

平成 31 年 2 月 28 日

報道機関 各位

東北大学金属材料研究所

鉄スズ磁石の薄膜でフレキシブルホール素子を実現 IoT 時代に不可欠な磁気センサーへの応用に期待

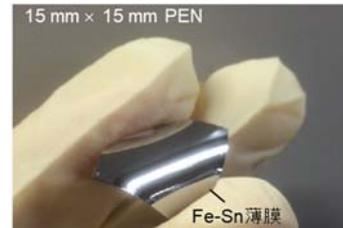
【発表のポイント】

- 室温で作製した鉄スズ磁石の微結晶薄膜が磁場を電氣的に検出するホール素子として利用可能であることを実証
- 従来作製が困難であった形状を変えられるフレキシブルセンサーにも応用可能
- 今後、磁石の性質を活用した新型磁気センサー開発の進展が期待

【概要】

東北大学金属材料研究所の藤原宏平准教授、佐竹遥介大学院生、塩貝純一助教、関剛斎准教授、塚崎敦教授らの研究グループは、鉄とスズから成る合金系磁石の薄膜を作製し、形状を変えられるフレキシブルな磁気センサー（ホール素子）として利用可能であることを実証しました。

各種エレクトロニクス分野において、磁場を電氣的に検出することのできる磁気センサーの需要が高まっています。磁気センサーは、半導体ホール素子が一般的ですが、近年、磁石の性質を活用するホール素子にも注目が集まっています。この新型素子は、半導体素子の弱点を補う反面、磁場を電気信号に変換する性能が低いという欠点がありました。



研究グループでは、この欠点を克服した新型素子を開発すべく、鉄スズ合金に着目して薄膜を作製、結果、広い温度・磁場範囲で優れたセンサー特性が得られることを明らかにしました。この薄膜は産業でも広く用いられている薄膜合成手法（スパッタリング法）によって容易に作製でき、さらに室温での素子作製が可能です。これにより、薄膜の土台を高分子基板（自在に変形できるが、熱に弱い）にしても素子を搭載でき、実際に素子を「曲げた状態」でもセンサーが正常に動作することを実証しました。

本成果により、関連する金属系磁石薄膜を用いた磁気センサー開発が前進するとともに、従来の半導体素子とは異なる磁石の特性を活用した新たな応用研究が今後加速するものと期待されます。本研究成果は、2019 年 3 月 1 日（金）（英国時間 10 時）に、英国科学誌「Scientific Reports」オンライン版に掲載されます。

【詳細な説明】

○研究背景

電流の流れる電線(右ねじの法則)や磁石の周囲には磁場が生じることから、磁場の計測を通して電流量や磁気を帯びた物体の動きを知ることができます。そのための汎用的な原理としてホール効果(注 1)が知られており、その機能を持つ素子をホール素子と呼びます。これらの素子は、電子機器の消費電力モニターや機械駆動部の位置・角度検出などに応用されており、エレクトロニクスの高性能化・省エネ化や IoT 化(Internet of Things: モノのインターネット)の要請に伴って、重要性が高まっています。

一般的なホール素子では、半導体の正常ホール効果(注 1)を利用して磁場を電圧(ホール起電力)へと変換しており、その性能指数は移動度(電気の流れやすさ)に比例します。したがって、高い移動度を実現するために、高温プロセス(数百 °C 以上)で作製した GaAs や InSb などの半導体単結晶薄膜が用いられています。これらの半導体は、電気特性が温度に強く依存しますが、回路を組み込むことで動作温度範囲での感度変動を補償することで素子応用されています。

一方、近年、強磁性体(磁石)(注 2)で発現する異常ホール効果(注 1)が新たな素子原理として注目を集めています。異常ホール効果では、一定の駆動電圧下における起電力が移動度ではなく、磁氣的性質に由来するホール抵抗に比例します。また、異常ホール効果は、その物理的起源となる特別な電子構造を実現することで大きくなり得ることから、半導体の弱点を補う素子への応用も期待できます。しかしながら、ホール素子に応用できるほどの性能は、これまで、バルク単結晶(0.1~1 ミリメートルスケールの塊状試料)や低温でのみの観測に留まっており、実用薄膜素子への応用は進んでいませんでした。また、磁場とホール電圧が単純な比例関係になく、ホール素子用途には適さないという問題がありました。

研究グループは、鉄とスズの金属間化合物の一種である Fe_3Sn_2 が室温において大きな異常ホール効果を示すという既知の知見に着目し、安価かつ毒性の低い元素である鉄スズ(Fe-Sn)合金系強磁性体をホール素子用の研究対象としました。そして、産業でも広く用いられているスパッタリング法(注 3)を用いた薄膜作製に取り組みました。

