PRESS RELEASE

2021 年 8 月 19 日
理化学研究所
東京大学
科学技術振興機構

創発インダクタの室温動作を実証

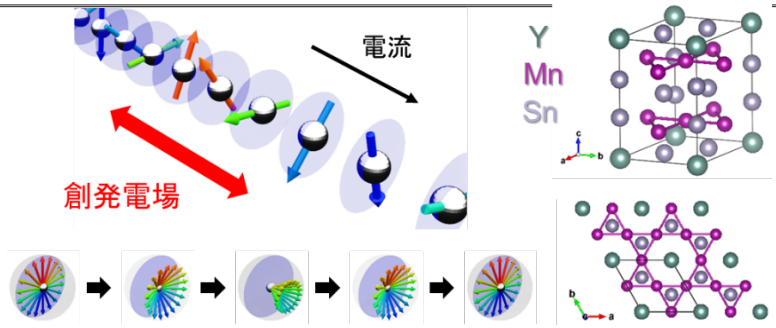
ーインダクタ素子の微細化に向けた飛躍ー

理化学研究所（理研）創発物性科学研究センター強相関物性研究グループの北折曉研修生（東京大学大学院工学系研究科博士課程 2 年）、金澤直也客員研究員（東京大学大学院工学系研究科講師）、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）、十倉好紀センター長（理研強相関物性研究グループ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）らの研究グループ※は、「創発電磁場[1]」と呼ばれるナノ磁気構造がもたらす巨大な実効電磁場を利用した「創発インダクタ[2]」の室温動作に成功しました。

本研究成果は、創発インダクタの応用化に向けて課題となっていた動作温度の飛躍的な向上を実現したもので、身の回りの電気機器に必要な素子の一つであるインダクタ[3]の微細化につながることが期待できます。

今回、研究グループは、らせん磁気構造[4]を示す YMn_6Sn_6（Y：イットリウム、Mn：マンガン、Sn：スズ）を用いて、室温において創発電場に由来するインダクタンス[3]が生じることを実験的に示しました。従来のインダクタとは異なり、インダクタンスの大きさは素子を小さくするにつれて増大するため、素子の微細化に有効です。加えて、温度・磁場・電流密度の変化に応じてインダクタンスの符号が反転する新しい現象も観察されました。この結果は、スピン[5]の電流駆動が生み出すインダクタンスに複数のメカニズムの競合が存在することを示唆しており、創発インダクタのさらなる機能の可能性が広がりました。

本研究は、科学雑誌『*Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America（PNAS）*』オンライン版（8 月 14 日付）に掲載されました。



創発インダクタの概念図と YMn_6Sn_6 の結晶構造

※研究グループ

理化学研究所　創発物性科学研究センター
　強相関物性研究グループ
　　研修生　　北折　曉　　（きたおり　あき）
　　（東京大学　大学院工学系研究科　博士課程 2 年）
　　客員研究員　　金澤　直也　（かなざわ　なおや）
　　（東京大学　大学院工学系研究科　講師）
　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）
　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）
　創発物性科学研究センター
　　センター長　　十倉　好紀　（とくら　よしのり）
　　（理化学研究所　創発物性科学研究センター　強相関物性研究グループ
　　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）

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）」、「トポロジカル絶縁体ヘテロ接合による量子技術の基盤創成（研究代表者：川﨑雅司）」、日本学術振興会（JSPS）科学研究費補助金 基盤研究（B）「Zak 位相制御による表面状態設計とスピントロニクス機能実現（研究代表者：金澤直也）」、同新学術領域研究（研究領域提案型）「トポロジカルスピン液晶制御と巨大電子散乱現象（研究代表者：金澤直也）」、同基盤研究（A）「反転対称性が破れた電子系における非線形非相反応答の理論（研究代表者：永長直人）」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であるインダクタは、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。

これら電気機器の小型化には、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るため、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も、インダクタの微細化は難しいと考えられてきました。

この問題を解決する新原理として、近年提案されたのが「創発インダクタ」です。非共線的な磁気構造[6]を持つ物質中などでは、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ます。この位相は「創発電磁場」と呼ばれる実効的な電磁場として電子の運動に作用することが知られています。らせん磁気構造が電流駆動されると、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。電流の時間変化に比例した電場が生じるということは従来のコイルを用いたインダクタと同じ現象であり、らせん磁気構造といったナノスケールの磁気構造の創発電場を用いたインダクタ素子を創発インダクタと呼びます。

