

令和元年 11 月 13 日

報道機関 各位

東北大学材料科学高等研究所(AIMR)  
東北大学金属材料研究所  
科学技術振興機構(JST)  
東京大学

## 室温でも音波とスピン流は共鳴する スピンを利用した環境発電素子の性能向上に期待

### 【発表のポイント】

- 低温・高磁場でなければ観測できなかった、音波によるスピン流の増幅を室温かつ低磁場で実現することに成功した。
- 材料に着目することで増幅率を従来の700%近く向上することができた。
- 室温・低磁場環境での実証により、スピンを利用した熱電素子の性能向上に利用できる。

### 【概要】

東北大学材料科学高等研究所の Rafael Ramos (ラファエル ラモス) 助教と橋本祐介助教、東北大学金属材料研究所の日置友智氏(大学院博士課程・日本学術振興会特別研究員)、東北大学材料科学高等研究所・金属材料研究所の吉川貴史助教と東京大学大学院工学系研究科の齊藤英治教授(東北大学材料科学高等研究所・金属材料研究所兼任)らは、 $\text{Lu}_2\text{BiFe}_4\text{GaO}_{12}$  からなる薄膜を作製し、この試料において、室温かつ低磁場な環境においても音波(フォノン<sup>注1</sup>)がスピン流<sup>注2</sup>を増幅することを明らかにしました。

本成果は2019年11月14日に「*Nature Communications*」オンライン版で公開されます。

### 【問い合わせ先】

本件に関するお問い合わせ先  
◆研究に関して  
東京大学大学院工学系研究科 教授  
東北大学材料科学高等研究所(AIMR)/  
金属材料研究所  
齊藤英治

## 【研究の背景】

スピン流とは、電子の磁氣的性質である「スピン」の流れのことで、電子の電荷の流れである電流と対比されます。熱流から電流を生み出す熱電変換（ゼーベック効果）と同様に、そのスピン流版であるスピnzeーベック効果<sup>注3)</sup>を通じた熱電変換現象は、排熱を利用した環境発電への利用を目指して研究が進められています。

スピnzeーベック効果から熱電変換を実現する素子は、金属と磁性体からなる薄膜という単純な構造であり、低コストで汎用な熱電変換素子になりうるとして期待されています。

このスピnzeーベック効果による熱電変換効率の増大に向けてはさまざまな観点から研究が行われていますが、その中で、物質中の音波（フォノン）がスピン流の担い手であるマグノン<sup>注4)</sup>と共鳴することで、スピnzeーベック効果を増大させる混成効果が近年報告されました。これは物質中の音波とスピン波が同じ波長（振動数）で伝搬する時に、スピン流の伝搬距離が伸びるために生じる現象であると考えられています。しかし、この共鳴現象を起こすには日常生活では不可能な低温かつ高磁場が必要であることが、この現象を素子性能の向上に利用するための課題となっていました。

物質中のフォノンを利用したスピnzeーベック効果の増大現象を室温・低磁場で実現するためには、フォノンとマグノンが共鳴する条件を低磁場にシフトさせ、かつ、混成効果を大きくすることが必要ですが、どのような条件であればこれが実現できるでしょうか。

## 【研究の内容・成果】

従来、スピン流を担う素子としては磁性絶縁体である、イットリウム鉄ガーネット（YIG）の薄膜が使われてきましたが、今回  $\text{Lu}_2\text{BiFe}_4\text{GaO}_{12}$ （BiGa:LuIG）という物質に着目しました。

BiGa:LuIG は YIG と同じガーネットフェライト（磁性材料）と呼ばれるフェリ磁性体です。フェリ磁性体は磁性を担う複数の磁気モーメントが異なる大きさで互い違いに整列することで磁性を発現しています。YIG では磁性を担う鉄原子が結晶格子中の 4 面体の各頂点（d サイト）と 8 面体の各頂点（a サイト）に配置し、4 面体と 8 面体とで磁気モーメントの向きが異なります。BiGa:LuIG はこの鉄原子がガリウム原子に置換された材料であり、この置換によって室温において材料全体の磁気モーメントが小さくなる磁気補償と呼ばれる状態に近づいています（図1）。この磁気補償に近い状況を作ることで、マグノンの伝搬とフォノンの伝搬が似た振る舞いとなる共鳴条件が従来の YIG に比べて低磁場にシフトすることを見いだしました。

実験では BiGa:LuIG 薄膜を作製し、スピnzeーベック効果によって生じた起電力を測定しました（図2）。その結果、300K（27°C程度）かつ、0.42T という比較的低い磁場という条件下において、マグノンとフォノンの周波数と波長が同じ場合、発電量が最大となるピークが現れました（図3）。これは今まで同条件下において観測されていた YIG 薄膜の増幅率が 1.27%であったのに対し、BiGa:LuIG 薄膜は 10.21%とおよ

