



東北大学



平成 22 年 9 月 24 日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学
独立行政法人日本原子力研究開発機構

絶縁体からの熱電発電に成功

－ グリーン・省エネデバイス開発に道 －

【発表のポイント】

- 絶縁体においても、温度差をつけることで磁気(スピン)の流れが生じることを発見
- これまで不可能と考えられていた「絶縁体からの熱電エネルギーの取り出し」に成功
- 熱電材料の選択の幅が大きく広がり、大規模発電から携帯用小型熱電変換素子までの幅広い応用に期待

東北大学金属材料研究所の齊藤英治教授(日本原子力研究開発機構先端基礎センター客員グループリーダー兼任)、東北大学大学院博士課程2年の内田健一氏、日本原子力研究開発機構先端基礎研究センターの前川禎通センター長らは、温度差をつけた絶縁体から電気エネルギーを取り出す新しい手法を発見しました。

近年、金属や半導体に温度差をつけると温度の勾配に沿って電圧が発生する現象「ゼーベック効果」^{注1)}を利用した熱電変換素子が、環境負荷が小さく高い信頼性を有するエネルギー源として期待されています。一方で、この現象は導電体中でしか生じず、伝導電子を介した熱伝導によるエネルギーロスが発電効率を下げてしまうため、熱電変換素子の実用化の範囲は非常に限定されていました。

今回、齊藤教授らは絶縁体である磁性ガーネット結晶^{注2)}を用いて、温度差によって電子の磁気的性質「スピン」^{注3)}が流れる現象「スピンゼーベック効果」^{注4)}が絶縁体中で生じることを発見しました。すでに、絶縁体中で生じたスピンの流れを、絶縁体に金属薄膜を取り付けることによって電気エネルギーに変換できることを明らかにしており、これらの二つの原理を用いることで、従来は不可能だった絶縁体ベースの熱電変換素子をつくることができるようになります。

本研究成果によって、熱伝導によるエネルギー損失が小さい絶縁体を熱電変換素子に利用できるようになり、熱電変換素子の設計自由度や設置可能場所の拡大、及び環境に配慮した電力技術開発への貢献が期待できます。

本研究成果は、英国科学誌「Nature Materials(ネイチャーマテリアルズ)」のオンライン版(9月26日付)に掲載されます。

【本件に関する問い合わせ先】

(研究内容について)

国立大学法人東北大学金属材料研究所	量子表面界面科学研究部門	教授	齊藤 英治	TEL: 022-215-2021
国立大学法人東北大学金属材料研究所	量子表面界面科学研究部門		内田 健一	TEL: 022-215-2023
独立行政法人日本原子力研究開発機構	先端基礎研究センター	センター長	前川 禎通	TEL: 029-282-5093

(報道担当)

国立大学法人東北大学金属材料研究所	総務課庶務係主任	小玉 亨	TEL: 022-215-2181, FAX: 022-215-2184
独立行政法人日本原子力研究開発機構	広報部次長	須賀 伸一	TEL: 03-3592-2346, FAX: 03-5157-1950

【背景と経緯】

金属や半導体に温度差をつけると、温度の勾配に沿って電圧が発生します。この現象はゼーベック効果と呼ばれ、1800年代前半にドイツの物理学者（兼医師）のトーマス・ゼーベックによって発見されました。ゼーベック効果を用いれば、排熱などから電気を生成する熱電変換素子を構築可能であるため、クリーンで信頼性の高いエネルギー源の候補として期待されており、この現象の発見以来 200 年近くにわたって世界中で盛んに研究が行われてきました。しかし、ジュール熱や素子内部の熱伝導によって生じるエネルギー損失、コストや設置可能箇所の制約によって、熱電変換素子の実用化範囲は非常に限定されていました。

