

創発電磁場によるインダクタ

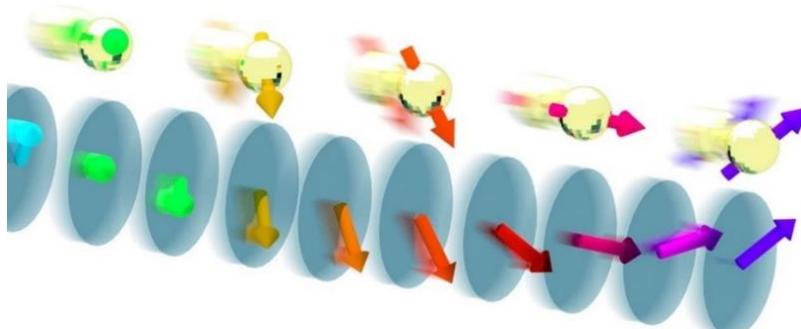
—インダクタの微細化に向けた新原理の実証—

理化学研究所（理研）創発物性科学研究センター量子ナノ磁性研究チームの横内智行客員研究員（東京大学大学院総合文化研究科助教）、強相関理論研究グループの永長直人グループディレクター（東京大学大学院工学系研究科教授）、強相関物性研究グループの十倉好紀グループディレクター（東京大学卓越教授／東京大学国際高等研究所東京カレッジ）、東京大学物性研究所の大谷義近教授（理研創発物性科学研究センター量子ナノ磁性研究チームチームリーダー）らの共同研究グループ^{*}は、「創発電磁場」と呼ばれる量子力学的な効果によって生じる実効的な電磁場を用いた、新しいインダクタ^[2]の原理の実証に成功しました。

本研究成果は、電気機器や電気回路などの小型化に必要な回路素子の一つであるインダクタの微細化に向けた、新原理の構築につながると期待できます。

今回、研究グループは、らせん磁気構造^[3]などの非共線的な磁気構造^[3]が電流で駆動すると、創発電場によってインダクタンス^[2]が生じること、また、このインダクタンスの値は従来のインダクタとは異なり、素子を小さくするにつれて増大することを理論的に明らかにしました。さらに、この理論を実証するために、短周期のらせん磁気構造を持つ物質 $Gd_3Ru_4Al_{12}$ （Gd：ガドリニウム、Ru：ルテニウム、Al：アルミニウム）を作製し、インダクタンスを評価しました。その結果、らせん磁気構造が電流駆動するとインダクタンスが生じること、その値は素子を小さくするにつれて増大することが実験的に明らかになりました。以上のことから、創発電磁場によるインダクタがインダクタの微細化に適していることが示されました。

本研究は、科学雑誌『Nature』の掲載に先立ち、オンライン版（10月7日付：日本時間10月8日）に掲載されました。



創発インダクタの概念図（上は電子とスピンを、下は電流駆動されたらせん磁気構造を表す）

※共同研究グループ

理化学研究所 創発物性科学研究センター

量子ナノ磁性研究チーム

客員研究員 横内 智行 (よこうち ともゆき)
(東京大学大学院総合文化研究科 助教)

動的創発物性研究ユニット

ユニットリーダー 賀川 史敬 (かがわ ふみたか)
(東京大学大学院工学系研究科 准教授)

トポロジカル量子物質研究ユニット

ユニットリーダー マックス・ヒルシュベルガー (Max Hirschberger)
(東京大学大学院工学系研究科 特任講師)

強相関理論研究グループ

グループディレクター 永長 直人 (ながおさ なおと)
(東京大学大学院工学系研究科 教授)

強相関物性研究グループ

グループディレクター 十倉 好紀 (とくら よしのり)
(東京大学卓越教授/東京大学 国際高等研究所東京カレッジ)

東京大学 物性研究所

教授 大谷 義近 (おおたに よしちか)

(理研 創発物性科学研究センター 量子ナノ磁性研究チーム チームリーダー)

