



2024年1月11日

報道関係者各位

慶應義塾大学

フレキシブル基板上の磁性薄膜において
「階段状磁場」を加えることで効率的に磁壁を発生させ、
室温・低磁場での創発インダクタンスの観測に成功
— 超高感度磁気センサーとして期待 —

慶應義塾大学大学院理工学研究科の松島悠(修士課程2年)、張子京(博士課程3年)、畠山紘(修士課程1年)、同大学理工学部の海住英生教授らは、ブラウン大学物理学科の蕭鋼教授、慶應義塾大学グローバルリサーチインスティテュート(スピントロニクス研究開発センター)の船戸匠特任助教、中国科学院大学カブリ理論科学研究所の松尾衛准教授と共同で、フレキシブル基板上の磁性薄膜において室温・低磁場での創発インダクタンスの観測とそのメカニズム解明に成功しました。創発インダクタとは、ナノスケールのらせん磁気構造で生じるスピン起電力を利用したインダクタで、近年大きな注目を集めています。今回、磁性材料としてよく用いられるパーマロイ(ニッケルと鉄の合金)磁性薄膜に対して「階段状磁場」を加えることで効率的に磁壁を発生させ、この磁壁を電流により駆動させることで、低磁場かつ巨大な創発インダクタンスの観測に成功しました。また、ランダウ・リフシッツ・ギルバート方程式と統計論を組み合わせることでそのメカニズムを解明しました。この成果は、フレキシブル磁気エレクトロニクスに新たな道を切り拓くものです。

本研究成果は1月10日(米国東部時間)に『*Applied Physics Letters*』(オンライン、American Institute of Physics グループ)に掲載されました。

1. 本研究のポイント

- ・階段状磁場を利用することで磁性薄膜において室温・低磁場での創発インダクタンスの観測に成功。
- ・ランダウ・リフシッツ・ギルバート方程式と統計論を融合した理論によりメカニズムを解明。
- ・フレキシブル磁気エレクトロニクスに新たな道を切り拓く。

2. 研究背景

電子の持つ「電荷(電気量)」と「スピン(電子の自転に相当するもの)」の2つの性質を利用するスピントロニクスは、次世代のエレクトロニクスとして期待されています。中でも最近、量子力学的なインダクタ「創発インダクタ」が観測され、大きな注目を集めています。創発インダクタは、非共線的な磁気構造(※1)、例えば、らせん磁気構造を電流により駆動させ、発生したスピン起電力(※2)をインダクタンスとして検出した現象です。従来の古典電磁気学に基づくインダクタ(コイル)では、入力電流と出力電圧の比に対応するインダクタンスは断面積に比例することから、インダクタの微細化は難しいとされてきました(図1)。一方で、創発インダクタでは、素子の断面積を小さくするに従い、インダクタンスが増大することから、インダクタの微細化につながると期待されています。さらに創発インダクタンスは正と負のいずれの符号も示すことから、磁気センシングなどさまざまな分野での応用が期待されています。この創発インダクタは、これまで磁場により数マイクロ

ヘンリーといった大きなインダクタンス変化を示すものの、10000 ガウス程度の大きな磁場を必要としていました。

3. 研究内容・成果

今回、研究グループは、フレキシブル磁気デバイスへの応用を見据え、フレキシブル基板上の磁性薄膜において室温・低磁場での創発インダクタンスの観測を目指しました。これまで創発インダクタには、非共線的な磁気構造を持つらせん磁性材料が用いられてきました。一方で、よく知られている典型的な磁性薄膜（例えば、鉄、コバルト、ニッケル、または、それらの合金）においても、非共線的な磁気構造の一種である磁壁（※3）構造を効率的に作り出すことができれば、創発インダクタを実現できると考えられます。本研究では磁性薄膜に対して「階段状磁場」を加えることで効率的に磁壁を発生させ、この磁壁を電流により駆動することで室温・低磁場での創発インダクタンスの観測が期待できると考えました（図1）。