○成果の内容

室温での薄膜合成によって Fe と Sn の組成を調整したところ、微結晶性(注 4)の Fe-Sn 薄膜において、バルク単結晶に匹敵する大きな異常ホール効果を観測し(図 1(a))、ホール素子応用に適用可能な水準にあることを見出しました。この薄膜では、磁石としての性質は薄膜面内に磁化容易軸(注 5)を持ちますが、薄膜面に垂直な磁場が与えられることで、その磁場に比例した磁場-ホール起電力特性を示すことを観測しました。さらに、ホール素子としての感度係数が $-75 \sim +125 \text{ }^\circ\text{C}$ の広い温度範囲に渡ってわずか±数パーセントにしか変動しないことを明らかにしました(図 1(b))。これらの結果は、金属強磁性体薄膜の異常ホール効果が実際に応用できること、かつ、従来の半導体ホール素子にはないメリット(素子単体で高い温度安定性)があることを示したものです。

さらに、室温で合成できる利点を活かし、薄膜の土台となる基板材料をフレキシブルな高分

子 PEN シート(ポリエチレンナフタレートシート、図 2(a))に変えて動作を検証したところ、ホール素子としての特性が維持されることを見出しました(図 1(b))。この結果に基づき、PEN シート上に作製したホール素子構造において(図 2(b))、変形(曲げた状態)での磁場検出動作が可能であることを実証しました。

○意義・課題・展望

本研究成果により、金属強磁性体薄膜の異常ホール効果を用いたホール素子の特徴が明らかになりました。特に、フレキシブルな高分子基板上への搭載は、高温プロセスが不可欠な半導体では実現が難しく、室温合成でも大きな異常ホール効果を示す Fe-Sn 薄膜ならではの機能です。現時点では、ホール素子としての感度係数は、半導体素子の一般的な水準と同等で、高感度とされる半導体素子に比べるとまだ一桁程度低く、今後の特性向上が望まれます。一方で、温度安定性の良さとフレキシブル動作は、パワーエレクトロニクスやフレキシブルエレクトロニクスへの展開も考えられ、磁気センサーの用途拡大に貢献するものと期待されます。また、Fe-Sn 薄膜は、安価かつ毒性の低い鉄とスズから構成され、スパッタリング法による量産が可能であることから、応用展開に適しています。近年、物性物理学分野を中心に、電子構造とホール効果の関連性を検証する研究が進んでいることから、ホール素子の候補物質も今後増えていくものと考えられます。本研究成果を契機に、異常ホール効果を用いた新型ホール素子の研究開発が加速するものと期待しています。

○図表

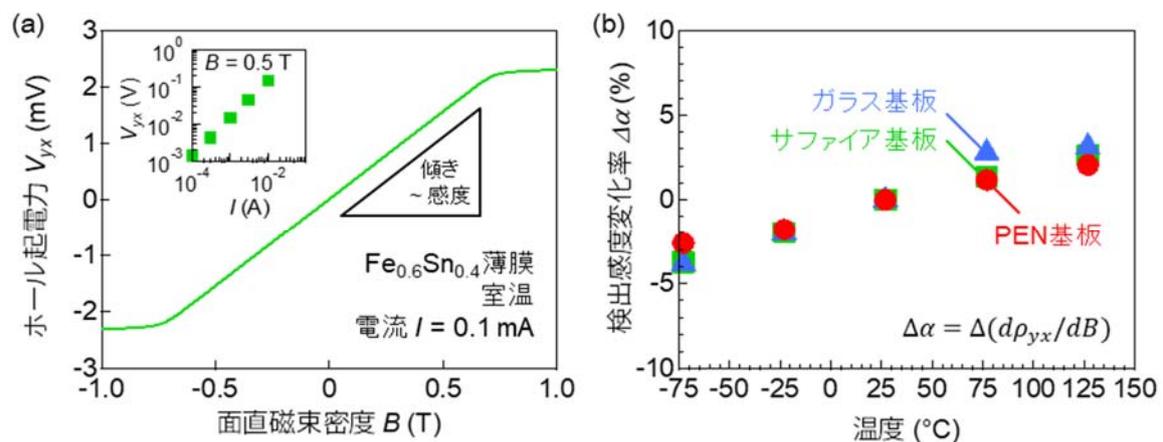


図 1(a) サファイア基板上の $\text{Fe}_{0.6}\text{Sn}_{0.4}$ 微結晶薄膜の異常ホール効果(室温)。磁束密度 $B=0.6$ T(テスラ)程度の高い磁場まで、磁場に比例してホール起電力が増加しており、ホール素子(磁気センサー)として用いることができる。挿入図:入力電流に対するホール起電力特性。0.1 Vを越える起電力を得ることができる。(b) ホール素子としての検出感度の温度変化率。図中に、検出感度変化率 $\Delta\alpha$ の定義を記載している(ホール抵抗率 ρ_{yx} = 膜厚 \times ホール起電力 V_{yx} / 注入電流 I)。基板材料に依らず、小さな温度変化率を示す。