研究支援

本研究は、科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 CREST「ナノスピン構造を用いた電子量子位相制御 (研究代表者: 永長直人)」、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費補助金若手研究「トポロジカルスピン構造での実空間ベリ一位相起源の高効率スピン電荷変換現象の開拓 (研究代表者: 横内智行)」、同特別研究員奨励費「トポロジカル量子物質の物質開発と新規量子輸送現象の開拓 (外国人特別研究員: Max Hirschberger)」、フンボルト財団による支援を受けて行われました。

1. 背景

入力電流の時間変化に比例した電場を生じさせる回路素子「インダクタ」は、抵抗、キャパシタ (コンデンサ) に並ぶ三大受動素子として、無線回路や電源回路など身の回りのさまざまな電気機器の電気回路に使われています。

これらの機器を小型化するには、インダクタを微細化する必要がありますが、古典電磁気力学の法則に基づいて動作する従来のインダクタはコイルでできていて、微細なコイルを作るには高い技術とコストを要します。また、従来のインダクタでは、インダクタンスの値がコイルの断面積に比例して小さくなることから、インダクタの微細化は難しいと考えられてきました。

2. 研究手法と成果

共同研究グループは、インダクタの微細化の課題を解決するために、古典電磁気学に基づく従来の原理に代わる新しい原理として、「創発電磁場」に着目しま

した。近年、物質中を運動する電子がベリー位相と呼ばれる量子力学的な位相を獲得し、その位相が「創発電磁場」と呼ばれる実効的な電磁場として、電子に作用し得ることが明らかになってきています。

創発電磁場を用いると、磁性体中において、伝導電子がそのスピン⁰の向きを局在スピンの向きと同じ方向に束縛されて運動するときの振る舞いを理解することができます。例えば、スキルミオン⁰と呼ばれるナノスケールの渦状の磁気構造は、強大な「創発磁場」を伝導電子にもたらしめます。また、強磁性磁壁⁰やらせん磁気構造、縦型コニカル磁気構造^[3]といった「非共線的な磁気構造」が動くときには、その磁気構造の変位の時間変化に比例した「創発電場」が生じます。

まず、共同研究グループは、非共線的な磁気構造が電流駆動するときの変位が電流に比例することから、創発電場が電流の時間変化に比例することを理論的に示しました。電流の時間変化に比例した電場が生じるということは、非共線的な磁気構造の電流駆動によりインダクタンスが生じることを意味しています。このインダクタンスのことを「創発インダクタンス」と呼ぶことにします。また、創発インダクタンスは、コイルにおける従来の古典電磁気学に基づくインダクタンスとは異なり、素子の断面積を小さくするにつれて増大することも理論的に明らかにしました。さらに、「創発インダクタ」は、コイルのような複雑な形を作らなくても、単一の物質を直方体に加工するだけで実現できます。これらの性質から、創発インダクタンスはインダクタの微細化につながると考えられます。

次に、この理論を実証するために、物質 $Gd_3Ru_4Al_{12}$ (Gd: ガドリニウム、Ru: ルテニウム、Al: アルミニウム) に着目しました。この物質では、RKKY 相互作用⁰による磁気フラストレーションによって、特定の温度・磁場領域において、数ナノメートル (nm、1nm は 10 億分の 1 メートル) 周期のらせん磁気構造や縦型コニカル磁気構造といった非共線的な磁気構造が形成されます。

まず、微細加工技術を用いて、 $Gd_3Ru_4Al_{12}$ の単結晶をマイクロメートル (μm 、 $1\mu m$ は 100 万分の 1 メートル) オーダーの直方体の素子に加工しました (図 1)。この素子の体積は、従来型の小型インダクタンスと比べて 100 万分の 1 程度しかありません。

