nF の時に最小となった。マッチング時、電源からの電力はコイル・整合器・導線の抵抗成分および発生磁場による誘導成分（緩和現象や誘導加熱に相当）のみによって消費されるため、高効率で送電が可能となる。幸いにも銅管コイルは他のコイルに比べて断面積が大きく直流抵抗がとて小さいため、マッチング時に電流値が最大になると予想される。コイル内部には冷却用に不凍液を流すため、水冷システムを用いて保冷剤で冷却しつつ循環させた。加熱対象には以下のサンプルをそれぞれ 4 ml ずつ遮光瓶に入れ、アルコール温度計で 2 min おきに温度測定しつつ 10 min 加熱した。金属製両開クランプで瓶の上部を把持し、コイル発熱が伝播しないようにした。

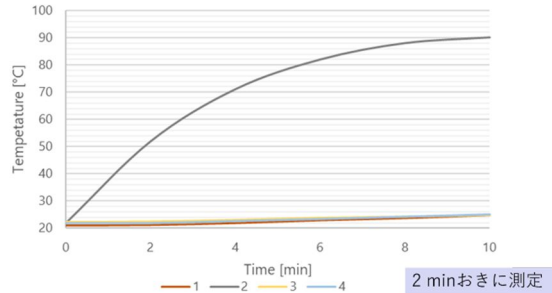
図 5 にサンプルの加熱時間変化のデータを示す。超高濃度の磁性粒子が入ったサンプル 2 磁性流体が大きく発熱し、0-2 分の間では 15 °C/min の温度変化であった。10 分後には 22 °C から 90 °C まで上昇し沸騰し始めた。その他のサンプルは 10 分で 22 °C 前後から 25 °C 前後までほぼ同様に上昇した。サンプル 2 では 0-4 分の間で急激な温度上昇があり、時間がたつにつれて温度上昇はなだらかになっていった。2 以外のサンプルでは 2 分間ではほぼ温度上昇せず、6 分以降で 0.5 °C/min ほどの様な温度上昇を示した。

No.	鉄粉	一次粒径	二次粒径	分散媒	分散剤	濃度
①	Fe ₃ O ₄	10 nm	57 nm	H ₂ O	SNディスターサー ント5860 1.5 wt%	0.5 wt%
②	Fe ₃ O ₄	10 nm	44 nm	H ₂ O	アクリル酸エチル モノメチルアミン 1 wt%	35 wt%
③	Fe ₃ O ₄	数百~数千nm (SEM)	255 nm	H ₂ O	SNディスターサー ント5860 1.5 wt%	0.5 wt%
④	なし	-	-	H ₂ O	-	-

- ①購入したナノ粒子
②磁性流体
③自作した粒子
④超純水：対照実験
- <わかること>
①②vs③→一次粒径
①vs②→濃度
④→外乱



1,3,4,5：2分間はほぼ温度変化なし
6分以降で約0.5 °C/minの温度変化



2: 約15 °C/minの温度上昇
その他：若干の温度上昇

番号	鉄粉	コイル	磁場強度	周波数	波形	粒径・組成	分散	濃度
①	Sigma Aldrich	リッツ (実験1)	○	△	○	○	○	△
		銅管	○	○	○	○	○	△
②	磁性流体	銅管	○	○	○	○	○	◎
③	自作鉄粉	銅管	○	○	○	×	○	△

> 2だけ大きく発熱した理由
1に比べて70倍の濃度→発熱も約70倍
最適化5因子の条件を満たしたため発熱
1でネックとなっていたのは濃度
1も濃度を高めれば発熱確認できる可能性

