

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01824

研究課題名(和文) 刺激応答性磁気ハイドロゲルの動的磁化計測によるバイオセンシング

研究課題名(英文) Biosensing by dynamic magnetization measurement of stimuli-responsive magnetic hydrogels

研究代表者

北本 仁孝 (Kitamoto, Yoshitaka)

東京工業大学・物質理工学院・教授

研究者番号：10272676

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：磁気計測による新規の化学・生化学センサの開発のために、磁性ナノ粒子を刺激応答性ハイドロゲルに内包した磁気ハイドロゲルをバイオセンシングのラベルとして創製した。磁性ナノ粒子の分散・凝集状態を制御するために、磁性ナノ粒子がpH等の化学的刺激に応答するハイドロゲル中に適切な配置で分散し、かつゲル中で物理的な回転・振動をすることができる、構造制御された磁気ハイドロゲルラベルである。pH応答性ゲルの膨潤特性の変化に伴い、磁性ナノ粒子の流体力学的振舞(物理的な運動)の変化を交流磁化計測により検出した。さらに、この磁気ハイドロゲルを用いて、交流磁化特性の計測によってアンモニアガスを検出することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生体から取り出した体液やガスなどを計測することで、健康や疾患の状態を評価する技術は予防医学や迅速な診断のために不可欠の医療技術であり、本研究はそれを実現するのに遠隔操作も可能な磁気技術を活用し、簡便かつ高精度のセンシング技術に資するものである。そのための材料開発において、化学的な操作によって磁性材料の特性を変化させる、つまり磁気学と化学・生化学を融合するという新しい視点を導入し、その成果として皮膚ガスの成分でもあるアンモニアガスを磁気ハイドロゲルと磁気センサを使って計測し、健康や医療の診断に資するデータを提供しうる可能性があることを実験的に示すことに成功した。

研究成果の概要(英文)：Ferrogels composed of magnetic nanoparticles and stimuli-responsive hydrogels have been synthesized as a magnetic label for chemical/biochemical biosensors. Magnetic nanoparticles are dispersed in a stimuli-responsive polymer hydrogel with keeping a capability of physical motions such as rotation and vibration, exhibiting a magnetic relaxation (Brownian relaxation) based on their hydrodynamic behaviors against alternating magnetic fields. Modulations of the hydrodynamic behaviors of magnetic nanoparticles in the ferrogels have been detected by dynamic magnetization measurements of the ferrogels with a swelling behavior of a pH-responsive polymer hydrogel. The detection of ammonia gas has been successfully demonstrated using the pH-responsive ferrogel from the dynamic magnetization measurements.

研究分野：磁気工学

キーワード：バイオセンシング ハイドロゲル 刺激応答性高分子 磁性ナノ粒子 交流磁化計測

## 1. 研究開始当初の背景

磁気センサは物理センサとして広く活用されており、現代のエッジコンピューティングにおいては不可欠のものとなっている。また、磁気センシングは、生体計測、バイオセンシングのような化学、生化学の分野においても、光学的手法、電気化学的手法、電気的手法等と比較して、低侵襲かつ遠隔的に行うことができる利点がある。さらに、信号の雑音源となる磁性体が通常的环境中に存在しないことから高感度の計測手法として注目を集めている。このような磁気バイオセンシングの応用では被検出物質(イオンやタンパク質等のバイオマーカー)と相互作用する磁性ナノ粒子ラベル(標識)からの磁気信号(磁場)を磁気センサで検出している。一般的には、交流磁場で励磁した粒子からの磁気信号を検出する。磁性ナノ粒子からの磁気信号は交流磁場に対して粒子の回転や振動といった物理的運動が起きやすい液体中で大きくなることから、液中でのセンシングにおいて有効である。その原理は以下のようなものである。磁性ナノ粒子ラベルに被検出物が結合して、その流体力学的体積が変化すると、その交流磁化特性が変化する。特に交流磁化の周波数特性の変化から物質の検出を行う。しかし、液体中で磁性ナノ粒子の分散・凝集状態を制御するのは容易ではない場合があるため、磁気的手法による液中でのセンシングではラベルとなる磁性ナノ粒子の液中での分散・凝集などの複雑な振舞を高精度に制御する必要がある。そこで、センシング中の磁性ナノ粒子の分散・凝集状態を制御するために、磁性ナノ粒子が pH やイオンなどの化学的刺激にตอบสนองするハイドロゲル中に適切な配置で分散し、かつゲル中で物理的な回転・振動をすることができる、構造制御された複合磁気ラベルを作製し、pH 変化にตอบสนองしたゲルの膨潤・収縮に伴う磁性の変化を検出する。ハイドロゲルの構成成分の大部分は水であることから、磁性ナノ粒子は物理的な運動が適切に制御された流動性のある環境中に置かれていることになる。この磁気ラベルは、ハイドロゲルの化学的あるいは生化学的刺激応答性を活用して、内包する磁性ナノ粒子の磁気的性質を変調させることを原理としており、磁気学と化学・生化学を融合する研究である。