一方で、電子は「電気」と「磁気(スピン)」の2つの性質を持ちますが、温度差をつけた磁性体中にスピンの流れが生じる「スピン版のゼーベック効果」が存在することが、2008年に明らかになりました(図1、関連論文1を参照)。従来のゼーベック効果は電気を通す導電体でのみ生じる現象であり、同様にスピンゼーベック効果も鉄などの磁性を持つ金属でのみ観測されていましたが、今回、スピンゼーベック効果が絶縁体においても発現することを発見しました。スピンゼーベック効果によって生成されたスピンの流れは、絶縁体に金属薄膜を取り付けることによって電圧に変換することが可能であり、従来は不可能だと考えられていた「絶縁体を用いた熱電発電」がこの効果を利用することによって可能であることを初めて示しました(図1)。

【研究の内容】

今回の研究では、絶縁体である磁性ガーネット薄膜の表面に白金(Pt)電極薄膜を付けた素子を作製し、絶縁体層に温度差をつけながら白金電極に発生する電気信号の精密測定を行いました(図2)。検出された電圧信号が絶縁体中のスピンゼーベック効果に由来することを明らかにし、絶縁体熱電変換素子のプロトタイプを作製することに成功しました。従来の金属や半導体を用いた熱電素子は、ウィーデマン・フランツ則^{注5)}と呼ばれる物理法則による制約によって性能の向上には限界があると考えられてきましたが、今回開発した素子を用いれば、原理的にウィーデマン・フランツ則による上限を超えることが可能になります。

本研究の一部は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の産業技術研究助成事業、独立行政法人科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業等の一環として実施されました。

【原理の説明】

通常のゼーベック効果は導電体中の伝導電子が温度勾配に沿って電気を運ぶことによって発生します。一方、磁性絶縁体におけるスピンゼーベック効果は、磁性ガーネット中に存在する多数のスピンの集団運動(スピン波)が温度勾配によって誘起されることで生じます。このスピンの集団運動が生じている場所に白金薄膜を取り付けると、磁性ガーネット/白金界面にスピンの流れ(スピン流)が生じ、白金中の「逆スピンホール効果」^{注6)}と呼ばれる固体中の電子相対論効果によってこのスピン流は電圧に変換されます(図2、関連論文2を参照)。従来の熱電素子において熱の流れと生成された電圧は同じ物質(導電体)中に存在していましたが、今回の素子では温度差は絶縁体層のみについており、熱の流路と電圧発生の役割をそれぞれ絶縁体とそれに取り付けた

金属の2つに分離することが可能となりました。これにより、同じ物質中の熱と電気の流れに関するウィーデマン・フランツ則による制限を回避でき、また素子設計の自由度も大幅に向上します。

【今後の展開】

環境負荷の小さなエネルギー技術への大きな需要を鑑みると、熱流や温度差から電力を取り出す熱電技術は最重要課題のひとつであるといえます。熱電変換性能を飛躍的に向上させることができれば、大規模発電から携帯用小型素子まで幅広い応用が期待できます。

本研究によって初めて開拓された絶縁体熱電変換素子は、従来の熱電素子とは全く異なる物理原理によって駆動されるものであり、これを用いれば熱電性能指数改善に関する問題を根本的に解決する可能性があります。本研究成果により、熱電素子の設計自由度や設置可能場所の拡大、及び環境に配慮した電力技術開発への貢献が期待できます。

