

令和 7 年 6 月 12 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2024

課題番号：22K14593

研究課題名（和文）非慣性コロイド分散系における力学的整流現象の開拓

研究課題名（英文）Study of mechanical rectification effects in colloidal dispersions in a non-inertial frame

研究代表者

埋田 真樹 (Umeda, Maki)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究職

研究者番号：90914060

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：バーネット効果は、磁性体を力学回転させるとスピン回転結合によってスピン角運動量が回転軸方向に揃い、磁化が生じる現象である。磁気回転比が既知の物質では、磁性体にかかる慣性磁場＝バーネット磁場の強度から回転速度を見積もることができる。本研究では磁性流体中のコロイド磁性粒子にかかるバーネット磁場を測定する系を開発し、回転座標系中で液体中の粒子の回転速度を測定した。その結果、ナノ粒子の回転速度が外部回転よりも高速であること、また溶媒依存性により回転速度の制御が可能であることを明らかにした。液体中の粒子が慣性力と流体の粘性効果により駆動され、回転運動が整流されたことを示す成果である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁気回転効果は物質中の角運動量と物体の運動を結びつける本質的な現象だが、従来は固体が中心だった。本研究は、磁性ナノ粒子を含む機能性流体に測定対象を拡張することで、慣性磁場を高感度に測定し、回転系における揺らぎ駆動の自発回転を初めて実証した。回転座標系下で熱揺動が整流されることでナノ粒子が角運動量を獲得する新しい力学機構を明らかにし、スピンと軌道の角運動量が流体中で結合する様子を観測した。本成果は、スピン流の非平衡ダイナミクスや非慣性系の流体力学の理解を深める基盤となる。社会的には、ナノスケール回転センサや流体駆動素子、対称性を利用した整流技術の創出に貢献する可能性を有する。

研究成果の概要（英文）：The Barnett effect is a phenomenon in which mechanical rotation of a magnetic material causes its spin angular momentum to align along the rotation axis via spin-rotation coupling, resulting in magnetization. For materials with a known gyromagnetic ratio, the rotation speed of the magnet can be estimated from the strength of the Barnett field, an inertial field acting on the material. In this study, we developed a measurement system to detect the Barnett field acting on colloidal magnetic particles in a ferrofluid and measured their rotational velocity in a rotating frame. As a result, we found that the rotational speed of nanoparticles in the fluid exceeds that of the external rotation. Furthermore, we achieved control over the rotational speed depending on the solvent. These findings indicate that the particles in the rotating frame are driven by inertial and viscous hydrodynamic forces, demonstrating mechanical rectification of rotational motion in a fluid.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：磁性 磁気回転効果 磁性流体

## 1. 研究開始当初の背景

磁気回転効果は、磁性体中で電子の角運動量(スピン角運動量+軌道角運動量)と力学運動による力学的角運動量が結合する現象であり、バーネット効果と逆効果であるアインシュタイン・ドハース効果として100年程前に発見された。特にバーネット効果は、回転する磁性体が回転軸方向に磁化される現象[1]で、ゼーマン効果との対応から、回転座標系で電子に働く慣性磁場をバーネット磁場と呼ぶ。バーネット磁場の強度は磁気回転比によって決まるため、電子ではkHzの力学回転に対してnTオーダーと極めて小さな値をとる。通常、バーネット磁場は回転時の磁化によって生じた漏れ磁場を通じて検出するため、帯磁率の大きな強磁性体が試料として好ましい。所属グループは核磁気共鳴分野で用いられる圧縮ガスによる試料の高速回転法や磁気シールドによる地磁気の遮蔽といった技術を組み合わせることで、検出感度を向上させ、測定の対象を常磁性体[2,3]やフェリ磁性体[4]にまで拡張してきた。一方、固体中では原子が格子によって束縛されているのに対し、液体のように含まれる粒子が並進・回転自由度を持って運動できる物理系においてバーネット磁場を測定することができれば、力学作用による液体の流動や液体中の粒子の運動を反映したバーネット磁場の変動が観測できることが期待される。さらに流体としての液体での回転実験の達成は、核ジャイロスコープなどで知られる力学回転に対する気体の角運動量を調べる物理系のテストケースとして、バーネット効果による回転スピン系の統一的な記述に向けた第一歩となる。一方、実験の遂行には液体の高速回転や極低磁場下における液体試料の帯磁率測定といった技術的な課題を解決する必要があった。

## 2. 研究の目的

バーネット効果の測定対象を固体から液体へと拡張する。そのために液体中におけるナノ粒子の角運動量応答を電子スピンを介して定量的に評価可能とする新たな計測手法を構築する。試料として機能性流体である磁性流体を導入することで、含まれる磁性ナノ粒子に働くバーネット磁場を磁場応答としての磁化を通じて高感度に検出し、高速回転させた液中の磁性ナノ粒子中のスピン角運動量と軌道角運動量の挙動を明らかにする。加えて角運動量の検出を通じて、機能性流体という磁性と回転・拡散・粒子間相互作用が複雑に絡んだ液体系における非慣性物理の本質的な理解を目標とする。