## 2. 研究の目的

磁気計測による新規の化学・生化学センサの開発のために、磁性ナノ粒子を刺激応答性ハイドロゲルに内包した磁気ハイドロゲルをバイオセンシングのラベル(標識)として創製することを目的とする。より具体的には以下のとおりである。

磁性ナノ粒子の分散・凝集状態を制御するために、磁性ナノ粒子が pH やイオンなどの化学的刺激にตอบสนองするハイドロゲル中に適切な配置で分散し、かつゲル中で物理的な回転・振動をすることができる、構造制御された磁気ハイドロゲルラベルを作製する。また、刺激にตอบสนองしたゲルの物性変化に伴う磁性ナノ粒子の流体力学的振舞の変化を交流磁化計測により検出、特に刺激にตอบสนองした膨潤特性に伴う交流磁化特性の変化をセンシング信号とする。本研究では主に pH 応答性ポリマーを用い、アンモニアガスの吸収によるゲル中の pH 変化を交流磁化特性から計測し、アンモニアガスセンシングへの応用についてその可能性を示す(図1)。

また、ハイドロゲル中での磁性ナノ粒子の流動的な振舞をより顕在化するために、マクロポーラスなハイドロゲルの作製を行い、磁性ナノ粒子を内包させて交流磁化特性の変化を調査した。

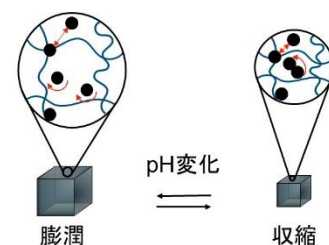


図1 磁性ナノ粒子を内包したpH 応答性ポリマーゲルのpH変化による磁性ナノ粒子の振舞の変化

### 3. 研究の方法

#### 3-1. pH 応答性スルファメサジンポリマーと磁性ナノ粒子との複合ゲル

応答する pH 範囲が中性付近にあり、塩基性において親水性へと変化するスルファメサジン (SAM) を用いて磁性ゲルを作製し、交流磁場印加時のハイドロゲル内の磁性ナノ粒子の挙動を複合体の膨潤率との相関で評価した。

はじめに、SAM と複合するための酸化鉄ナノ粒子を作製した。ソルボサーマル法によって作製した酸化鉄ナノ粒子にクエン酸を超音波照射下で修飾することで、一次粒径 19 nm、流体力学的径 25 nm の単分散の酸化鉄ナノ粒子分散液を得た。次に、スルファメサジン (SA) とメタクリロイルクロリドによって SAM を合成した。合成物は FT-IR と NMR によって SAM であると同定し、架橋剤 N',N''-メチレンビスアクリリアミド (MBAAm) を架橋剤としてゲル化する条件を探索した。また、作製したゲルの応答 pH 範囲と膨潤率を測定した。作製した SAM ゲルは、pH=8 から pH=10 の間で急激に膨潤状態が変化することが確認された。

次に、クエン酸修飾酸化鉄ナノ粒子と SAM の複合体を作製し、ゲル作製時のモノマーの量及び架橋剤の比率により物性がどのように影響を受けるかを各 pH における膨潤率、交流磁化の周波数依存性の測定から評価した。

またアンモニア水溶液を入れたフラスコと磁性ナノ粒子 / SAM 複合ゲルを入れたフラスコをチューブで接続し、チューブの途中に入れたバルブの開閉でゲルへのアンモニア吸収量を制御し、交流磁化の周波数依存性を測定し、アンモニア吸収時間 (吸収濃度) と交流磁化特性の変化との相関を評価した。