そ 700%もスピン波を増幅させることがわかりました。

今回の結果を考察したところ、BiGa:LuIG では YIG の鉄サイトを他原子で置換したことでマグノンの伝搬距離が短くなっていることがわかりました。通常であれば、フォノンとマグノンの混成による伝搬距離も短くなってしまわないかと考えられます。しかし今回の実験で、マグノンの伝搬距離が短くなることでフォノンとの混成効果を高め、マグノンの伝搬距離を実効的に伸ばす上で有利に働き、これがフォノンとの混成を利用したスピンゼーベック効果の増大が室温でも顕著に現れる理由であることがわかりました。

#### 【今後の展望】

今回、室温で、弱い磁場環境であっても、フォノンによってスピン流が増幅されることがわかりました。これは、スピンゼーベック効果の熱電変換の向上にフォノンが実用できる可能性を示唆し、この現象が、次世代のスピン트로ニクスデバイスに活用できる道が開かれたといえます。

#### 【参考図】

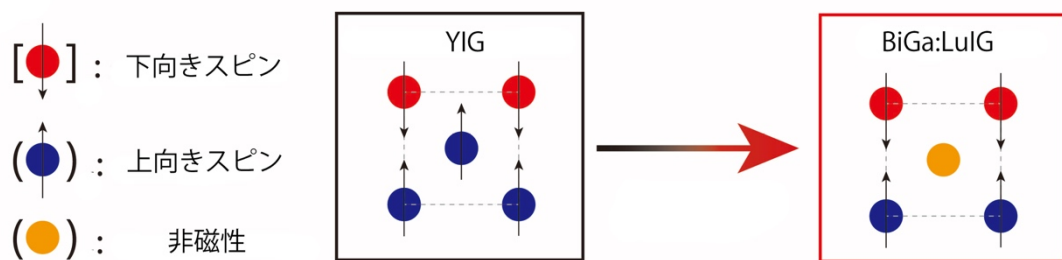


図 1 YIG と BiGa:LuIG の結晶格子の概略図。

YIG で中央の上向きスピンを持つ鉄原子が、BiGa:LuIG では非磁性であるガリウム原子に置換されるため、上向きスピンと下向きスピンの打ち消しあい磁気補償に近い状態となる。

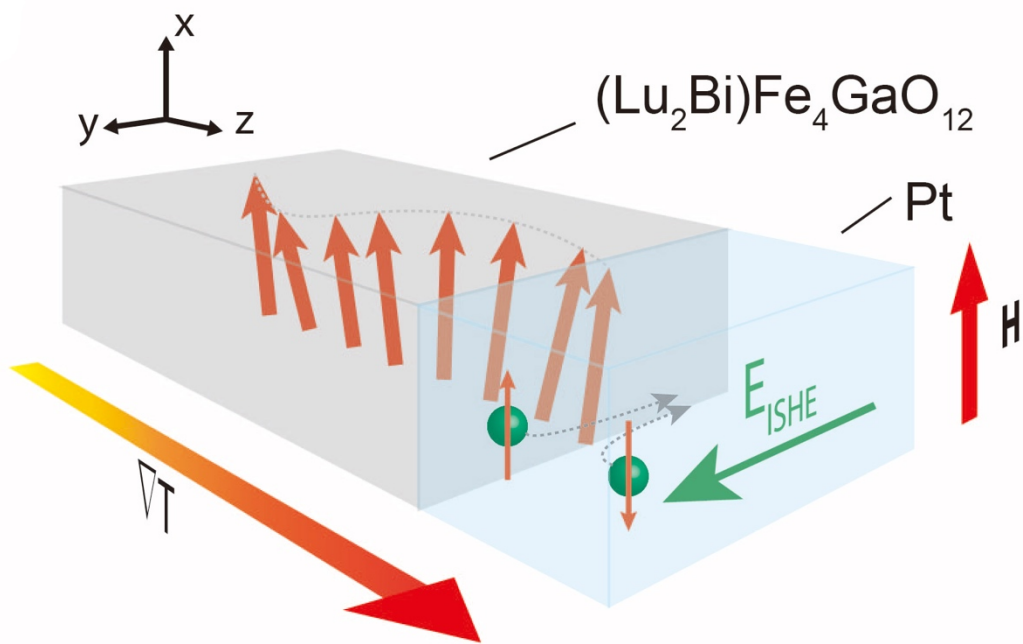


図2 今回行った  $\text{Lu}_2\text{BiFe}_4\text{GaO}_{12}$  薄膜による実験の概略図。  
底面矢印方向に温度差をつけ、白金(Pt)層に生じる電圧を測定する。

