



2026 年 7 月 21 日

NIMS（国立研究開発法人物質・材料研究機構）
 国立大学法人東京大学大学院新領域創成科学研究科
 国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）

熱を電気に変える「ナノ界面」をマクロに三次元形成した磁性体を開発

～熱エネルギーの有効活用に向けた新たな材料設計の指針～

NIMS と東京大学からなる研究チームは、磁性を持つ絶縁体粉末の表面を金属で被覆し、これを押し固めることで、材料内部全体に三次元ナノ界面が分布する新しい複合体を開発しました。この構造を用いて、従来はナノスケールの薄膜界面でのみ観測されてきた絶縁体中のスピンによって駆動される熱電変換を、マクロスケールの材料で観測することに成功しました。この研究成果は、絶縁体中の熱エネルギーを有効活用するための新たな材料設計指針を与えるものであり、7 月 21 日に Nature Communications 誌に掲載されました。

研究成果の概要

■ 従来の課題

身の回りに存在する膨大な廃熱・未利用熱を電気エネルギーとして活用する熱電変換は、エネルギー利用効率の向上やカーボンニュートラルの実現に向けた重要な技術の一つです。スピントリック効果^[1]は 2008 年に日本で発見された物理現象であり、磁性体に温度勾配を与えることでスピン流^[2]を介した熱電変換が可能となります。しかし、従来のスピントリック素子は、磁性体と金属薄膜の積層構造であるため、素子を厚くすることや多層化することによる出力電力の向上には限界がありました。

■ 成果のポイント

今回、研究チームは、磁性絶縁体であるイットリウム鉄ガーネット（YIG）^[3]粉末の表面を白金（Pt）で被覆し、低温・高圧で押し固めることで、YIG と Pt のナノスケール界面が材料内部全体に三次元的に分布するバルク^[4]複合体を開発しました。この複合体では、従来の薄膜^[5]積層素子とは異なり、バルク内部全体に分布した界面を利用したスピントリック効果による熱電変換が可能となります（図 1）。作製した YIG-Pt バルク複合体においてスピントリック効果が発現することを実証するとともに、材料内部に分散した金属経路を利用することで厚み方向のスケールアップに有利となることを示しました。本成果は、ナノスケールの界面現象をマクロスケールのエネルギー変換へつなげる「トランススケール」スピントリック効果の概念を実証したものです。

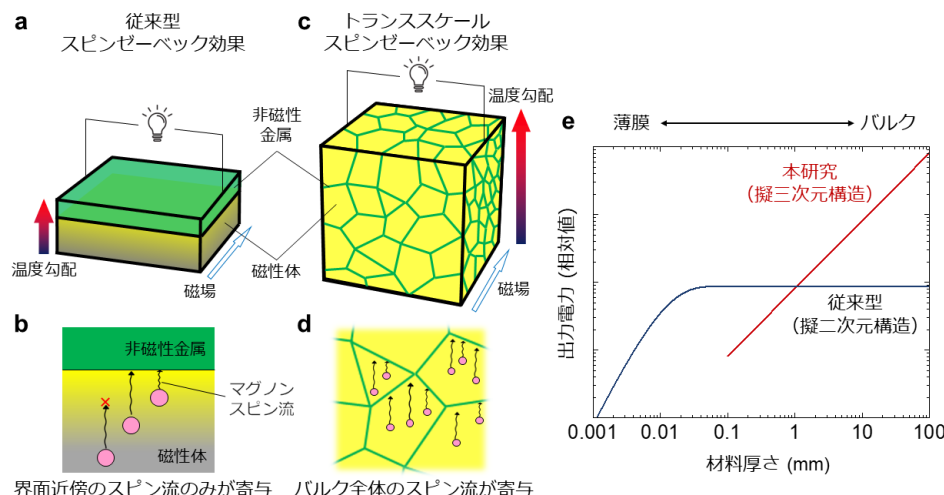


図 1：従来型スピントリック素子とトランススケール・スピントリック素子の概念図。従来構造（a）では、スピン流の寄与は磁性体と金属の界面近傍のみに現れる（b）。一方、今回開発した複合体（c）では、金属が材料内部に三次元的に分散しており（d）、バルク全体を使ったスピン流生成とスピントリック効果による熱電変換が可能となる（e）。

■将来展望

本成果により、ナノスケール界面を材料内部全体に三次元的に形成することで、薄膜界面に限られていたスピン熱電現象をバルク材料へ拡張できることが示されました。今後、三次元界面構造の設計・制御や材料の最適化により、熱電変換性能のさらなる向上が期待されます。従来の熱電変換技術では利用できなかった絶縁体中の熱エネルギーをマクロスケールの材料で電気エネルギーに変換可能であることを実証したことで、新たな熱マネジメント^[6]デバイスの開発につながる可能性が生まれました。