図 5. サンプルの発熱変化結果

まず、なぜ磁性流体だけ大きく発熱したかであるが、他の二つの磁性体サンプルと大きく違うのがマグネタイトナノ粒子の濃度である。粒子の濃度は単位流体当たりの発熱量にほぼ比例するため、高いほうがよい。サンプル 2 では 30 - 40 wt% なのに対し、サンプル 1 は約 0.5 wt% と、約 70 倍差がある。当然発熱量も 70 倍近く変わってくるので温度変化が顕著になり観測が可能であった。時間がたつにつれて温度変化が緩やかになっていったのは、熱拡散や水蒸気に気化熱として奪われ始めたからである。60 °C を超えたあたりから瓶の中に水滴ができ始めていたことから、流体から水蒸気が盛んに発生していたことがわかる。サンプル 2 は二次粒径が約 44 nm ため、ブラウン緩和で発熱している可能性もあり、基板上で乾燥させてブラウン緩和を抑制しつつ実験していく必要がある。

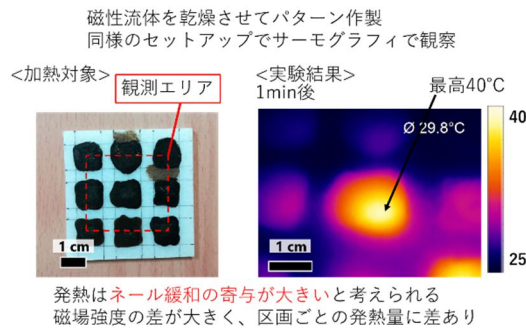
次にサンプル 1、3 の発熱の可否についてだが、サンプル 2 に比べて濃度に約 70 倍差があることから、発熱量も 70 倍近く開く。サンプル 2 では 15 °C/min ほどの温度変化であったことから、外部からの影響を除くと 14.5 °C/min ほど発熱している。鉄粉が単位体積当たり同様の発熱 W 数を持つとして熱容量から温度変化を計算するとサンプル 1 では、流体外部からの影響を除いて 0.2 °C/min の温度変化があるはずだ。流体外部からの影響では 0.5 °C/min 温度変化しているの、サンプル 1 では発熱自体はしているものの温度変化が埋もれてしまっている可能性は高い。サンプル 3 については粒径が大きいので発熱はほぼないと考えられる。

最後に比較対象であるサンプル 4、5 の発熱原因について以下の三点が主要因と考える。遮光瓶を支持しているクランプの誘導加熱 コイルから空気を伝って輻射・伝導伝熱 電子レンジのように流体分子に磁場が直接作用して発熱。コイルは冷却水で冷却してはいるものの、コイル導線自身も誘導加熱されるため磁場の強力なコイル中心では発熱量がどうしても大きくなってしまふ。サンプル 1、3、4、5 の温度変化開始の遅さから考えると、温度上昇までに時間のかかるクランプの誘導加熱と輻射・伝導伝熱が有力である。その中でもオレイン酸のみのサンプル 5 が一番高温となったのは、初期温度が高かったことと、実験の順番が最後であったので以前のコイルの熱が残っていたことに起因する。

(3) 固定状態での発熱検証と発熱に対するネール・ブラウン緩和検証

次に顕著な発熱を示したサンプル 2 を乾燥させて高周波磁場を印加することでネール緩和

のみ発生させるセットアップとした。5 cm 四方のポリプロピレンシート上にパターン状に磁性流体を乾燥後 1.8 g となるよう塗布し乾燥させた。**エラー！参照元が見つかりません。**に示すサンプルにおいて赤線の枠内を観測エリアとした。3.8 と同様のセットアップで加熱を行い、サーモカメラで加熱観察を行った。また、基板は伝熱しないようにクランプで把持し、コイルと接触しないようにした。



鉄ナノ加熱

1. 発熱実験→鉄粉発熱せず
2. セットアップ最適化+4種の加熱サンプル磁性流体(サンプル2)のみ**発熱**
3. 発熱は**ネール緩和**の可能性が高い
→識別への応用が期待