#### 3-2. マクロポーラスなポリアクリルアミドハイドロゲルと磁性ナノ粒子との複合ゲル

ポリアクリルアミドゲルは以下の方法で直径約 3 mm の球状のゲルビーズを作製した。重合開始剤である過硫酸アンモニウム (APS) の溶液と、アクリルアミドモノマー、架橋剤 MBAA、重合促進剤テトラメチルエチレンジアミン (TMED) の混合溶液をそれぞれ用意する。この 2 つの溶液をそれぞれシリンジからシリコンオイル上に射出し、オイル上で 2 液が混合されるとゲルビーズのもととなるゾルの液滴が形成される。シリコンオイルに入れたまま、-15 °C で保管しゲルビーズを生成させた。このような凍結法によってゲル化の際にポリマー相と水相に相分離し、水相は最終的にはマイクロメートルサイズの空孔となる。このゲルビーズを洗浄、乾燥後、ソルボサーマル法で作製した酸化鉄ナノ粒子のコロイド液を滴下し含浸させて、磁性複合ゲルビーズを作製した。モノマー濃度を変えてゲルビーズを作製し、交流磁化特性を評価した。

### 4. 研究成果

#### 4-1. pH 応答性スルファメサジンポリマーと磁性ナノ粒子との複合ゲル

pH 応答性ポリマーとしてキトサンを用いた場合、内包する酸化鉄ナノ粒子が化学的に安定ではない pH が 3 程度以下でない膨潤状態が大きく変化しなかったため、中性付近から高 pH 領域で膨潤状態が変化するポリマーとしてスルファメサジンを選択した。またキトサンの場合はゲルではなくゾル溶液に磁性ナノ粒子を混合した場合でも、粒子の運動性が強くキトサン分子によって拘束されたためと考えられる交流磁化特性しか示さなかったため、図 1 に示したような原理での pH に依存した交流磁化特性の変化を得ることはできなかった。

クエン酸修飾酸化鉄ナノ粒子と SAM の複合体を作製する条件として、ゲル作製時のモノマーの量及び架橋剤の比率により物性がどのように影響を受けるかを各 pH における膨潤率、交流磁化の周波数依存性の測定から評価した結果、架橋剤濃度が等しい場合はモノマー量が少ないほ

ど、またはモノマー量が等しい場合は架橋剤濃度が低いほど膨潤率が大きくなり、外部環境変化により敏感な磁性ゲルが得られることがわかった。しかし、モノマーの量が少なすぎると、機械的強度が低下し、扱いにくいことがわかった。

そこで、この後の評価では取り扱いができるレベルの機械的強度を持ち、pH 変化に対する膨潤度の変化が最も大きな複合ゲルが得られる条件で作製した試料を用いて評価を進めた。図 3 は最適化された条件で作製した

磁性ナノ粒子/SAM 複合ゲルについて、pH を 7 から 12 まで変えて測定した交流磁化の周波数依存性を示している。実数部の値は pH の増加とともに単調に増加しているが、pH が 8 から 10 まで変化したときに顕著に増加している。虚数部も pH が 8 から 10 まで変化したときに顕著に変化しているが値だけではなくピークとなる緩和周波数の変化も見られ、pH が高くなるにつれて緩和周波