創発インダクタは 2020 年、$Gd_3Ru_4Al_{12}$（Gd：ガドリニウム、Ru：ルテニウム、Al：アルミニウム）という磁性体を用いて初めて実証されました[注1)]。しかし、この物質がらせん磁気構造を保持できる温度は約 20K（-253°C）以下と低く、創発インダクタの実用化には室温動作という大きな壁が立ちはだかっていました。

注 1）2020 年 10 月 8 日プレスリリース「創発電磁場によるインダクタ」
https://www.riken.jp/press/2020/20201008_1/index.html

2．研究手法と成果

研究グループは、創発インダクタの動作温度の課題を解決するために、YMn_6Sn_6（Y：イットリウム、Mn：マンガン、Sn：スズ）というらせん磁性体に着目しました。この物質はらせん磁気構造を低温から 330 K（57°C）まで維持でき、室温創発インダクタ素子を作製する上で有望な材料です。

まず、微細加工技術を用いて、YMn_6Sn_6 の単結晶を数十マイクロメートル（μm、1μm は 100 万分の 1 メートル）程度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 10 万分の 1 程度です。

次に、作製した素子を用いて、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。創発インダクタンスの大きさは電気抵抗と同じく、素子の長さに比例し、断面積に反比例します。そのため物質固有の創発インダクタンス特性を評価するためには、長さと断面積で規格化した「電気抵抗率虚部」を用います。図 1 の素子の場合、電気抵抗率虚部 1 マイクロオームセンチメートル（μΩcm、1μΩcm は 100 万分の 1 オームセンチメートル）であるとき、インダクタンスの大きさは 1.8 マイクロヘンリー（μH、1μH は 100 万分の 1 ヘンリー）に相当する比例関係にあります。

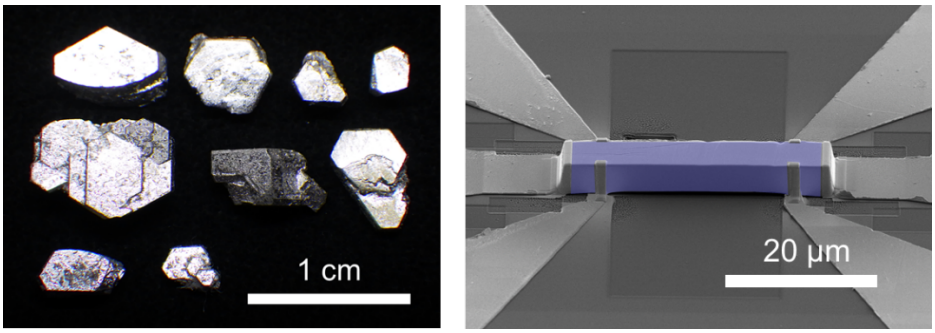


図 1　YMn_6Sn_6 の単結晶と作製した創発インダクタ素子

（左）　YMn_6Sn_6 の単結晶。
（右）　作製した創発インダクタ素子。青紫色の箇所が YMn_6Sn_6 の単結晶のブロック。

この測定の結果、YMn_6Sn_6 を用いた創発インダクタ素子は室温とされる 300 K（27°C）においても動作することを確認しました（図 2）。市販品の 10 万分の 1 程度の体積の素子であるにもかかわらず、インダクタンスの大きさは 1μH であり、市販品と同水準の高い値を示しています。また、温度あるいは磁場を変化させることで、正の創発インダクタンスと負の創発インダクタンスの両方を単一の素子で実現しました（図 2）。

