

原子力機構博士研究員としての日々

My new days as a postdoctoral researcher at JAEA

埋田 真樹 スピン-エネルギー変換材料科学研究グループ
UMEDA Maki Research Group for Spin-energy Transformation Science



2021年4月から博士研究員としてスピン-エネルギー変換材料科学研究グループ（スピンGr）に着任した埋田です。私は学部時代に著書を読んで感銘を受けたことをきっかけに、東北大学・金属材料研究所で活躍され、同グループリーダーを務められる齊藤英治教授（現東京大学教授）の研究室の門戸を叩きました。寒冷な東北の地に身を置きながら、先端研究に取り組んだ大学院での5年間は毎日が刺激的かつ魅力的であり、博士取得後の現在も、茨城の恵まれた環境で同分野の研究に携わられている日々を本当に幸福に思っています。

私の研究対象は、電子の軌道運動由来の軌道角運動量と電子自身もつスピン角運動量です。スピンGrは新たな角運動量源として力学回転に注目し、電子スピンと結合した磁気回転効果を検証してきました。古典力学におけるジャイロ効果を考えると、電子スピンではスピン角運動量と力学回転が結合するスピン-回転結合が対応します。これに基づく磁気回転効果として、物体を高速回転させると回転軸に沿って物体が磁化するバーネット効果[1]と、磁性体に外部から磁場を与えて磁化させると回転運動するアインシュタイン-ドハース効果[2]が知られています。問題は、スピン-回転結合を通じて磁気モーメントの向きが回転運動と共に変化した際の信号強度が、巨視的に見ても非常に微小で検出が困難である点です。バーネット効果に関して言えば、試料を数百Hz~数kHzで高速回転させながらnTオーダーの磁化由来の磁場を検出する必要があります[3]。着任後初めてグループが有するバーネット効果測定用の装置を動かした時は、「言うは易し、行うは難し」を体現したような巧みな実験技術構成の数々に感動を覚えました。現在はこの装置を用いて、機能性材料である磁性流体中のバーネット効果の測定に取り組んでいます。磁性流体は、溶媒中で界面活性剤によって保護された磁性ナノ粒子が格子に束縛されていないため、固体に対して並進と回転の自由度を持って運動する、という特徴を持ちます。液体を固体と同程度に回す、という技術的な課題がありましたが、スピンGrの中堂さんが開発されたエポキシ樹脂カプセルに磁性流体を封入する手法でこれを解決し、現在回転周波数2kHzの高速回転を達成しています。結果、磁気回転比に換算したときの値が通常の電子の値~2.0から大きくずれることが分かってきました。バーネット効果は個々の磁性ナノ粒子に対して働くことを踏まえると、「ナノ粒子の自転が回転非慣性系の粘性流体中では変調

I am Maki Umeda and I have joined the Research Group for Spin-Energy Transformation Science as a postdoctoral researcher in April 2021. When I was an undergraduate, I was impressed to read a book written by Prof. Saitoh, which led me to his laboratory. Prof. Saitoh, who worked at the Institute for Materials Research, Tohoku University (now belongs to the University of Tokyo), is also the current group leader of Spin Gr. The five years I spent in the graduate school in the cold Tohoku region, working on advanced research, were exciting and fascinating. I am very happy to be able to continue my research in the same field in Ibaraki after finishing my PhD.

My research focuses on the orbital angular momentum from the orbital motion of the electron and the spin angular momentum of the electron itself. Our group has focused on mechanical rotation as a new source of angular momentum and has investigated the gyromagnetic effect. The gyroscopic effect in classical mechanics corresponds to the spin-rotation coupling, where the spin angular momentum and the mechanical rotation are coupled in the electron spin. There are two gyromagnetic effects: the Barnett effect [1], in which an object is magnetized along its axis of rotation when it is rotated at high speed, and the Einstein-de Haas effect [2], which is known to cause rotational motion in magnetic materials when they are magnetized by an external magnetic field. The problem is while the direction of the magnetic moment and the rotational motion couple macroscopically via spin-rotational coupling, the signal is very small and difficult to detect. In the case of the Barnett effect, it is necessary to detect magnetic fields of the order of nT while rotating the sample at high speeds of several hundred Hz to several kHz [3]. When I first operated the group's apparatus for the Barnett measurement, I was impressed by the experimental configurations, which embodied the saying "easier said than done". I've been using the instrument to measure the Barnett effect in ferrofluids. Ferrofluids are characterized by the fact that the magnetic nanoparticles, protected by surfactants in the solvent, are not bound by a lattice and are therefore free to move with translational and rotational degrees of freedom relative to a solid. The technical difficulty of rotating a liquid same as a solid has been solved by encapsulating technique of the ferrofluid in a resin epoxy capsule developed by Dr.