■その他

- 本研究は、NIMS 磁性・スピントロニクス材料研究センターの Sang Jun Park（サンジュン パク）博士研究員、内田健一 上席グループリーダー（兼 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 物質系専攻 教授）、東京大学 大学院新領域創成科学研究科 物質系専攻の平田圭佑助教（研究開始当時 豊田工業大学 助教）らの研究チームによって、JST 戦略的創造研究推進事業 ERATO「内田磁性熱動体プロジェクト」（研究総括：内田健一、課題番号：JPMJER2201）の支援のもと行われました。
- 本研究成果は、2026 年 7 月 21 日に Nature Communications 誌に掲載されました。

研究の背景

熱電変換技術は、熱エネルギーを電気信号または電気エネルギーへ直接変換する技術です。現在、社会のさまざまな場所でも多くの熱が利用されないまま放出されており、このような未利用熱を有効活用したり、熱の流れを検出したりする技術は、省エネルギー化やカーボンニュートラルの実現に不可欠です。最もよく知られている熱電変換の駆動原理は、ゼーベック効果です。ゼーベック効果においては、金属や半導体に温度差を与えたときに電荷の移動に伴って電圧が発生します。

一方、スピンゼーベック効果においては、磁性体に温度差を与えると、電荷の移動ではなく、電子の磁気的な性質であるスピンの流れ（スピン流）が生じます。スピン流は磁性体に金属を接合することで電流に変換できるため、スピン流を介して熱が電気信号に変換されることになります。ゼーベック効果は金属や半導体中でしか生じませんが、スピンゼーベック効果は電流が流れない磁性絶縁体においても生じるため、熱電変換のための材料選択の幅を大きく拡張する可能性を有しています。しかし、これまでのスピンゼーベック素子は薄膜積層構造に依存していたため、熱を電気信号に変換できる領域が界面近傍に限られていました。本研究では、ナノスケール界面を薄膜表面だけに設けるのではなく、バルク材料の内部全体に三次元的に配置する戦略を採用しました。これにより、ナノスケールで生じるスピン熱電変換を、マクロスケールの熱電変換へとつなげることを目指しました。

研究内容と成果

本研究では、磁性絶縁体であるイットリウム鉄ガーネット（YIG）と、非磁性金属である白金（Pt）を組み合わせたナノ構造バルク複合体を作製しました。YIG は、スピンゼーベック効果の研究で広く用いられている代表的な磁性絶縁体です。YIG 結晶の粉末表面に動的粉末スパッタリング法^[7]を用いて Pt 薄膜を被覆しました。この方法では、粉末を攪拌しながらスパッタリングを行うことで、個々の粉末の表面全体に金属層を形成できます。実際に、透過電子顕微鏡観察によって YIG 粉末表面にナノメートルスケールの Pt 薄膜が形成されていることを確認しました。その後、Pt を被覆した YIG 粉末を低温・高圧条件で押し固めることで、バルク複合体を作製しました。通常、酸化物である YIG 粉末を押し固めてバルク化するには 900℃以上の高温処理が必要ですが、高温処理は薄い Pt 層の連続性や界面品質を低下させてしまいます。本研究では、Pt 層が有する延性と接着性を活用することで、はるかに低温である 300℃または室温での高圧プレスによりバルク複合体を合成することに成功しました。得られた複合体においては、YIG 粒子の周囲に Pt が分布し、材料内部に金属伝導経路が形成されていることが確認されました（図 2）。

作製したミリメートルスケールの YIG-Pt バルク複合体を磁化させて温度勾配を加えたところ、温度勾配に比例して増加する熱起電力が観測され、その符号は磁化の向き（N 極－S 極の向き）に応じて反転しました（図 3）。系統的な実験により、観測された熱起電力がスピン流によって生成されていることを示し、磁性絶縁体から構成されるバルク複合体でスピンゼーベック効果が発現していることを実証しました。従来の薄膜型スピンゼーベック素子では熱電変換に寄与する領域が界面近傍に限られるため、一定の厚み以上で温度勾配あたりの出力電力が飽和します。一方、本研究で開発した三次元バルク複合体では、スピン流

を電気信号に変換できるナノ界面がバルク材料内に三次元的に形成されており、それが金属ネットワークとしてつながっているため、温度勾配あたりの出力電力は素子の厚さ（体積）に比例して増加します（図1）。以上の結果により、ナノスケールのスピントランスポール現象をマクロスケールの材料で利用できることが示されました。