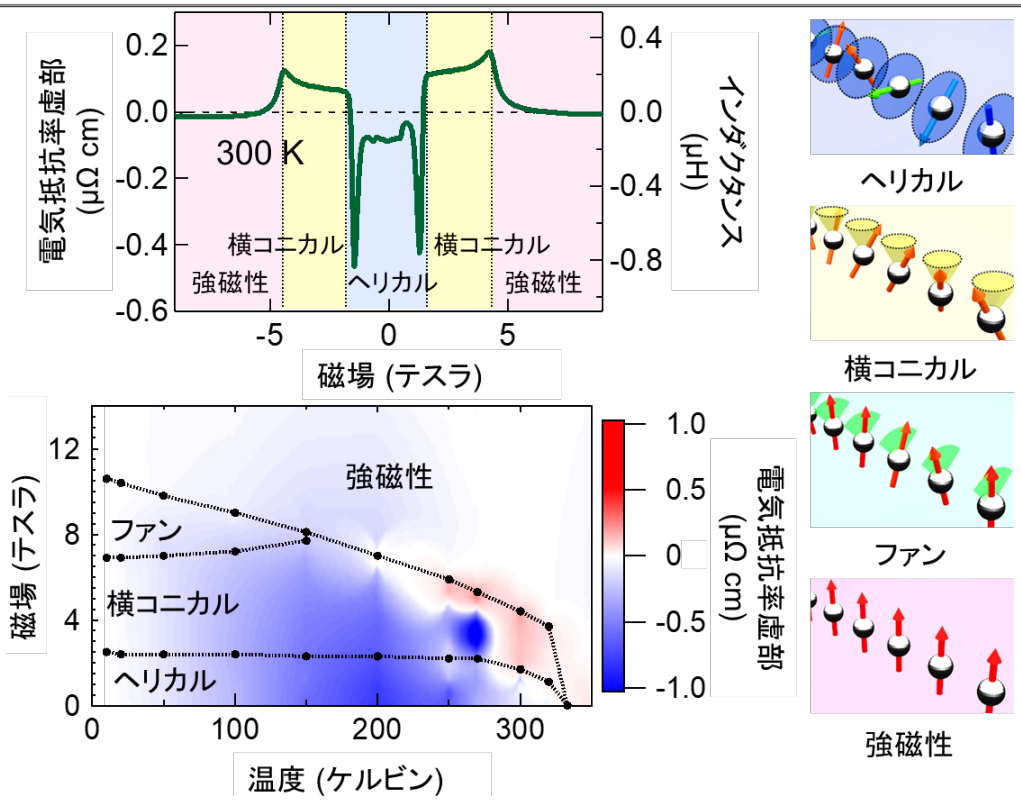


図 2　素子のインダクタンスと磁気構造

（左上）300 K（27°C）での創発インダクタンスの磁場依存性。左側の軸が電気抵抗率の虚部、右側が素子自体のインダクタンスの大きさを示しており、両者は比例関係にある。このデータでは、磁気構造がヘリカルであるときには負の創発インダクタンス、横コニカルであるときには正の創発インダクタンスがそれぞれ観測されている。

（左下）電気抵抗率虚部の温度磁場依存性。赤は正の創発インダクタンス、青は負の創発インダクタンスを示しており、温度・磁場に応じて両者が入れ替わる様子が見て取れる。

（右）　磁気構造の模式図。上からヘリカル・横コニカル・ファン・強磁性構造であり、矢印の向きがスピンの方向を表している。

さらに、この創発インダクタンスの符号反転は電流密度によっても引き起こすことができ（図 3)、電気的な符号制御が可能です。この両符号の創発インダクタンスの共存は今回初めて観察された現象であり、その背景には創発インダクタンスを生み出す機構が複数存在することが予想されます。これは創発電磁場を応用したさまざまなデバイスを開発していく上で、重要な示唆を与える発見です。