されているのではないか」という仮説を立て、系統測定による物理的起源の解明に向けた研究を続けています。

また、東海タンデム型重イオン加速器を用いた、高エネルギー重イオン照射による磁性絶縁体のナノ加工プロジェクトにも参画しています。メタマテリアルとは微細加工技術を駆使し、外場であるマイクロ波の波長サイズの素子を導波路中に作りこむことで、負の屈折率といった人工現象を発現させる機能性材料です。磁気励起の手法としてマイクロ波が用いられることを考慮すると、磁性体そのものを加工し、磁性体中を伝搬する静磁波を自在に操作する「磁気」メタマテリアルの実現が期待されます。この発想は自然なことで、磁性金属を対象としては現在まで多くの先行研究がなされています。一方、磁性絶縁体は伝導電子の散乱がなく高周波領域での磁気損失が小さいという優れた特性を持ち、 $Y_3Fe_5O_{12}$ や $Lu_3Fe_5O_{12}$ といったガーネットフェライトがスピントロニクス研究によく用いられます。しかしこういった酸化物は非常に硬く、磁性の明瞭な境界が重要となる磁気メタマテリアル作製では、加工の際、物理的破壊や発熱を伴うミリング、化学エッチング、レーザーといった手法が通用しません。この問題を解決するため、Spin Gr では重イオン通過による結晶の構造破壊を利用した全く新しい磁性絶縁体加工技術の開発プロジェクトを進めています。これは絶縁体中を高エネルギーの重イオンが通過すると、イオンの通過部分の結晶が電子励起されてアモルファス化し、直径が ~ 20 nm程度の円柱状に結晶構造の乱れた欠陥が生じる現象を利用したものです。既に磁化とスピン熱電効果の測定によって、重イオン照射領域では磁性が消失することを実証しています [4]。現在は、重イオン遮蔽用のマスクを組み合わせることで、数百 nm から数 μ m オーダーのパターン加工をし、特性評価を続けています。仮に重イオン照射による磁性絶縁体加工法が確立できれば、スピン波演算回路の実現といった、原子力技術を活用した磁性材料、磁気デバイス開発の新たな局面が期待されます。

昨年から今年にかけてはコロナウイルスが猛威を振るい、卒業後も研究活動を続けられるのか不安になったことも多々ありました。そんな厳しい状況の中で、私に研究の機会を与えて下さった齊藤先生、Spin Gr の皆様、岡センター長をはじめとした先端研の皆様、そして日本原子力研究開発機構に感謝の気持ちを忘れずに、研究に邁進したいと思います。今後ともよろしく願いいたします。

参考文献 References

- [1] S. J. Barnett, Phys. Rev. 6, 239 (1915).
- [2] A. Einstein and W. J. de Haas, Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences (KNAW), 18, 696 (1915).
- [3] M. Ono *et al.*, Phys. Rev. B 92, 174424 (2015).
- [4] S. Okayasu *et al.*, J. Appl. Phys. 128, 083902 (2020).

Chudo. A high rotational frequency of 2 kHz has now been achieved. In addition, we found that the converted value of the gyromagnetic ratio varies significantly in ferrofluids compared to ~ 2.0 of electron. Considering that the Barnett effect acts on individual magnetic nanoparticles, we hypothesize the rotation of the nanoparticles may be modulated in a rotating non-inertial viscous fluid, and we continue to investigate its physical origin through systematic measurements.

I am also participating in a project on nanofabrication of magnetic insulators by high energy heavy ion irradiation using the JAEA-Tokai tandem accelerator. Metamaterials are functional materials which, using microfabrication techniques can be made into devices with the size of the wavelength of the microwave, and produce artificial phenomena such as a negative refractive index. Considering microwaves are used for magnetic excitation, it is expected that "magnetic" metamaterials will be realized by processing the magnetic material itself and freely manipulating the magnetostatic waves propagating in the magnetic material. This is a natural idea, and there has been a lot of previous research using magnetic metals. Garnet ferrites such as $Y_3Fe_5O_{12}$ and $Lu_3Fe_5O_{12}$ are often used in spintronics research because conduction electrons are not scattered in insulators and have low magnetic losses even in the high-frequency regime. However, these oxides are very hard, and because a clear boundary of magnetism is important for their functioning, milling, chemical etching, and lasers, which involve physical destruction and heat generation, are not applicable methods for processing. To solve this problem, Spin Gr promotes a project to develop a completely new magnetic insulator processing technique by heavy ion irradiation. This is based on the phenomenon that the passage of high-energy heavy ions through an insulator causes electronic excitation and amorphization of the crystal, resulting in the formation of cylindrical defects with a diameter of ~ 20 nm. We have already demonstrated by magnetization and spin-thermoelectric measurements that the magnetism disappears in these irradiated regions [4]. Characterization of defect-based patterning in the order of a few hundred nm to a few μ m using heavy ion shielding masks is now in progress. If a new magnetic insulator processing method using heavy ion irradiation can be established, it is expected to open up a new field in the fabrication of magnetic materials and magnetic devices using nuclear technology, such as the realization of spin-wave logic gates.

Since last year, the pandemic of COVID-19 has broken out worldwide, and I often wondered whether I could continue my research after graduation. I would like to express my gratitude to Prof. Saitoh, all the members of Spin Gr, Director General Oka, other members of the Advanced Science Research Center, and the Japan Atomic Energy Agency for giving me the opportunity to do research even in such a tough situation.