## 3. 研究の方法

磁性流体は市販のマグネタイト( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )のコロイドナノ粒子を溶質とし、カーボン系から水、フッ素系といった溶媒の異なる試料を複数購入して用いた。また溶質単体でのバーネット磁場も測定できるよう、溶媒を蒸発させた粉末状の試料も準備した。回転装置[2,3]は試料を入れたカプセルを羽のついた $\text{ZrO}_2$ 製ローターに挿入し、コンプレッサーで圧縮し熱交換器を通じて温調された高圧ガスを吹き付けることで試料の高速回転を実現する。ガスはベアリングと二つのドライビング配管を組み合わせ安定した正逆回転をさせることが可能である。試料がバーネット効果を通じて回転軸方向に磁化した際、生じる漏れ磁場を近接させたフラックスゲートセンサーによって検出し、時間依存性の線形フィットから定常状態時の磁場値を検出した。なおバックグラウンドを差し引くため正逆回転における漏れ磁場の反転操作によって差分を抽出し、平均値を回転誘起の漏れ磁場とする。積算と回転方向の反操作による平均化で数百pTの磁場分解能を実現している。回転数は着色したローター表面で反射される、光ファイバーから出たレーザーの応答を用いて $\pm 10\text{Hz}$ 未満の誤差精度で見積もられる。実際の回転数は $< 8\text{kHz}$ まで可能だが、ガスとローターの摩擦によって試料が発熱する影響を抑制できる $1.8\text{kHz}$ を回転数の上限とした。磁化した試料は円柱形状なことからダイポールモデルによって漏れ磁場を回転誘起磁化 $M$ に換算可能であり、試料の帯磁率で割ることでバーネット磁場 $B = M /$ として算出できる。 $B$ の回転周波数依存性は磁気回転比の逆数に比例するため、 $g$ 因子を導出可能である。地磁気の影響を防ぐため、全てのセットアップは磁気シールドルームとパーマロイ製の磁気シールドの中に配置した。また、低温で溶媒を凍結させることでナノ粒子の運動自由度がバーネット磁場に与える影響を調べるため、低温用バーネット磁場測定装置[4]も併用した。前述した回転機構と磁場測定機構がクライオスタット内に設置されたものであり、室温配置での空気に代えて液体窒素で冷却された乾燥窒素を圧縮ガスとして試料に吹き付けて回転させる。試料温度の制御にはガス圧力とガス温度、二つのパラメータが主要となるため、圧力コントローラーと熱交換器に巻きつけたヒーター線の出力を同期させてPID制御することで温調を行った。

本手法を用いて液体試料のバーネット磁場の溶媒依存性や温度依存性を調べ、固体である粉末試料におけるバーネット磁場の結果と比較することで、回転座標系における磁性流体中のナノ粒子の運動がバーネット磁場に及ぼす効果を調べた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 液体試料のバーネット磁場観測装置の開発

磁性流体は液体試料であるため、kHz に達する高速回転を実現するにはローターへの試料の封入を工夫する必要があった。そこで反磁性の小さなエポキシ樹脂を円柱状に成形したカプセルに試料を封入することで高速回転時の遠心力に耐えつつコンパクトな試料構造を実現した。また、従来用いていた装置では検出した漏れ磁場からバーネット磁場を求めるのに帯磁率を別途、MPMS といった高感度磁気測定装置で検出する必要があった。ただ、MPMS のような超伝導磁石を用いた磁化測定装置は残留磁束の影響で低磁場帯の測定には不向きである。さらに測定系を変えることで、液体は封入の時点で正確な量を測り取ることが困難なことから再現性という観点で課題になる。理想的には同試料、同配置でバーネット磁場測定と帯磁率測定をすることが期待される。そこで試料磁気センサー間の距離の校正に用いていたソレノイドコイルに着想を得、試料を封入したカプセルを低インダクタンスのソレノイドコイルに挿入し、電流を流した時の漏れ磁場から nT オーダーの外部磁場下での帯磁率測定に成功した。従来、用いたマグネタイトは超常磁性体なため、帯磁率は磁化の磁場依存性から線形近似で求められるが、本手法は磁気ドメインの構造が低磁場帯に反映される強磁性体においても極低磁場帯での帯磁率測定に応用可能である。本測定系を用いて測定した粉末と凍結した状態のバーネット磁場は  $g'$  因子が 2 未満という結果となり、ナノ粒子界面の空間反転対称の破れを反映した軌道角運動量の効果として先行研究[3]に加えて 2 件目の超常磁性体のバーネット効果の検出を達成した。本成果は低温用バーネット磁場測定装置の一部として、筆頭著者として Review of scientific instruments に掲載され、Editor's picks ならびに AIP Publishing Showcase に選出された。