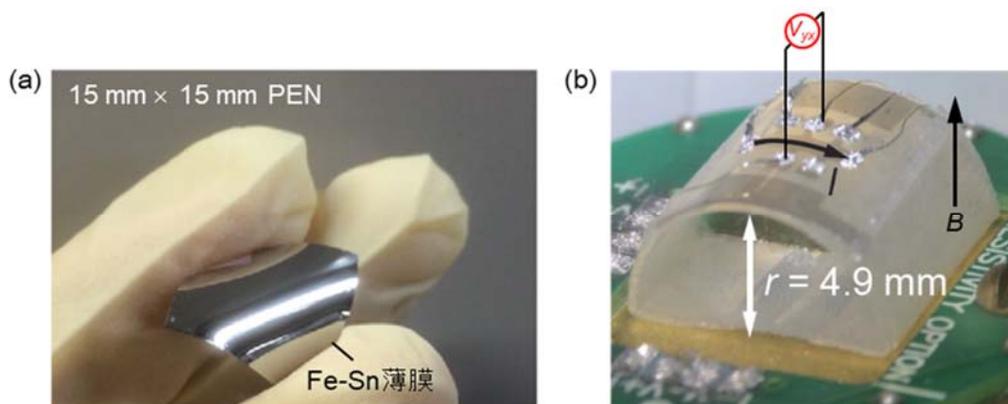


図 2(a) 高分子 PEN シート上に形成した Fe-Sn 薄膜の写真。(b) PEN 上に形成した $\text{Fe}_{0.6}\text{Sn}_{0.4}$ ホールバー型素子の曲げ状態における異常ホール効果測定の様子。半円型治具の表面に素子を貼り付け、曲げた試料に電流 I を通電した状態で、面直磁束密度 B の印加により生じるホール起電力 V_{yx} を測定する。

○発表論文

雑誌名: Scientific Reports

タイトル: Fe-Sn nanocrystalline films for flexible magnetic sensors with high thermal stability

全著者: Y. Satake, K. Fujiwara, J. Shiogai, T. Seki, and A. Tsukazaki

DOI: 10.1038/s41598-019-39817-8

○関連する特許情報

発明の名称: ホール素子

発明者: 塚崎 敦、藤原 宏平

出願人: 国立大学法人東北大学

出願番号: 特願 2018-157542 (出願日 2018/8/24)

○専門用語解説(注釈や補足説明など)

※1 ホール効果、正常ホール効果と異常ホール効果

試料の x 方向に通電した状態で z 方向に磁場を印加すると、ローレンツ力により電子の運動方向が捻じ曲げられ、 y 方向に電圧(ホール起電力)が生じる現象を(正常)ホール効果と呼ぶ(x, y, z は直交座標系とする)。磁性体では、これに磁化の寄与が加わり、異常ホール効果と呼ばれる。磁化の z 方向への射影成分のみがホール効果に影響する。

※2 強磁性体

電子が持つマイクロな磁石の性質であるスピンの同じ方向に並ぶことで、マクロな磁化を生み出している物質。鉄、ニッケル、コバルトが代表的な強磁性体。

※3 スパッタリング法

物理的气相蒸着法の一つで、ターゲットと呼ばれる固体原料に、アルゴンプラズマなどのイオン化粒子を照射することでターゲット表面の原子分子を気化し、基板上に薄膜として形成する手法。大面積に均質な薄膜を形成することが可能なことから、産業分野の薄膜製造に用いられている。

※4 微結晶

結晶は、周期的な原子配列を基本要素とする。スパッタリング法により室温で作製した Fe-Sn 薄膜は、通常の結晶性薄膜で観測される X 線回折ピークを示さず、電子顕微鏡観察においてナノメートルスケールのごく小さな結晶化領域が観測されたことから、微結晶状態と考えられる。結晶とガラス(非晶質)の中間に位置する状態と言える。

※5 磁化容易軸

固体中で、磁化(スピンの集まり)が向きやすい試料方向を指す。結晶の対称性や試料の形状により決まる。対義語は、磁化困難軸。

○共同研究機関および助成

本研究は、科学研究費補助金(課題番号: 25000003, JP15H05853)および熊谷科学技術振興財団からの支援を受けて実施されました。

本件に関するお問い合わせ先

◆研究内容に関して

東北大学金属材料研究所 低温物理学研究部門
准教授 藤原 宏平

TEL: 022-215-2088

Email: kfujiwara@imr.tohoku.ac.jp

教授 塚崎 敦

TEL: 022-215-2085

Email: tsukazaki@imr.tohoku.ac.jp

◆報道に関して

東北大学金属材料研究所 情報企画室広報班
富松 美沙

TEL:022-215-2144 FAX:022-215-2482

Email: pro-adm@imr.tohoku.ac.jp