

# 創発電磁場によるインダクタ

## ーインダクタの微細化に向けた新原理の実証ー

東京大学総合文化研究科 横内 智行  
東京大学物性研究所 大谷 義近

### 研究背景

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る。インダクタを微細化することは、これらの機器の小型化に直結するため、非常に重要な課題である。従来のインダクタはいわゆるコイルで出来ており、古典電磁気学の法則に基づいて動作する。このような従来型のインダクタでは、入力電流と出力電圧の比(インダクタンス)の値はコイルの巻き数と断面積の積に比例するため、インダクタの大きさを小さくするにつれ、インダクタンスの値が小さくなってしまふ。そのため、インダクタの微細化は難しい問題として知られていた。

この課題を解決するために、我々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実効電磁場に注目した。電子の波動関数がある状態に束縛されて運動するとき、波動関数がベリ一位相と呼ばれる位相を獲得する[1]。例えば、伝導電子がそのスピンの向きを局在スピンの向きに束縛されて運動しているとき、ベリ一位相を獲得する。この位相は、アハラノフ・ボーム効果の類推から、電子に対して実効的な電磁場(創発電磁場)が作用したことにより、獲得したとみなすことができる。一例として、強磁性磁壁やらせん磁気構造といった非共線的な磁気構造が外場によって駆動されると、伝導電子がベリ一位相を獲得し、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ることが報告されている[2]。新たなインダクタの原理は、この非線形的な磁気構造の駆動が誘起する創発電場に基づいている。非共線的な磁気構造を駆動する外場が電流の場合、その変位は電流の関数となる。よって、このときに生じる創発電場は電流の時間変化に比例する。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する[3]。特にこの「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が理論的に予想される。さらに、コイルのような複雑な形を

作らなくても、非共線的な磁気構造を有する単一の物質を直方体に加工するだけで容易に実現できる。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期待される。

### 実験結果

我々は、この理論を実証するために、らせん磁性体  $Gd_3Ru_4Al_{12}$  に着目した[4]。この物質では、RKKY 相互作用・磁気異方性・熱揺らぎの競合により、18 K 以下で周期 2.8 nm のらせん磁気構造が発現する。さらに、磁場の印加によって縦型コニカル磁気構造やスキルミオンといった様々な非共線的な磁気構造が形成する [5]。我々は、収束イオンビームを用いた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オーダーの直方体の素子に加工した(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 程度である。そして、作製した素子のインダクタンスの大きさを、ロックインアンプや LCR メータを用いる複数の手法により、慎重に評価した。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った(図 2)。その値は、数百 nH 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ある。