##### (2) 回転流体中の粒子の自発回転効果の発見

本測定系を用いて室温で磁性流体のバーネット磁場を観測したところ、粉末試料の場合に比べて約 2 倍の強度を示すことが分かった。磁性体であるマグネタイトのバーネット磁場は磁気回転比によって決まることから、余剰なバーネット磁場は回転座標系でマグネタイトナノ粒子が外部回転と同方向に「付加的回転」を行っていることを示唆している。回転座標系におけるブラウン運動を考慮すると慣性力であるコリオリ力によって時間反転対称性が破れ、粒子の受ける粘性抵抗が非対称になることで自転を誘起することが想定される。本仮説の検証のため、はじめに溶媒を低温で凍結させるとバーネット磁場は固体試料の場合と同程度になった。よって付加的回転にはブラウン運動が不可欠なことが明らかになった。さらにバーネット磁場は漏れ磁場の時間発展が定常状態に達した点での値から算出しているため、粉末試料に対する磁場強度から粒子の終端角速度を推定できる。回転座標系で慣性力と液体中で回転する剛体に働く揚力とのつり合いを考慮すると、粘性や濃度に依存せず溶媒とナノ粒子の密度比のみで終端角速度依存性が記述可能である。濃度依存性の検証に加え、共通の溶質を含んだ磁性流体で溶媒依存性を調べて得られた終端角速度は、つり合いから見積もられる角速度と定量的に一致することを確認した。この結果は、回転非慣性系下で時間反転対称性が破れ、ブラウン運動を駆動力として力学回転が整流されることを実験的に初めて立証した成果である。また、本現象の理論モデル化および数値計算を行った。モデルでは、熱揺動するナノ粒子が慣性力の影響で軌道を変化させ、その結果として粒子表面に流速分布が生じるという機構を想定している。ここから慣性力を考慮した回転座標系における分子動力学シミュレーションを試みたが、マイクロ秒からミリ秒の時間スケールで定常回転に至るには計算コストが大きく、粒子の自発回転は再現できなかった。そこで簡易モデルとして、回転座標系でのランジュバン方程式と、粒子表面の流速分布による粘性トルクを取り入れた剛体回転方程式を連立し、ナノ粒子の角速度を計算した。その結果、角速度は有限となるが、実験条件に基づいたパラメータを用いると外部回転速度が粘度に対して小さく、オーバーダンピング近似が成り立ち、慣性項が駆動力として働かないことが明らかとなった。これは実験で観測された自発回転とは整合せず、実験結果から無視していた磁気的相互作用といった粒子の磁気的性質を考慮する必要がある可能性を示唆する。

本研究は開発した液体バーネット効果の測定系を用いることで、従来の光学手法では検出困難とされていた懸濁液中のナノ粒子の回転運動を電子スピンのバーネット効果を通じて検出した世界初の成果である。流体力学的視点から、非慣性系におけるブラウン運動が角運動量を生む新機構は普遍的な物理原理としての意義も大きい。本成果を皮切りに、今後は詳細なモデル化に向け非慣性系の流体力学の拡張や磁性流体の機能化、磁気流体発電への応用が期待される。

#### 【参考文献】

- [1] S. J. Barnett, Phys. Rev. **6**, 239 (1915).
- [2] M. Ono *et al.*, Phys. Rev. B **92**, 174424 (2015).
- [3] Y. Ogata *et al.*, JMMM **442**, 329-331 (2017).
- [4] M. Imai *et al.*, Appl. Phys. Lett. **114**, 162402 (2019).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Harii Kazuya, Umeda Maki, Arisawa Hiroki, Hioki Tomosato, Sato Nana, Okayasu Satoru, Ieda Jun'ichi	4. 巻 92
2. 論文標題 Magnetic Hysteresis Induction with Nanocolumnar Defects in Magnetic Insulators	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 073701-1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/jpsj.92.073701	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 Umeda Maki, Chudo Hiroyuki, Imai Masaki, Sato Nana, Saitoh Eiji	4. 巻 94
2. 論文標題 Temperature-variable apparatus for measuring Barnett field	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 063906-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0142318	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 Lee Oscar, Yamamoto Kei, Umeda Maki, Zollitsch Christoph W., Elyasi Mehrdad, Kikkawa Takashi, Saitoh Eiji, Bauer Gerrit E.W., Kurebayashi Hidekazu	4. 巻 130
2. 論文標題 Nonlinear Magnon Polaritons	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 046703-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.130.046703	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

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 埋田 真樹, 中堂 博之, 今井 正樹, 松尾 衛, 佐藤 奈々, 前川 禎通, 齊藤 英治
2. 発表標題 Barnett effect in ferrofluids
3. 学会等名 68th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 埋田 真樹, 中堂 博之, 今井 正樹, 松尾 衛, 佐藤 奈々, 前川 禎通, 齊藤 英治
2. 発表標題 パーネット効果を用いた回転系における磁性ナノ粒子の自発的回転効果の観測
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Maki Umeda
2. 発表標題 Barnett effect in solids and liquids
3. 学会等名 Workshop on Interdisciplinary Spin Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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