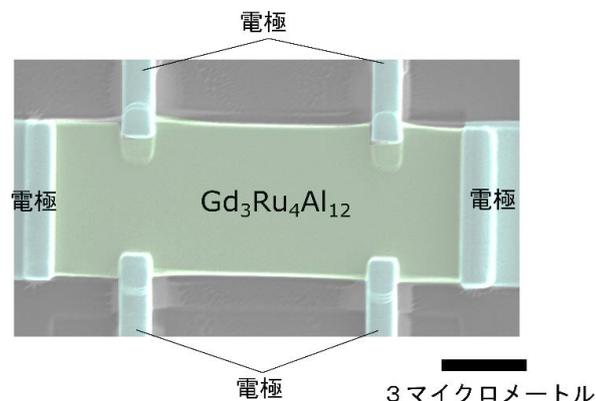


図 1 本研究で用いた素子の電子顕微鏡像の一例

緑色の部分が $Gd_3Ru_4Al_{12}$ 。水色の部分はタングステンでできた電極。

次に、作製した素子を用いて、らせん磁気構造が形成される約 20 K (-253 °C) 以下において、温度と磁場を変えながらインダクタンスの大きさを評価しました。その結果、らせん磁気相や縦型コニカル相といった非共線的な磁気相では、大きなインダクタンスが生じることが分かりました (図 2)。その値は、数百ナノヘンリー^[2] (nH、1nH は 10 億分の 1 ヘンリー) 程度であり、一般的に使われているインダクタンス値に匹敵する大きさです。

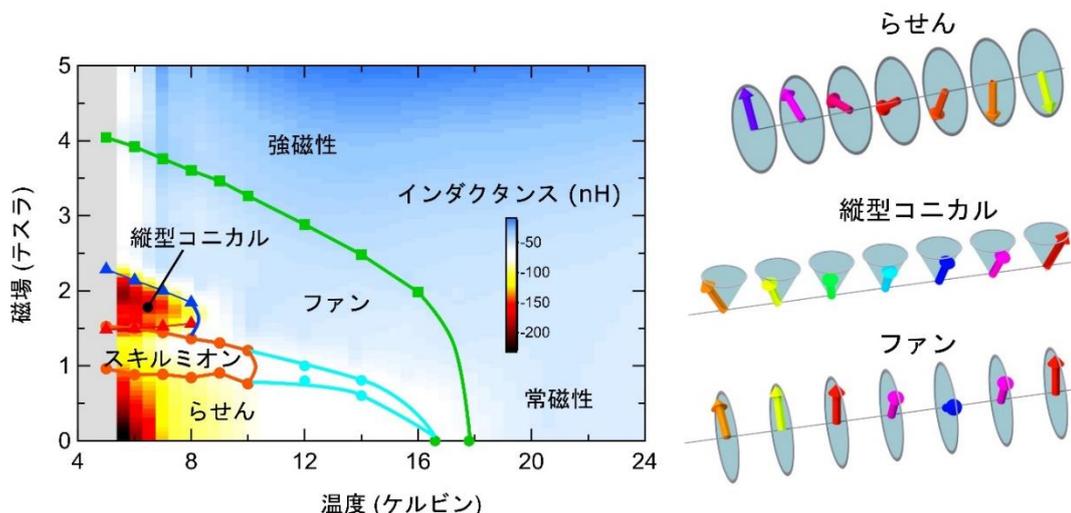


図 2 観測されたインダクタンスと磁気構造の模式図

- (左) 温度と磁場に対する磁気構造とインダクタンスの大きさを示すグラフ。グラフの色は、実験で測定したインダクタンスの大きさを表し、赤い部分はインダクタンスが大きい部分を、青い部分が小さい部分を示す。大きなインダクタンスが、らせん磁気構造相や縦型コニカル磁気構造相といった非共線的な磁気構造で観測された。水色の線で囲まれた領域は、磁気構造がまだ解明されていない相を示す。緑の線は、ファン相と強磁性相の境界を示す。
- (右) 非共線的な磁気構造の模式図。上から、らせん、縦型コニカル、ファン構造。矢印の向きがスピンの向きに対応する。