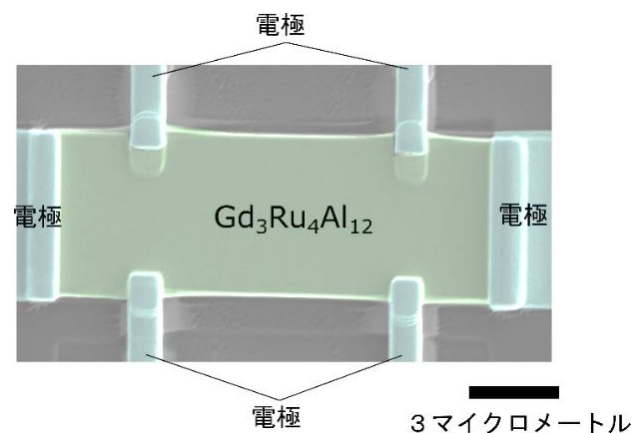


図 1 本研究で用いた素子の電子顕微鏡像：緑色の部分が  $Gd_3Ru_4Al_{12}$ 。水色の部分はタングステンでできた電極。

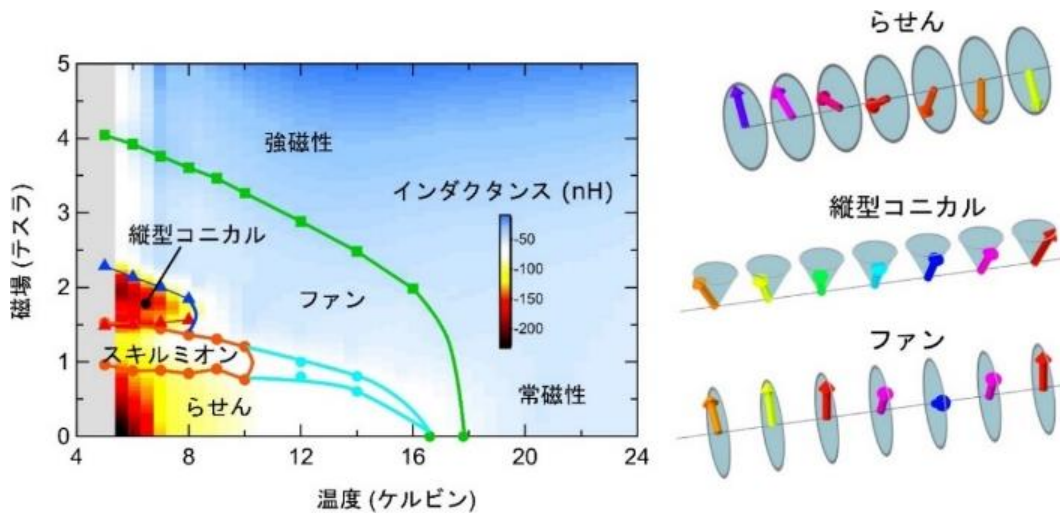


図 2 観測されたインダクタンスと磁気構造の模式図：(左)温度と磁場に対する磁気構造とインダクタンスの大きさを示すグラフ。インダクタンスが、らせん磁気構造相や縦型コニカル磁気構造相とった非共線的な磁気構造で大きな値を示す。水色の線で囲まれた領域は、磁気構造がまだ解明されていない相を示す。緑の線は、ファン相と強磁性相の境界を示す。(右)非共線的な磁気構造の模式図。

さらに、電流の値や周波数などを系統的に変化させ、インダクタンスの値を評価した。その結果、インダクタンスの値は、デバイ型の周波数依存や非線形な電流依存性を示すことが分かった。これらは磁気構造の電流駆動に特徴的な振舞であり、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を強く示唆している。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った(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有望であることが考えられる。

### まとめと展望

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はずである。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る。

また、今回観測されたインダクタンスの符号は負であった。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る。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、単一素子として負のインダクタの実現は困難であった。一方で、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

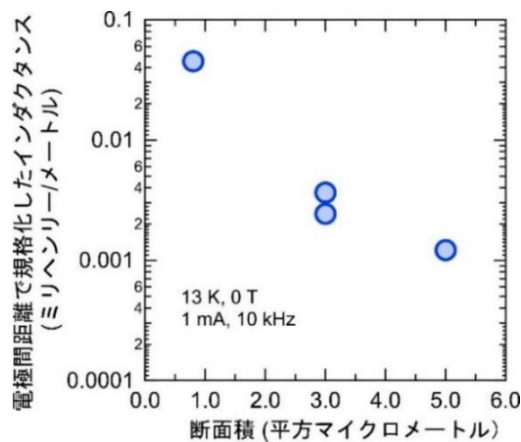


図 3 素子の断面積に対する電極間距離で規格化したインダクタンスの変化：インダクタンスの値は、電極間距離に比例するため、電極間距離で規格化したインダクタンスで比較している。断面積が小さくなるにつれて、規格化したインダクタンスの値が増大する。

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る。

## 謝辞

本研究は、理化学研究所創発物性科学研究センターの十倉好紀グループディレクター、永長直人グループディレクター、賀川史敬ユニットリーダー、マックス・ヒルシュベルガーユニットリーダーとの共同研究によるものです。また本研究は、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ー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] D. Xiao, M.-C. Chang, & Q. Niu, *Rev. of Mod. Phys.* **82**, 1959 (2010).
- [2] S. E. Barnes, & S. Maekawa, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 246601 (2007).
- [3] N. Nagaosa, *Jap. J. Appl. Phys.* **58**, 12090 (2019).
- [4] T. Yokouchi *et al.*, *Nature* **586**, 232 (2020).
- [5] M. Hirschberger *et al.*, *Nat. Commun.* **10**, 5831 (2019).