数は高周波数側にシフトしている。このことは pH の増加とともに、ゲルに内包する磁性ナノ粒子の流体力学的な運動

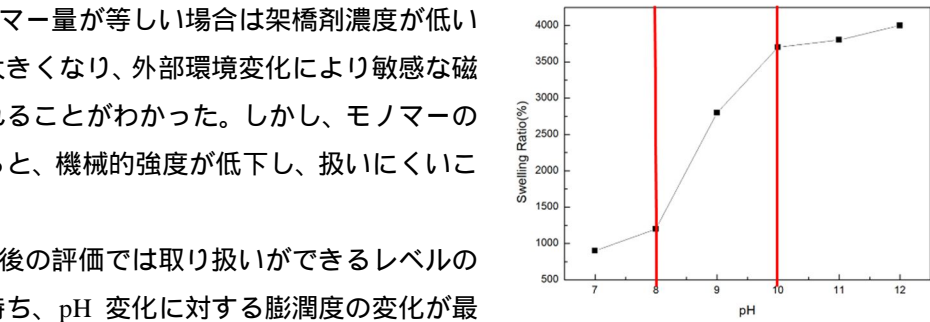


図2 酸化鉄ナノ粒子/スルファメサジン磁性複合ゲルの膨潤度のpH依存性

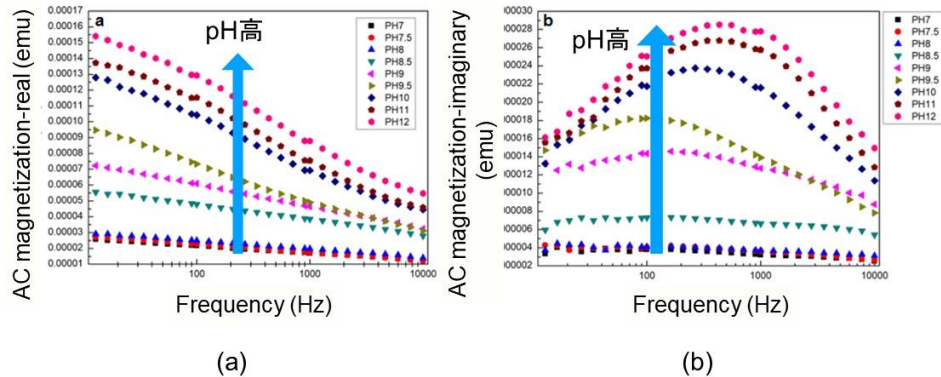


図3 酸化鉄ナノ粒子/スルファメサジン磁性複合ゲルの交流磁化の周波数依存性。(a)実数部、(b)虚数部

能が向上していることを示唆している。つまりゲル内部の流動性が向上していることを意味し、図 2 に示す pH に対する膨潤度の変化に対応している。このことは図 1 に示す磁性ゲルの交流磁化特性の刺激応答の原理と一致している。

作製したスルファメサジンゲルは pH が 8 から 10 の間で急峻に膨潤度が変化する。これではこの磁性複合ゲルでは限られた範囲でしか pH 計測を行うことはできない。しかし、急峻に変化する性質を活用すればわずかな pH 変化を計測することができ、その変化を起こす反応のセンシングを高感度に行うことが可能になる。その代表例として、アンモニアガスのセンシングのデモ

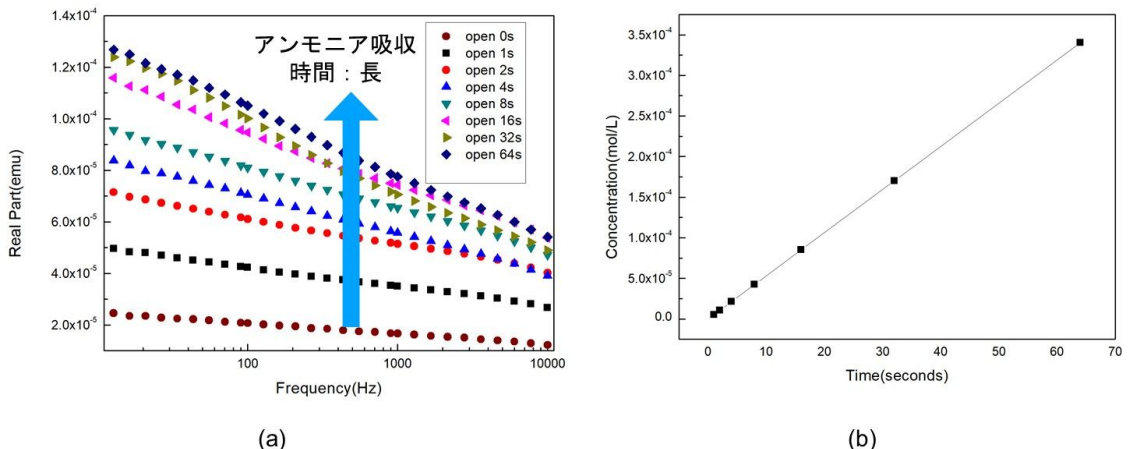


図4 酸化鉄ナノ粒子/スルファメサジン磁性複合ゲルのアンモニア吸収による交流磁化の周波数依存性の変化。(a)交流磁化実数部の周波数依存性、(b)吸収時間とアンモニア濃度との関係