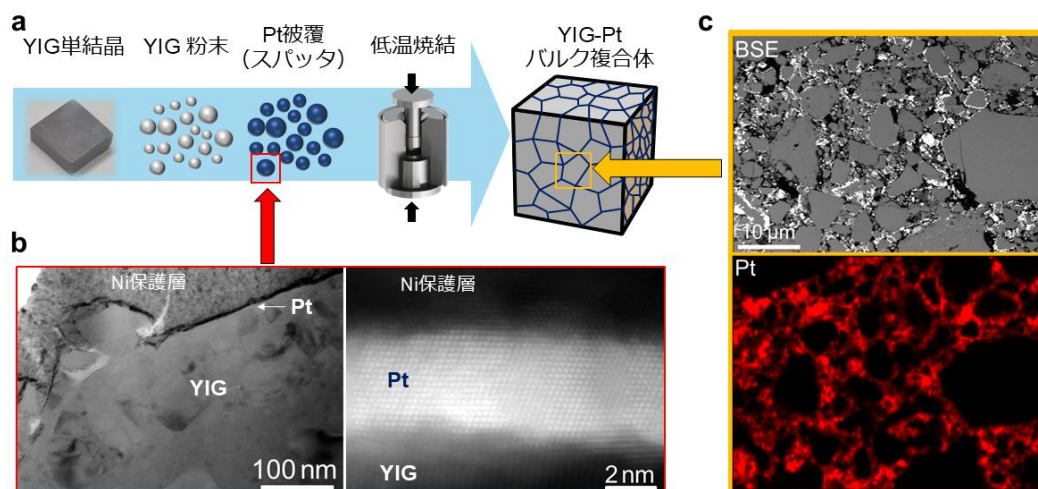


図2：YIG-Ptバルク複合体の作製プロセスと構造評価。透過電子顕微鏡観察によりYIG表面に形成されたナノメートルスケールのPt層を確認し、反射電子（BSE）像およびPt元素マッピングにより、バルク複合体内部でPtがYIG粒子の周囲に分布し、ネットワークを形成していることを確認した。

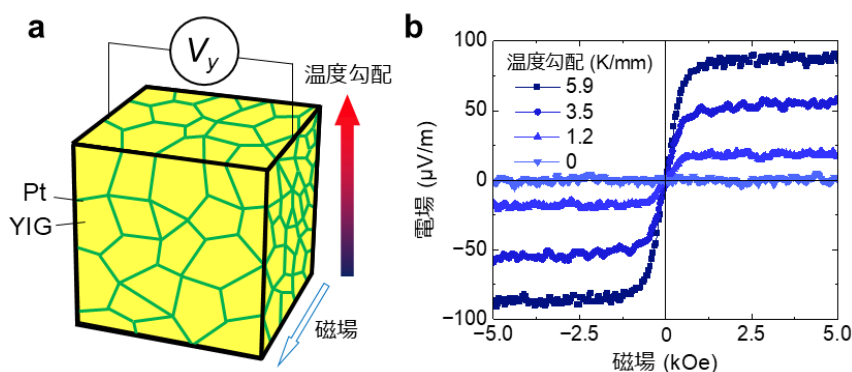


図3：YIG-Ptバルク複合体におけるスピントランスポール効果の観測。YIG-Ptバルク複合体に温度勾配と磁場を加えることで、温度勾配と直交する方向に熱起電力信号が観測された。熱起電力信号の大きさは、複合体の磁化が飽和する磁場値で飽和した。Pt薄膜をタングステン薄膜に置き換えると熱起電力の符号が反転する、強磁場を印加すると熱起電力が減衰するなど、スピントランスポール効果特有の性質が本バルク複合体において観測された。

今後の展開

本研究では、Pt被覆YIG粉末により作製したバルク複合体を用いて、従来は薄膜界面構造に限られていたスピントランスポール効果をバルクスケールへ拡張できることを示しました。この結果は、絶縁体を用いたスピン熱電変換に対する新しい材料設計指針を与えるものです。現時点では材料設計コンセプトが実証された段階ですが、磁性絶縁体・金属層の最適化、界面の品質向上、三次元的に形成されたナノ界面の密度・分布の制御などにより、スピン熱電変換の性能を大幅に向上させる余地が残されています。永久磁石を含む機能性磁性材料の多くがナノ～マイクロスケールで複雑な微細組織を有しているため、本研究成果は、スピン熱電変換の観点で界面や微細組織を設計することで、実用機能性材料においてもスピントランスポール効果を発現させることが可能であることを示唆するものです。今後本研究に基づくトランススケール磁性材料科学を発展させることにより、未利用熱の活用や熱流センシングに資する新たなエネルギー材料の開発につながることが期待されます。