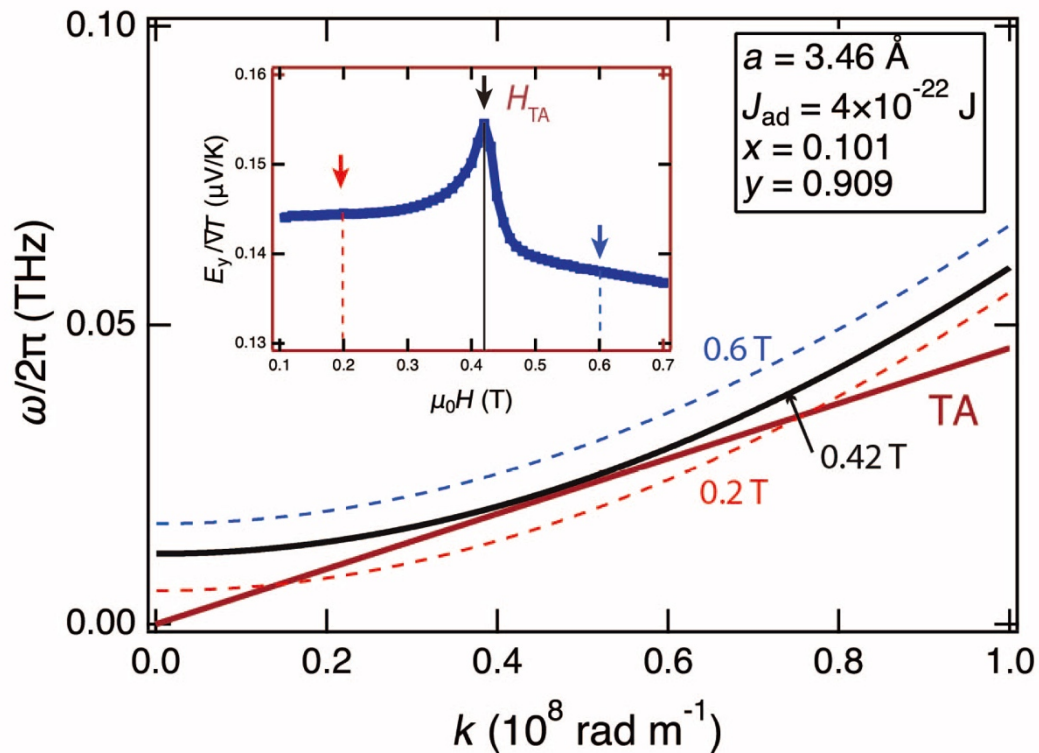


図3 マグノンとフォンの分散関係の模式図。  
フォノン(TA)とマグノンの分散関係が一点で接している印加磁場 0.42T の時、マグ

ランフォノンの共鳴が最大となる。

#### 【用語解説】

注1) フォノン

結晶内部の音波を量子力学的に扱い、粒子として表現したもの

注2) スピン流

電子が持つ磁氣的性質であるスピン(核運動量)の流れ

注3) スピンゼーベック効果

温度差をつけた磁性体において、温度勾配と並行して電子が持つ磁氣的性質であるスピンの流れ(スピン流)が生じる現象のこと

注4) マグノン

磁性体内部で整列したスピンの揺らぎ(スピン波)を量子力学的に扱い、粒子として表したもの

#### 【論文情報】

“Room temperature and low-field resonant enhancement of spin Seebeck effect in partially compensated magnets” R. Ramos, T. Hioki, Y. Hashimoto, T. Kikkawa, P. Frey, A. J. E. Kreil, V. I. Vasyuchka, A. A. Serga, B. Hillebrands, and E. Saitoh  
Nature Communications

DOI: 10.1038/s41467-019-13121-5

#### 【関連した研究成果】

スピンゼーベック効果の高効率化に新指針

[https://www.jst.go.jp/erato/saitoh/ja/research/research\\_04.html](https://www.jst.go.jp/erato/saitoh/ja/research/research_04.html)

#### 【関連サイト】

• ERATO 齊藤スピン量子整流プロジェクト WEB サイト:

<https://www.jst.go.jp/erato/saitoh/ja/index.html>

本プロジェクトにおける過去の研究成果を掲載しています。

• スピンワールド:

<http://www.spinworld.jp/>

ERATO 齊藤スピン量子整流プロジェクトのアウトリーチサイトです。スピン科学やその基礎となる磁石の物理をやさしく解説しています。

#### 【問い合わせ先】

◆ 研究に関すること

齊藤 英治(サイトウ エイジ)

ERATO 齊藤スピン量子整流プロジェクト 研究総括

東京大学 大学院工学系研究科物理工学専攻 教授  
東北大学 材料科学高等研究所(AIMR)／金属材料研究所

◆JST の事業に関すること

古川 雅士(フルカワ マサシ)

科学技術振興機構(JST) 研究プロジェクト推進部

◆報道担当

東北大学 材料科学高等研究所(AIMR) 広報・アウトリーチオフィス

東北大学 金属材料研究所 情報企画室広報班

科学技術振興機構(JST) 広報課

東京大学 大学院工学系研究科 広報室