ンストレーションをこの複合ゲルを用いて行った。図 4 は交流磁化実数部の周波数依存性をアンモニアガス吸収時間を変えて測定した結果を示しており、吸収時間と吸収濃度との相関も併せて示している。アンモニアガス吸収時間に対応した pH の変化も併せて測定しているが、いずれもよい相関関係を示している。この結果から本研究で作製した磁性複合ゲルによって  $5 \times 10^{-6}$  mol/L の濃度のアンモニアガスの検出が可能であることが示された。アンモニアガスは健康や疾患の状態を表す皮膚ガスの成分でもあり、非侵襲でその計測と診断に資するデータを提供しうる可能性があることをこのデモンストレーション実験は示している。

#### 4-2. マクロポーラスなポリアクリルアミド水ゲルと磁性ナノ粒子との複合ゲル

センシングラベルの感度の向上のためにはゲル内での磁性ナノ粒子の流動性の向上とゲルが受けた刺激の影響を磁性ナノ粒子が強く受けることが不可欠であるが、ここではゲル内での磁性ナノ粒子の流動性の向上を目的としてゲル内の細孔構造のマクロポーラス化を試みた結果を示す。ここではポリマーとしてポリアクリルアミドを用いており、刺激応答性は示さない。

凍結法によってゲル化の際にポリマー相と水相に相分離させ、水相は最終的には空孔となる。本研究で購入した動的光散乱法によるゲル内部の微細構造解析装置により、マイクロメートルサイズの空孔と、ナノサイズのポリマー相の網目構造とを見分けることができた。ただし、構造を数値化する観点からその絶対値の評価結果についてはさらなる検討が必要である。このマイクロメートルサイズの空孔に磁性ナノ粒子を含むコロイド液が内包されている。図 5 に内包している磁性流体、及び複合ゲルの交流磁化特性を示している。どちらも 10 kHz 付近に緩和周波数のピークが現れている。交流磁化率虚数部に目を向けると、磁性流体の場合は交流磁化虚数部の値が 10 Hz でほぼ 0 から周波数とともに増加しているのに対し、複合ゲルでは 10 Hz でも 0 より大きな値から示している。また交流磁化実数部においても、磁性流体では 1 kHz 以下ではフラットであるのに対し、複合ゲルでは単調に減少している。これらのことは磁性流体中の磁性ナノ粒子よりも低い周波数領域に緩和周波数を持つ粒子成分が多く存在していることを示している。ゲルのポリマーとの相互作用により、その運動能が制限されたために、この低い緩和周波数を示す粒子成分が出現したと考えられる。一方で、10 kHz 付近に緩和周波数を持つ成分はゲル中でも磁性流体と変わらない緩和機構を示している。この傾向はモノマー濃度を変えたゲルビーズのいずれにおいても観察されている。このようにマクロポーラス化により、ゲル中でも磁性ナノ粒子がバルクの流体中と変わらない運動能を示すことができることがわかった。一方で、ポリマーとの相互作用による一部の粒子の緩和機構の変調も観察されており、その相互作用の解析の必要性があることも判明した。またナノ粒子の緩和機構の解析では単一の機構ではなく、多分散性の機構に基づいた解析が必要であることも示された。