さらに、電流の値や周波数、磁場方向などを系統的に変化させ、インダクタンスの値を評価しました。その結果を総合的に検証したところ、今回観測されたインダクタンスが、らせん磁気構造の電流駆動によって生じた創発インダクタンスであることが強く示唆されました。加えて、さまざまな大きさの試料を作製し、インダクタンスと素子の大きさの関係を調べました。その結果、創発インダクタンスの理論で予測した通り、素子の大きさを小さくすると、インダクタンスの値が増大することが分かりました (図 3)。この従来のコイルにおけるインダクタンスとは反対の素子サイズ依存性から、創発インダクタンスがインダクタの微細化につながるということが実験的に示されました。

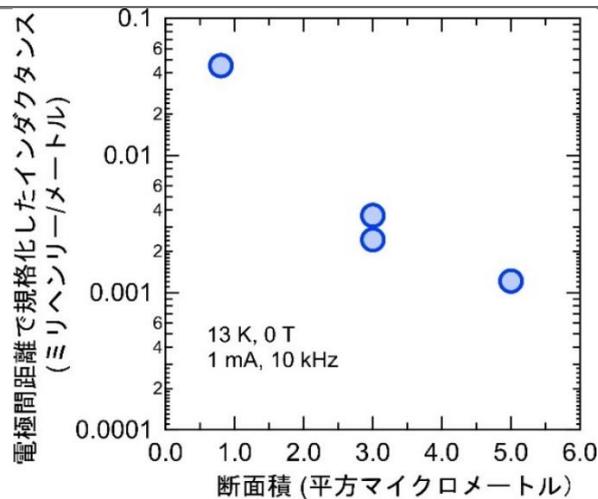


図3 素子の断面積に対する電極間距離で規格化したインダクタンスの変化

インダクタンスの値は、電極間距離に比例するため、電極間距離で規格化したインダクタンスで比較している。断面積が小さくなるにつれて、規格化したインダクタンスの値が増大することが分かる。

3. 今後の期待

本研究では、創発電磁場を用いたインダクタの新原理を実証しました。この現象は今回対象とした物質 $Gd_3Ru_4Al_{12}$ に限らず、らせん磁気構造や強磁性磁壁といった非共線的な磁気構造を持つさまざまな磁性体において生じると予想されます。今後、物質探索を進めていくことで、室温で動作可能な創発インダクタの応用につながると期待できます。

また、今回観測されたインダクタンスの符号は負でした。負のインダクタンスは、無線通信などで使用される高周波回路などへの応用が提唱されています。しかし、古典電磁気学に由来する従来のインダクタンスでは、負のインダクタンスはエネルギー的に不安定であることから、その実現は難しいことが知られています。創発インダクタンスの原理では、正と負どちらの値でも取ることができるため、負のインダクタンスを持つインダクタの実現への展開も期待できます。

4. 論文情報

<タイトル>

Emergent electromagnetic induction in a helical-spin magnet

<著者名>

T. Yokouchi, F. Kagawa, M. Hirschberger, Y. Otani, N. Nagaosa, Y. Tokura

<雑誌>

Nature

<DOI>

10.1038/s41586-020-2775-x

5. 補足説明

[1] 創発電磁場

量子力学では電子の状態は波動関数によって記述される。特に波動関数がある状態に束縛されているとき、波動関数が位相を獲得することがある。この位相は発見者の名前に由来して「ベリー位相」と呼ばれ、電子に対して実効的に電磁場として作用する。この電磁場を創発電磁場と呼ぶ。

[2] インダクタ、インダクタンス、ヘンリー

入力電流の時間変化に比例した電圧を生じさせる回路素子のことを「インダクタ」と呼び、入力した電流と生じた電圧の比例係数を「インダクタンス」と呼ぶ。また、インダクタンスの単位は「ヘンリー」である。1ヘンリーは、1秒間に1アンペアの割合で電流が変化するとき1ボルトの電圧を生じる際のインダクタンスと定義される。