展望

ネール緩和周波数最適化
伝熱を考慮した発熱量
メッキペン堆積量を考慮した実験
ロックイン方式サーモグラフィ
→**微弱信号強化**・低侵襲化

図 6. パターン状サンプルの発熱結果

乾燥させたサンプルの熱分布観察結果を図 6 に示す。温度が高い部分では 1 分後には最高 40 °C まで上昇した。コイルの発熱が一部伝熱していることも観察されたが、それ以上に区画部分での発熱があった。コイルに対して基板が大きくコイル中心部のみ磁場が強かったため区画によって発熱量に差があった。固定状態にするこでの発熱要因は 一次粒子の径がきいてネール緩和により発熱 二次粒子の径がきいてネール緩和で発熱 1 cm 角の磁あ性体としての電磁誘導やヒステリシス損により発熱、の三点のいずれかと考えられる。 の発熱要因は液体から徐々に乾燥させたため各二次粒子が分散剤でコーティングされて磁氣的にバラバラな状態であることと、固定状態ではブラウン緩和時間を無限と考えることで 12 nm より大きい粒子でもネール緩和する可能性があることをもとにしている。磁性流体では一次粒径が作用してネール緩和が起きているのか、二次粒径が作用してブラウン緩和が起きているのか不明であったが鉄粉 1 g 当たりの発熱量を比較してみると外乱による温度上昇込みで液体状態では 2 W/g なのに対し、固定状態では 0.8 W/g と二倍以上の差があった。このことより、 の発熱要因では発熱量が同程度となるはずなので可能性が薄いことがわかる。 の発熱要因は、各二次粒子が分散剤でコートされ導電しづらい環境にあることを考慮すると の固定状態によりネール緩和の粒径制限が緩和されたことが最も妥当な要因であると考えられる。

以上より、固定状態のサンプルの熱は外乱を除くと大部分がネール緩和であり、流体状態ではブラウン緩和であったと考えられる。磁性流体の粒径は一次粒径が約 10 nm、二次粒径が約 44 nm であったことより超常磁性を示す大きさの粒子ならば固定状態でもネール緩和により発熱すると示唆される。

5. まとめ

本研究は小型の生体を対象とする磁気を用いた識別法を開発し、タグの情報を素早く読み取るシステムを確立することを目的としており、サーモグラフィを用いた識別システムを提案し、基礎実験を行ってきた。サーモグラフィを用いた識別法については埋め込み型およびプリント型の二種類を提案してきた。埋め込み型では鉄板の大きさが小さくなるほど渦電流が制限されるため、3 mm 角の鉄板加熱が限界であった。タグ上部に皮膚があると熱拡散してシグナルが弱くなってしまいうため、ロックイン方式のための特徴抽出を行った。プリント型では加熱自体が行えるか不確かであったため、液中での発熱を試みた。発熱を左右する因子を磁場強度・粒径・周波数・粒子組成・分散・濃度の因子に分解し、それぞれのパラメータを支配する電源・コイル・加熱サンプルを改良していくことで磁性流体のサンプルにおいて 15 °C/min もの温度変化を達成した。基板上で乾燥させたサンプルは発熱が観測されたことより、凝集していても粒子が固定された状態でネール緩和が起きることが示された。

あ

引用文献：

1. M. Usami, Scientific American, pp 68-71, 2008
2. K. Ichikawa, et al., Micromachines, 10(6),2019.
3. W. J. Atkinson, et al., IEEE Trans Biomed Eng, 31, pp.70, 1984.
4. M. Suto, et al., Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 321, Issue 10, pp. 1493-1496, 2009.
5. H. A. Wheeler, in Proceedings of the Institute of Radio Engineers, vol. 16, no. 10, pp. 1398-1400, 1928.
6. J. Balachandran, et al, Synthesis and Characterization of Magnetic Iron Oxide Nanoparticles Suitable for Hyperthermia. Thermal Medicine, 2009.