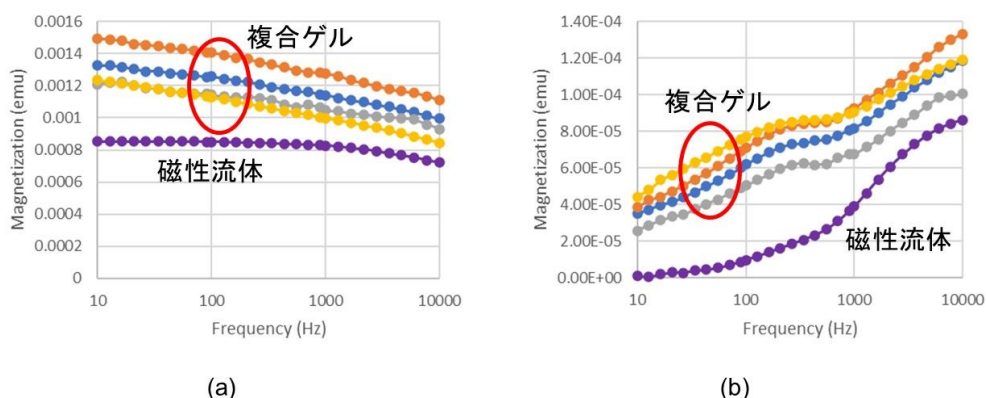


図5 アクリルアミド・マクロポーラスゲル中の酸化鉄ナノ粒子の交流磁化の周波数依存性。(a)実数部、(b)虚数部

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Trisnanto Suko Bagus, Kitamoto Yoshitaka	4. 巻 123
2. 論文標題 Distributive Activation Volumes of Magnetically Interacting Nanostructures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 23732 ~ 23737
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b05584	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 Miyajima Kumiko, Miwa Yuki, Kitamoto Yoshitaka	4. 巻 173
2. 論文標題 Fabrication of porous FePt microcapsules for immunosensing techniques	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Colloids and Surfaces B: Biointerfaces	6. 最初と最後の頁 407 ~ 411
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.colsurfb.2018.10.004	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 M. E. Villamin, Y. Kitamoto	4. 巻 3
2. 論文標題 Effect of Ionic Concentration on Dynamic Magnetic Susceptibility of Iron Oxide Nanoparticles Embedded in Chitosan Hydrogel Matrix	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transaction of the Magnetics Society of Japan Special Issues	6. 最初と最後の頁 113 ~ 119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20819/msjtmj.19TR322	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 Villamin Maria Emma, Kitamoto Yoshitaka	4. 巻 55
2. 論文標題 Influence of pH on Dynamic Magnetic Susceptibility of Iron-Oxide Nanoparticles in a Chitosan Hydrogel Matrix	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	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) 10.1109/TMAG.2018.2869828	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 Villamin Maria Emma, Kitamoto Yoshitaka	4. 巻 1929
2. 論文標題 Synthesis of multifunctional clustered nano-Fe3O4 chitosan nanocomposite for biomedical applications	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 020014 ~ 020014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5021927	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 Yasuda Kazuki, Kitamoto Yoshitaka	4. 巻 1929
2. 論文標題 Fabrication of Fe3O4 nanorods designed for liquid-phase magnetic biosensing	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 020009 ~ 020009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5021922	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 Oda Shoya, Trisnanto Suko Bagus, Kitamoto Yoshitaka	4. 巻 57
2. 論文標題 Influence of behaviors of magnetic particles in ferrofluids under alternating magnetic fields on harmonic responses	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 02CB17 ~ 02CB17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.02CB17	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 Trisnanto Suko Bagus, Yasuda Kazuki, Kitamoto Yoshitaka	4. 巻 57
2. 論文標題 Dipolar magnetism and electrostatic repulsion of colloidal interacting nanoparticle system	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 02CC06 ~ 02CC06
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.02CC06	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24件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 BI Qi, 倉科 佑太, 北本 仁孝
2. 発表標題 温度応答性ポリマー・ポリ（N-イソプロピルアクリルアミド）（PNIPAM）ゲル中の磁性ナノ粒子の交流磁化特性に関する研究
3. 学会等名 粉体粉末冶金協会2021年度春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 CHEN YE, 阿部 雅崇, 倉科 佑太, 北本 仁孝
2. 発表標題 pH応答性ポリマー / 酸化鉄ナノ粒子複合ハイドロゲルの作製
3. 学会等名 粉体粉末冶金協会2021年度春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田 有紀、北本 仁孝
2. 発表標題 銅イオンとの相互作用によるフミン酸修飾酸化鉄磁性ナノ粒子の交流磁化特性への影響
3. 学会等名 粉体粉末冶金協会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 倉科佑太、竹原万莉那、Ryo Torii、尾上弘晃、北本仁孝
2. 発表標題 遠心分離を用いたキトサンハイドロゲルビーズの生成条件の検討
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 S. Yang, Y. Kurashina, Y. Kitamoto
2 . 発表標題 Optimized coil-based complex magnetic susceptibility measurement system for higher sensitivity and wider frequency range
3 . 学会等名 Virtual Irago Conference 2020
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 R. Huang, Y. Kurashina, Y. Kitamoto
2 . 発表標題 Temperature Responsive Core-Shell Nanocomposites Consisting of Catalytic Co-polymer and Iron-oxide Nanoparticles as Phase Transfer Catalyst
3 . 学会等名 Virtual Irago Conference 2020