[3] らせん磁気構造、非共線的な磁気構造、縦型コニカル磁気構造

強磁性や反強磁性構造では、スピンの向きが上か下を向いており、一直線上にそろっている。このような磁気構造を「共線的な磁気構造」と呼ぶ。一方で、「らせん磁気構造」や「縦型コニカル磁気構造」のように、スピンの向きがいろいろな方向を向いている磁気構造を「非共線的な磁気構造」と呼ぶ。

[4] スキルミオン、スピン

固体中の電子は、「スピン」と呼ばれる電子の自転に対応する自由度を持つ。このスピンの間には相互作用があるために、スピンの整列した状態が実現することがある。例えば、磁石（強磁性状態）は電子のスピンの向きが全て同じ状態にそろった状態である。ある条件下では、スピンの向きが渦巻き上に整列した状態「スキルミオン」が形成される。スキルミオンは中心のスピンの向きと外側のスピンの向きが反対向きになっており、その間を連続的につなげた構造をしている。スキルミオンは、「巻き数」と呼ばれるスピンの向きを連続的に変化しても不変な量が有限になる特殊な構造をしている。このように、有限な巻き数をもつ構造をトポロジカルなスピン構造と呼ぶ。

[5] 強磁性磁壁

スピンの向きがそろった状態を強磁性状態と呼ぶ。ある条件下では、物質全体でスピンの向きが同じ方向にそろったのではなく、スピンの向きが異なるいくつかの領域に分かれることがあり、これらの領域のことを強磁性磁区と呼ぶ。強磁性磁区の間を強磁性磁壁と呼び、スピンの向きが上から下へ徐々に回転する非共線的な磁気構造をしている。

[6] RKKY 相互作用

金属中の伝導電子を介して生じるスピン間の相互作用のこと。この相互作用は磁気フラストラーションを生じる。RKKYは、この相互作用を導出した4人の物理学者の名前の頭文字からきている。

[7] 磁気フラストレーション

例えば、三角格子上に反強磁性的なスピン間相互作用がある場合を考える。一つ目と二つ目のサイトにスピンを反平行に並べると、エネルギーが最低になるが、その際、三つ目のスピンの方向が一意に定まらなくなってしまふ。このように相互作用が拮抗し、安定な磁気状態が一つに定まらない状態を磁気フラストレーションと呼ぶ。この場合、全てのスピンがある程度妥協して、スピンが少しずつ回転した磁気構造が実現しやすくなる。本研究の対象物質である $Gd_3Ru_4Al_{12}$ では、この磁気フラストレーションのために、らせん磁性体や、縦型コニカル、スキルミオンといった多彩なスピンの回転した磁気構造が形成する。

6. 発表者・機関窓口

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせください。

理化学研究所 創発物性科学研究センター

量子ナノ磁性研究チーム

客員研究員 横内 智行 (よこうち ともゆき)

(東京大学大学院総合文化研究科 助教)

強相関理論研究グループ

グループディレクター 永長 直人 (ながおさ なおと)

(東京大学大学院工学系研究科 教授)

強相関物性研究グループ

グループディレクター 十倉 好紀 (とくら よしのり)

(東京大学卓越教授/東京大学 国際高等研究所東京カレッジ)

東京大学 物性研究所

教授

大谷 義近 (おおたに よしちか)

(理研 創発物性科学研究センター 量子ナノ磁性研究チーム チームリーダー)

<機関窓口>

*今般の新型コロナウイルス感染症対策として、理化学研究所では在宅勤務を実施しておりますので、メールにてお問い合わせ願います。

理化学研究所 広報室 報道担当

東京大学 大学院工学系研究科 広報室

東京大学 物性研究所 広報室

科学技術振興機構 広報課

<JST 事業に関すること>

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

嶋林 ゆう子 (しまばやし ゆうこ)