【参考図】

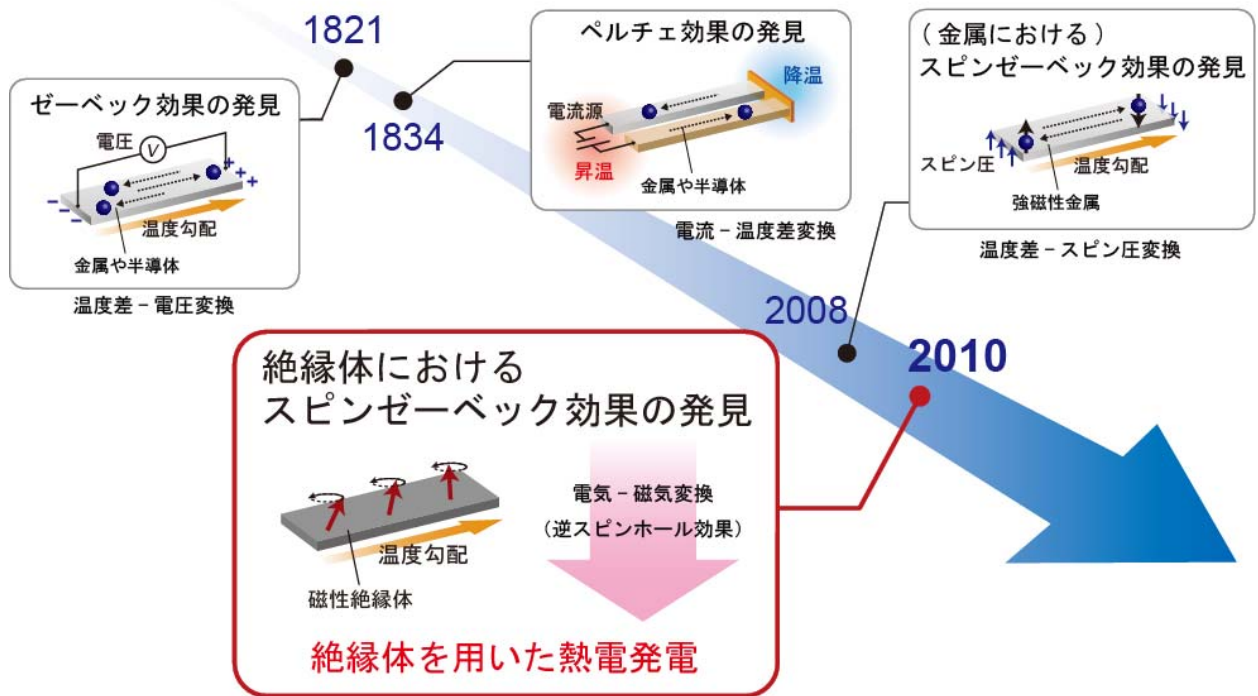


図1 熱電効果の歴史。絶縁体を用いた熱電発電現象が初めて観測された。

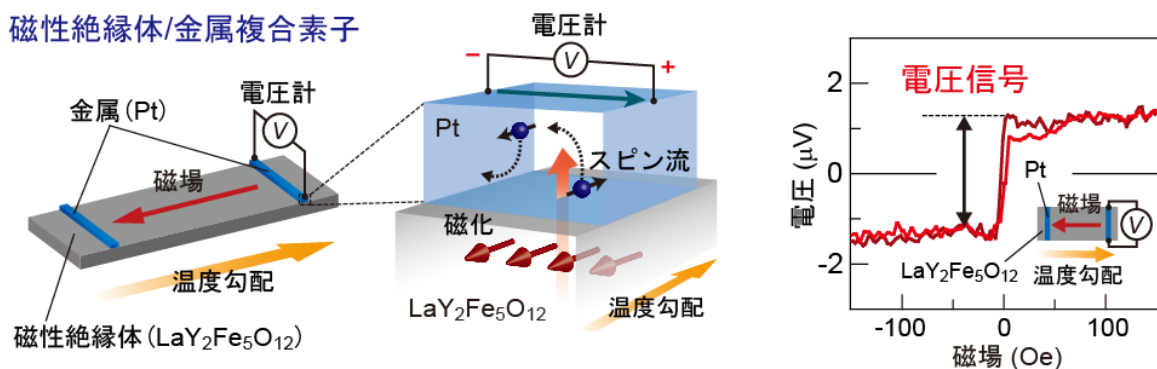


図2 絶縁体熱電変換素子における熱起電力の検出。絶縁体 $\text{LaY}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ に白金 (Pt) 電極を取り付け、 $\text{LaY}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 層に温度勾配をつけると、Pt電極に電圧が発生する。

【用語解説】

注1) ゼーベック効果

熱流と電流の相互作用現象である熱電効果のひとつであり、温度差をつけた導体中に温度勾配と平行な方向の起電力が生じる現象。熱電変換能の異なる二種の物質を接合した素子は熱電対と呼ばれ、熱エネルギー源や精密な温度計として広く利用されている。