そこで、同グループは交流電流下において、フレキシブルなポリカーボネート有機膜基板上的のパーマロイ（ニッケルと鉄の合金）薄膜を磁場中にセットし、階段状磁場を加えながらインダクタンスの振る舞いを調べました（図1）。その結果、室温・低磁場において創発インダクタンスの観測に成功しました（図2）。磁場により創発インダクタンスが変化することから、同グループでは本現象を「創発磁気インダクタンス（EML）効果」と名付けました。このEML効果では、小さな磁場（～数ガウス）で大きなインダクタンス変化（～1 マイクロヘンリー）が生じます。1 マイクロヘンリーは市販品のインダクタンスと同水準の大きな値です。また、ゼロ磁場付近でインダクタンスの符号が正と負に変化することもわかりました。このEML効果を磁気センシングとして活用すれば、高感度磁気センサーへの応用が期待できます。また、磁性薄膜の断面積を小さくすることでEML効果が向上することもわかりました（図3）。さらに、階段状磁場のステップ幅を大きくすることで、より効率的に磁壁を発生させEML効果が向上することもわかりました（図3）。実験のみならず、理論的な検討も行ったところ、スピンの運動方程式を記述するランダウ・リフシッツ・ギルバート方程式（※4）と統計論を組み合わせた新たな計算手法により、実験結果をよく説明できることがわかりました（図4）。

4. 今後の展開

本研究成果により、フレキシブル磁気エレクトロニクスに新たな道が切り拓かれるものと期待できます。小さな磁場で大きなインダクタンス変化が生じることから、クレジットカードなどの各種磁気カードのカードリーダー、心磁図・脳磁図・血流観察用の生体センサー、金属中の渦電流検出を利用した構造物の異常・故障検知用非破壊センサー、自動運転用センサー、非接触磁気キーボード、電子コンパス（スマートフォンや自動車内のGPSと組み合わせることで、位置センサー・角度センサーが可能）、基礎研究用の磁化状態観察デバイス（磁気間力顕微鏡のカンチレバー）など、基礎から応用まで幅広い分野での実用化が期待できます。

5. 謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究（A）（No. 21H04565）、科学研究費補助金基盤研究（B）（No. 21H01397、21H01800、23H01839）、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 CREST（No. JPMJCR19J4）、「スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク拠点（Spin-RNJ）整備事業共同研究プロジェクト」（文部科学省「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想ロードマップの策定-ロードマップ 2020-」）、およびブラウン大学 National Science Foundation（No. DMR-2202514）などの支援を受けて実施されました。

<原論文情報>

研究論文名：Emergent magneto-inductance effect in permalloy thin films on flexible polycarbonate substrates at room temperature (フレキシブル基板ポリカーボネート上のパーマロイ薄膜における創発磁気インダクタンス効果)

著者：松島悠¹、張子京 (ジャン シキョウ)¹、大橋由梨¹、畠山紘¹、蕭鋼 (シャオ ガン)²、船戸匠^{3,4}、松尾衛^{4,5,6}、海住英生^{1,3} (¹慶應義塾大学理工学部物理情報工学科、²ブラウン大学物理学科、³慶應義塾大学スピントロニクス研究開発センター、⁴中国科学院大学カブリ理論科学研究所、⁵日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター、⁶国立研究開発法人理化学研究所創発物性科学研究センター)

公表雑誌： *Applied Physics Letters* (米国物理学協会が発行する国際科学雑誌)

公表日： 2024年1月10日 (米国東部時間) (オンライン公開)

doi: <https://doi.org/10.1063/5.0181272>

<用語説明>

※1 非共線的な磁気構造

複数のスピンの並んでいる状況で、各スピンの向きが徐々に変化する磁気構造を非共線的な磁気構造という。例えば、らせん磁気構造がこれに相当する。

※2 スピン起電力

古典的な電磁気学において磁気エネルギーを電気エネルギーに変換する機構として誘導起電力が知られている。誘導起電力ではファラデーの電磁誘導の法則に従って、磁束の時間変化に比例して起電力が生じる。一方で、ナノ磁気構造においても局在スピンと伝導電子の間に働く相互作用を介して、磁気的なエネルギーを電気的なエネルギーに変換することにより起電力が生じる。これをスピン起電力と呼ぶ。