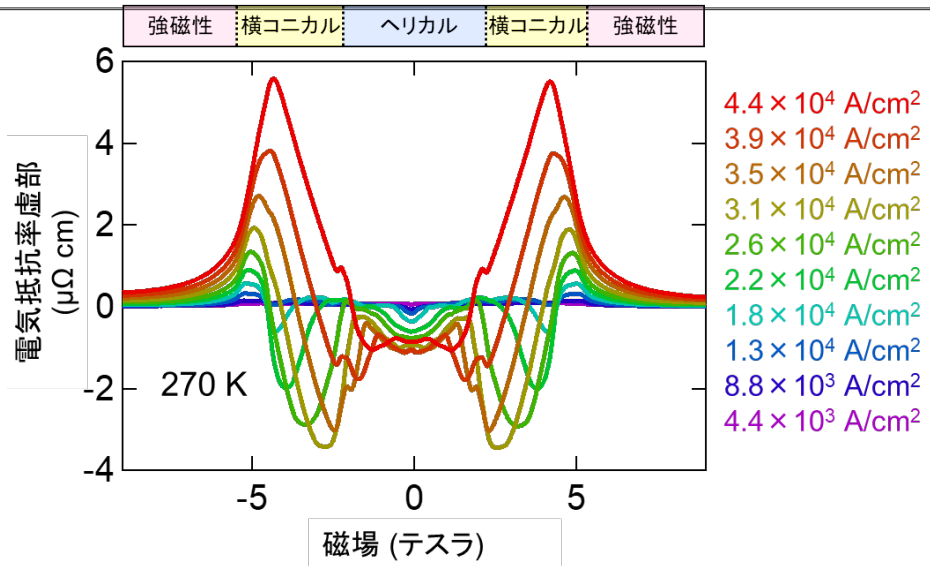


図 3　さまざまな電流密度下でのインダクタンス

同じ温度・磁場であっても、電流密度に応じてインダクタンスの符号や大きさが激しく変化していることが分かる。なお、図 2 の測定は 2.5×10^4 A/cm^2 の電流密度で測定した結果である。

3．今後の期待

本研究では、室温で動作可能な創発インダクタ素子を実現しました。全長数十マイクロメートルと非常に小型の素子であるにもかかわらず、その性能の指標であるインダクタンスの大きさは市販品と遜色ないものであり、創発インダクタの実用化に向けて大きな前進が遂げられました。

今後は物質探索を進めていくことで、より高周波の領域でも利用できる、優れた周波数特性を持つ創発インダクタ素子が実現するものと期待できます。

また、今回は同一の素子から正負両符号のインダクタンスが観測されました。負のインダクタンスは古典電磁気学に由来する従来のインダクタンスではエネルギー的に不安定であり、実現困難な素子として知られています。一方で、創発インダクタンスに関しては、従来の研究では実験的には負のインダクタンスのみが観察されており、正の創発インダクタンスは今回初めて実験的に観察されました。

本研究で正負両符号の創発インダクタンスが実現したことにより、今後はより自在な創発インダクタの特性設計や、スピンの動きがもたらす電荷輸送現象への知見が深まることへつながることも期待できます。

4．論文情報

＜タイトル＞

Emergent electromagnetic induction beyond room temperature
＜著者名＞
Aki Kitaori, Naoya Kanazawa, Tomoyuki Yokouchi, Fumitaka Kagawa, Naoto Nagaosa, Yoshinori Tokura
＜雑誌＞
Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America＜DOI＞
10.1073/pnas.2105422118

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] 創発インダクタ
らせん磁気構造などを電流で駆動すると、電流と同じ方向に創発電場が発生する。この機構はインダクタ素子としての機能を持つと見なすことができ、これを創発インダクタと呼ぶ。

[3] インダクタ、インダクタンス
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。

[4] らせん磁気構造
固体中のスピンの並び方・配列を磁気構造と呼び、らせん磁気構造はその一つである。らせん磁気構造は、注目するスピンの位置が隣に移るたびにスピンの向きが回転していくような構造で、名前の通りらせんを描いている。らせん磁気構造はどの向きに回転するか、らせんを描いているかなどに応じてさらに細かく分類され、進行方向に垂直な面内で回転していくヘリカル構造や、円錐形を描きながららせんを描くコニカル構造など複数の種類が存在する。

[5] 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、スピンが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）は電子のスピンが全て同じ状態にそろった状態である。

[6] 非共線的な磁気構造

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。

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
強相関物性研究グループ
研修生　北折　曉（きたおり あき）
（東京大学　大学院工学系研究科 博士課程 2 年）
客員研究員　金澤　直也（かなざわ　なおや）
（東京大学　大学院工学系研究科　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）
創発物性科学研究センター
センター長　十倉　好紀（とくら よしのり）
（理化学研究所　創発物性科学研究センター　強相関物性研究グループ
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）

北折　曉

金澤　直也

永長　直人

十倉　好紀

＜機関窓口＞

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

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