■掲載論文

題目	Trans-scale spin Seebeck effect in nanostructured bulk composites based on magnetic insulator
著者	Sang J. Park*, Keisuke Hirata, Hossein Sepehri-Amin, Fuyuki Ando, Takamasa Hirai, and Ken-ichi Uchida*
雑誌	Nature Communications
DOI	10.1038/s41467-026-75232-0
掲載日	2026 年 7 月 21 日

■用語解説

- [1] **スピンゼーベック効果**：磁性体に温度勾配を与えた際にスピン流が生成される現象であり、2008 年に日本で発見されました。金属や半導体のみならず、磁性を持つ絶縁体においても生じます。スピンゼーベック効果によって生成されたスピン流は、磁性体に金属薄膜を接合することによって電流に変換できるため、「絶縁体を用いた熱電変換」を実現することができます。
- [2] **スピン流**：電子が持つ自転のような性質はスピンと呼ばれ、磁気の源となります。スピンの状態には上向きと下向きの 2 つがあり、スピナー方向にそろった物質が磁石になります。電流が流れることなくスピンだけが流れている状態がスピン流です。スピン流は伝導電子やマグノン（スピンの集団運動の準粒子）などによって運ばれ、伝導電子が存在しないイットリウム鉄ガーネットなどの磁性絶縁体においてはマグノンがスピン流のキャリアとなります。
- [3] **イットリウム鉄ガーネット（YIG）**：イットリウム（Y）と鉄（Fe）から構成される酸化物で、組成式が $Y_3Fe_5O_{12}$ で表される磁性絶縁体です。磁気損失が小さく、スピンゼーベック効果やスピン輸送の研究に広く用いられています。
- [4] **バルク**：マクロスケールであり、基板などが存在しなくてもそれ単体で自立する材料という意味で使用しています。熱電発電や電子冷却の出力を高めるためにはバルク材料が必要になります。
- [5] **薄膜**：厚さ方向にナノ（10 億分の 1）～マイクロ（100 万分の 1）メートルスケールであり、基板などが存在しないと自立できない材料という意味で使用しています。
- [6] **熱マネジメント**：熱エネルギーを制御、有効利用することで省エネルギー化や高効率化を行う技術の総称です。その対象は、電子デバイス、自動車から IT、住宅まで幅広く、特に近年の電子デバイスの小型化・高性能化に伴ってその重要性が増しています。
- [7] **動的粉末スパッタリング法**：粉末を回転・振動させながらスパッタリングを行うことで、粉末粒子の表面に薄膜材料を形成する方法です。本研究では、YIG 粉末表面にナノメートル厚の Pt 薄膜を形成するために用いました。

本件に関するお問い合わせ先

報道・広報について	NIMS 国際・広報部門 広報室 〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1 E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017
	東京大学 大学院新領域創成科学研究科 広報室 〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 E-mail: press@k.u-tokyo.ac.jp TEL: 04-7136-5450
	科学技術振興機構 広報課 〒102-8666 東京都千代田区四番町 5-3 サイエンスプラザ E-mail: jstkoho@jst.go.jp TEL: 03-5214-8404, FAX: 03-5214-8432
支援事業について	科学技術振興機構 研究プロジェクト推進部 推進第 1 グループ 中村亮二 〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町 E-mail: eratowww@jst.go.jp TEL: 03-3512-3528

NIMS とは？

NIMS（ニムス）は、物質・材料科学の研究に特化した国立研究開発法人です。

エネルギー、環境、医療、インフラ、モビリティ——私たちの暮らしを支えるあらゆる技術は「物質」と「材料」で成り立っています。

NIMS はそれらの基礎・基盤研究だけでなく、成果の普及とその活用の促進まで総合的に行っています。

社会の発展は常に物質・材料科学の進歩とともにあり、いま、地球規模の環境・資源問題の解決に向けたカギとして、その重要性はいっそう高まっています。

NIMS は「材料で、世界を変える」というビジョンのもと、持続可能で豊かな社会の実現を目指して、世界最先端の研究を続けています。

【NIMS を掴む参考ページ】

NIMS はこんな研究所！ <https://www.nims.go.jp/nims/introduction.html>

NIMS ビジョン <https://www.nims.go.jp/nims/profile.html#vision>