※3 磁壁

磁性体では、隣り合うスピンの同じ方向を向こうとする交換相互作用が働く。一方で、スピンの完全に揃うと両端に磁極が発生し、これにより静磁エネルギーが増大し、エネルギー的に不安定になる。このとき磁極の発生を防ぐため、異なる方向にスピンの揃ったいくつかの領域が形成される。この領域を磁区と呼び、その境界を磁壁と呼ぶ。磁壁の内部では、スピンの少しずつ回転し、非共線的な磁気構造が形成される。

※4 ランダウ・リフシッツ・ギルバート方程式

スピン動力学に関する理論モデルであり、磁場による磁化の歳差運動を記述する運動方程式を表す。本研究では、磁壁の電流駆動に対してこのモデルを適用し、統計論と組み合わせることで新たな理論を構築した。その結果、実験結果と良い一致を示した。

<図表>

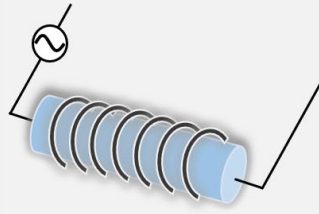
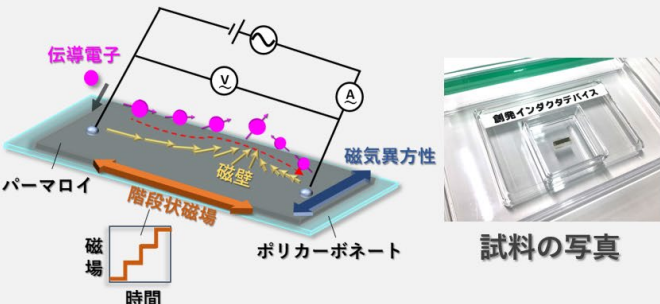
	コイル	創発磁気インダクタンス (EML) 効果
		