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Beppu Kazusa, Izri Ziane, Sato Tasuku, Yamanishi Yoko, Sumino Yutaka, Maeda Yusuke T.	4. 巻 118
2. 論文標題 Edge current and pairing order transition in chiral bacterial vortices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1073/pnas.2107461118	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17件（うち招待講演 7件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Y. Yamashita, N. Basaki, S. Sakuma and Y. Yamanishi
2. 発表標題 ELECTRICAL PATTERNING SYSTEM UTILIZING ON-DEMAND MICRO-PLASMA-BUBBLES
3. 学会等名 Transducers 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yu Yamashita, Sakuma Shinya and Yoko Yamanishi
2. 発表標題 3D Electrical Patterning Utilizing Micro-plasma-bubbles
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Micromechatronics and Human Science (MHS2021)（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yu Yamashita, Sakuma Shinya and Yoko Yamanishi
2. 発表標題 Simultaneous Synthesis and Deposition by Utilizing Micro-plasma-bubbles
3. 学会等名 The Material Research Meeting 2021 (MRM2021)（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山下 優, 佐久間 臣耶, 山西 陽子
2. 発表標題 マイクロプラズマバブルを用いた非導電性基板へのダイレクト配線
3. 学会等名 化学とマイクロ・ナノシステム学会 第43回研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 島内孝輔, 鳥取直友, 佐久間臣耶, 山西陽子
2. 発表標題 電界誘起気泡メスの酸化還元力を用いた磁性体直描による小型水棲生物の個体識別の研究
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山下優, 佐久間臣耶, 山西陽子
2. 発表標題 マイクロプラズマバブルを用いた安定な微細配線技術の構築
3. 学会等名 第12回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山西陽子
2. 発表標題 針なし気泡注射器とプラズマ誘起気泡の機能創発
3. 学会等名 日本ばね学会復元力応用分科会第31回講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山西陽子
2. 発表標題 プラズマ誘起気泡における機能創発
3. 学会等名 精密加工研究会 第109回例会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoko Yamanishi
2. 発表標題 Emergent Functions of Electrically-induced Bubbles
3. 学会等名 Interanational workshop on Molecular Cybernetics(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山西陽子
2. 発表標題 針なし気泡注射器によるバイオメディカル機能創発
3. 学会等名 第29回日本医工ものづくりコモンズシンポジウム「医工連携の拡がり」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山西陽子
2. 発表標題 電界誘起気泡応用の最前線！！電界誘起気泡による機能創発”
3. 学会等名 E L I D 研削研究会・第88回：E L I D 研削セミナー(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山西陽子
2. 発表標題 電界誘起気泡によるバイオメディカル機能創発
3. 学会等名 -RC-52- 第62回 バイオ・マイクロ・ナノテク研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoko Yamanishi
2. 発表標題 Emerging functions of electrically-induced bubbles
3. 学会等名 The 6th Symposium on Theoretical and Applied Mechanics (第6回理論応用力学シンポジウム) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Sakuma, N. Basaki, K. Ichikawa, Y. Yamanishi
2. 発表標題 In-situ 3D writing of microelectrodes based on plasma-assisted microplating
3. 学会等名 The proc. of the 24th Int. Conf. on Miniaturized System for Chemistry and Life Sciences (micro-TAS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 馬崎夏実, 山下優, 佐久間臣耶, 山西陽子
2. 発表標題 マイクロプラズマバブルによる酸化還元作用を用いた金属成膜技術
3. 学会等名 化学とマイクロ・ナノシステム学会第42回研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下優, 大熊航平, 佐藤匡, 川原知洋, 原本悦和, 山西陽子
2. 発表標題 水生生物のための時期を用いた個体識別法の研究
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020 in Kanazawa
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 馬崎夏実, 市川啓太, 山下優, 山西陽子
2. 発表標題 プラズマ誘起気泡による還元作用を用いた金属粒子埋め込みの研究
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020 in Kanazawa (オンライン)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 山西陽子 (丸山茂夫 監修)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 (株)エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 731
3. 書名 「マイクロ・ナノ熱工学の進展」の3章「バイオメディカル応用」	

〔産業財産権〕

〔その他〕

山西研究室 流体医工学研究室 https://bmf.mech.kyushu-u.ac.jp/

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 分 担 者	川原 知洋 (Kawahara Tomohiro) (20575162)	九州工業大学・大学院生命体工学研究科・准教授 (17104)	

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