注2) 磁性ガーネット結晶

組成式が RFe_5O_{12} (R: 希土類元素、Fe: 鉄、O: 酸素) で表わされる化合物。本研究ではランタン(La)を添加したイットリウム (Y) 鉄ガーネット、 $LaY_2Fe_5O_{12}$ を用いた。

注3) スピン

電子が有する自転のような性質。電子スピンは磁石の磁場の発生源でもあり、スピンの状態には上向きと下向きという2つの状態がある。齊藤教授らが2006年に発見した「逆スピンホール効果」を利用すると、物質中のスピンの流れ(スピン流)を電気に変換することができる。

注4) スピンゼーベック効果

温度差をつけた磁性体において、温度勾配と平行な方向にスピン流の駆動力(スピン圧)が生成される現象(関連論文1を参照)。近年盛んに研究されているスピントロニクス分野において、汎用性の高いスピン駆動源としての応用が期待されるとともに、逆スピンホール効果と結合することで発電素子としての応用の可能性が示唆されている。

注5) ウィーデマン・フランツ則

金属や半導体において電気伝導度と熱伝導度の比が一定になるという法則で、多くの金属や半導体において成り立つことが示されている。熱電素子の性能指数は電気伝導度と熱伝導度の比に比例するため、通常の金属や半導体を用いた熱電素子では、性能指数に限界があると考えられていた。

注6) 逆スピンホール効果

スピン流と垂直な方向に電圧が発生する現象。スピンの物質中を流れると、流れを横向きに曲げる力が働く「スピン軌道相互作用」という現象が以前から知られている。このとき、上向き状態のスピンと下向き状態のスピンでは逆向きの力を受ける。スピン流では上向き状態のスピンと下向き状態のスピンが逆向きに流れているため、両者とも同じ方向に曲げられる結果となり、スピン流の流れと垂直な方向に電圧が発生することになる。スピン情報と電気情報をつなぐ現象として、スピントロニクスにおいて重要である。

【論文名・著者名】

“Spin Seebeck insulator” (スピンゼーベック絶縁体)

K. Uchida, J. Xiao, H. Adachi, J. Ohe, S. Takahashi, J. Ieda, T. Ota, Y. Kajiwara, H. Umezawa, H. Kawai, G. E. W. Bauer, S. Maekawa, and E. Saitoh

【関連論文】

1. 金属系におけるスピンゼーベック効果の発見に関する論文：

K. Uchida, S. Takahashi, K. Harii, J. Ieda, W. Koshibae, K. Ando, S. Maekawa, and E. Saitoh,

“Observation of the spin-Seebeck effect,” *Nature* **455** (2008) 778–781.

2. 磁性絶縁体へのスピン流注入に関する論文：

Y. Kajiwara, K. Harii, S. Takahashi, J. Ohe, K. Uchida, M. Mizuguchi, H. Umezawa, H. Kawai, K. Ando, K. Takanashi, S. Maekawa, and E. Saitoh,

“Transmission of electrical signals by spin-wave interconversion in a magnetic insulator”

Nature **464** (2010) 262–266.

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

齊藤 英治 (サイトウ エイジ)
東北大学金属材料研究所 教授
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1
Tel: 022-215-2021
E-mail: eizi@imr.tohoku.ac.jp

内田 健一 (ウチダ ケンイチ)
東北大学金属材料研究所 博士課程 2年
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1
Tel: 022-215-2023
E-mail: kuchida@imr.tohoku.ac.jp

前川 禎通 (マエカワ サダミチ)
日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター センター長
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4
Tel: 029-282-5093
E-mail: maekawa.sadamichi@jaea.go.jp

<報道担当>

東北大学金属材料研究所 総務課庶務係主任 小玉 亨 (コダマ トオル)
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1
Tel: 022-215-2181, Fax: 022-215-2184
E-mail: imr-som@imr.tohoku.ac.jp

日本原子力研究開発機構 広報部 次長 須賀 伸一 (スガ シンイチ)
〒100-8577 東京都千代田区内幸町 2-1-8 新生銀行本店ビル 11階
Tel: 03-3592-2346, Fax: 03-5157-1950
E-mail: suga.shinichi@jaea.go.jp