インダクタンスの大きさ	断面積に比例	断面積に反比例 (=小型化・微細化が可能)
インダクタンスの符号	正のみ	正と負

図1 創発磁気インダクタンス (EML) 効果

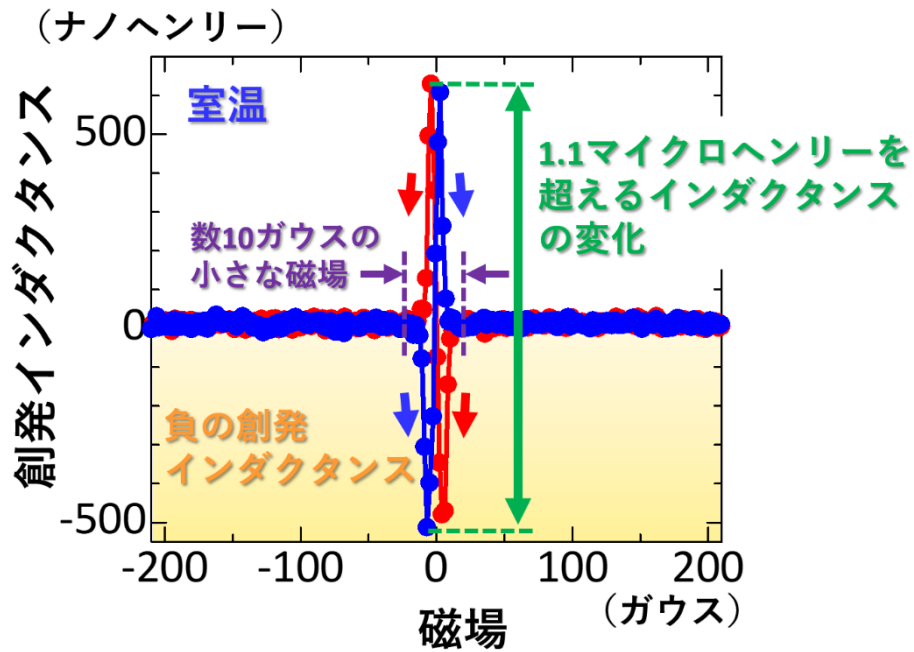


図2 フレキシブル磁性薄膜において室温・低磁場での創発インダクタンスの観測に成功

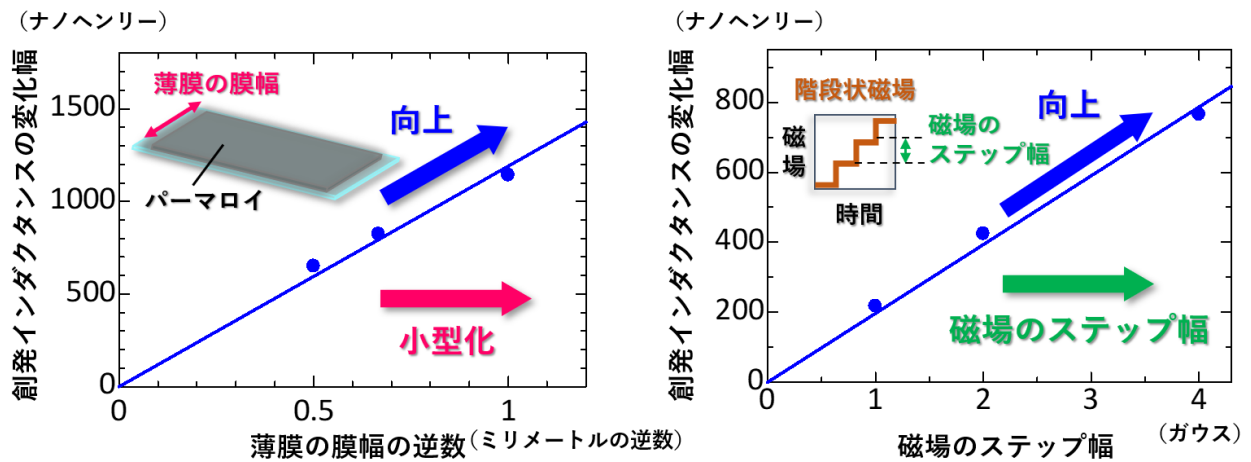


図3 EML効果の向上（左：薄膜の膜幅を変化、右：磁場のステップ幅を変化）

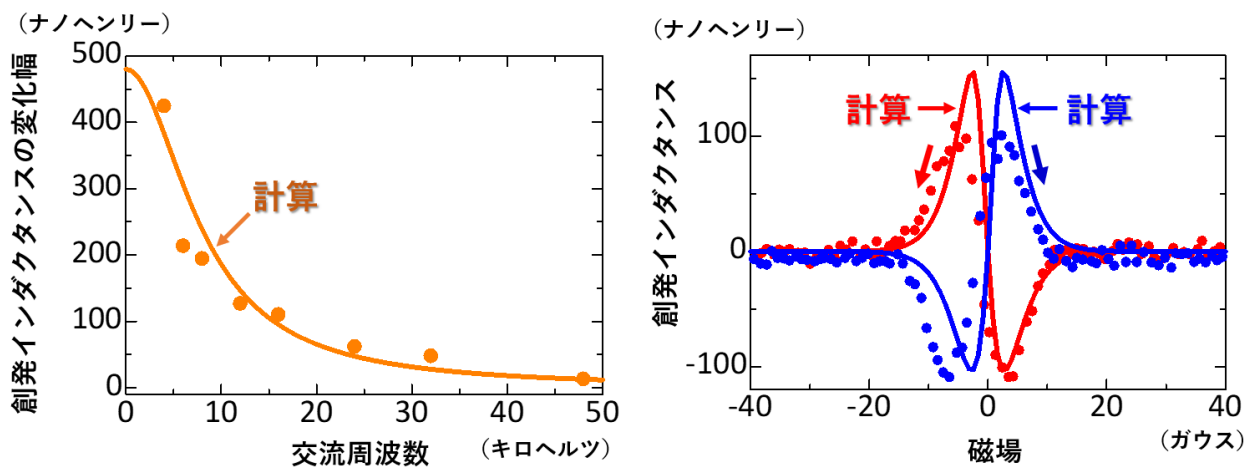


図4 実験結果と計算結果の比較

（左：EML効果の周波数特性、橙丸●が実験結果、橙線—が計算結果
 右：EML効果、赤丸●および青丸●が実験結果、赤線—および青線—が計算結果）

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。
 ※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 物理情報工学科 教授 海住 英生（かいじゅう ひでお）
 TEL：045-566-1428 E-mail：kaiju@appi.keio.ac.jp

・本リリースの配信元

慶應義塾広報室（望月）
 TEL：03-5427-1541 FAX：03-5441-7640
 E-mail：m-pr@adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>