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Ryota Sasaki, Yuta Kurashina, Yoshitaka Kitamoto
2 . 発表標題 Magnetic Bio-sensing Using the Distribution of Hydrodynamic Diameter Calculated from AC Magnetization
3 . 学会等名 Virtual Irago Conference 2020
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Y.Takahashi,Y. Kurashina, Y. Kitamoto
2 . 発表標題 Dynamic Magnetization Measurements of Ferrofluids using Giant Magnetoresistive Sensors
3 . 学会等名 Virtual Irago Conference 2020
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Takehara, Y. kurashina, Y. Kitamoto
2. 発表標題 Effect of pH on dynamic magnetization behavior of magnetic nanoparticles in polymer aqueous solution
3. 学会等名 Virtual Irago Conference 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ke Xu, Ye Chen, Yuta Kurashina, Yoshitaka Kitamoto
2. 発表標題 Synthesis of Iron-Oxide Nanoparticles/Thermoresponsive PolymerComposite Hydrogels with Controlled Porous Structure
3. 学会等名 EM-NANO2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshitaka Kitamoto
2. 発表標題 Biomedical Applications of Magnetic Nanoparticles
3. 学会等名 4th International Symposium on Current Progress in Functional Materials 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Kurashina, Maria Emma C. Villamin, Marina Takehara, Yoshitaka Kitamoto
2. 発表標題 pH sensing based on AC magnetization of magnetic nanoparticles contained in hydrogel microbeads
3. 学会等名 12th International Conference on Ferrites (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chiemi Oka, Nanao Horiishi, Yoshitaka Kitamoto
2. 発表標題 Heating efficiency and dipolar interaction in magnetic nanoparticle ensembles
3. 学会等名 12th International Conference on Ferrites (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 生田 歩夢, 佐々木 瞭太, 北本 仁孝
2. 発表標題 コロイド中での酸化鉄ナノ粒子の分散性と交流磁化 特性に関する研究
3. 学会等名 粉体粉末冶金協会2019年度春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 徐 珂, 陳 擘, 倉科 佑太, 北本 仁孝
2. 発表標題 酸化鉄ナノ粒子/熱応答性高分子複合ハイドロゲル の多孔質構造制御
3. 学会等名 粉体粉末冶金協会2019年度春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹原万莉那, ヴィリヤミン マリア エマ, 倉科佑太, 北本仁孝
2. 発表標題 磁性ナノ粒子とキトサンハイドロゲルからなる磁性複合ゲルの作製
3. 学会等名 粉体粉末冶金協会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北本 仁孝, 小田 翔也, 生田 歩夢, Maria Emma Villamin
2. 発表標題 流動性媒体中の磁性ナノ粒子の交流磁場応答とそのバイオデバイスへの応用
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Abe, Y. Kurashina, Y. Kitamoto
2. 発表標題 Study on composites of magnetic nanoparticles and pH-responsive hydrogel for magnetic sensing labels
3. 学会等名 IRAGO Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ke Xu, Ye Chen, Yuta Kurashina, Yoshitaka Kitamoto
2. 発表標題 Synthesis of Iron-Oxide Nanoparticles/PNIPAM Hydrogel Composites with Controlled Porous Structure based on Phase Separation
3. 学会等名 IRAGO Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 X.Zhao, Y.Kurashina, Y. Kitamoto
2. 発表標題 Study on Relationship between Properties of Water in Hydrogel and AC Magnetization of Magnetic Nanoparticles
3. 学会等名 IRAGO Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木瞭太, 生田歩夢, 倉科佑太, 北本仁孝
2. 発表標題 ソルボサーマル合成における酸化鉄磁性ナノ粒子の粒径制御
3. 学会等名 粉体粉末冶金協会 平成30年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 生田 歩夢, 北本 仁孝
2. 発表標題 液中で生体分子を補足した酸化鉄ナノ粒子の交流磁界に対する振舞の解析
3. 学会等名 2018年電気化学秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. E. Villamin, Y. Kitamoto
2. 発表標題 Effect of ionic concentration on dynamic magnetic susceptibility of iron oxide nanoparticles embedded in chitosan hydrogel matrix
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 生田 歩夢, 北本 仁孝
2. 発表標題 液中における酸化鉄ナノ粒子の交流磁界に対する振舞の解析
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

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Akinobu Yamaguchi Atsufumi Hirohata, Yoshitaka Kitamoto, et.al.	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 812
3. 書名 Nanomagnetic Materials: Fabrication, Characterization and Application	

〔産業財産権〕

〔その他〕

北本研究室ホームページ <a href="http://www.kitamoto.iem.titech.ac.jp/">http://www.kitamoto.iem.titech.ac.jp/</a>
--

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
---------------------------	-----------------------	----

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		
英国	University College London		