



平成 30 年 11 月 29 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  
東京工業大学

## 超伝導体を利用した新たな環境発電機能を実証

### 【発表のポイント】

- 第二種超伝導体 (注 1) の性質を利用した環境発電機能を実証した。
- 試料の温度を一定に保ち、特定の磁場を印加するだけで、環境の“揺らぎ”から直流電圧が発生する。
- 微弱な環境揺らぎからの発電や、微弱信号を検出する素子に応用できる可能性がある。

### 【概要】

東北大学金属材料研究所のヤナ・ルスティコバ氏 (大学院博士課程・日本学術振興会特別研究員)、塩見雄毅助教 (現 東京大学大学院総合文化研究科・広域科学専攻相関基礎科学系准教授) と横井直人研究員、東京工業大学理学院物理学系の大熊哲教授、東北大学金属材料研究所・材料科学高等研究所の齊藤英治教授 (現 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻教授兼任) らは、第二種超伝導体の渦糸液体状態 (注 2) を利用した新たな環境発電機能を実証しました。本成果は 2018 年 11 月 22 日 (英国時間) 「Nature Communications」オンライン版で公開されました。

## 【研究の背景】

環境発電とは、身の回りにある様々な“揺らぎ”から、使える電力を取り出す技術です。例えば、熱エネルギーという揺らぎを電力に変換する熱電変換素子、マイクロ波を電流へと変換するレクテナなどがあります。このような揺らぐエネルギーから電力を得るためには、一般に整流効果（注3）が必要になります。

整流効果を持つ代表的な素子は電子回路などに使われるダイオードです。ダイオードはn型半導体とp型半導体を結合させて作ります。n型半導体とp型半導体の界面では、原子スケールの長さで電気的な性質が大きく変わるため、非常に大きな電気的なバリアが形成されます。このため一方向にのみ電流が流れ、整流効果を発現することになります。

このような整流効果を生み出す仕組みは、環境発電をはじめとして現代の電子機器の核となる要素技術です。ダイオードのような人工的な構造物や、対称性を下げた材料を利用して、新たな整流素子を生み出そうとする研究が活発に行われています。本研究では第二種超伝導体に特有な“渦糸”の液体状態を利用して、全く新しい整流素子を実証しました。

## 【研究の内容・成果】

本研究では、モリブデンゲルマニウム(MoGe)という第二種超伝導体を、磁性絶縁体イットリウム鉄ガーネット( $Y_3Fe_5O_{12}$ )基板に成膜した試料を用意しました(図1)。驚くべきことに、試料の温度を一定に保ちながらこの薄膜試料の面内方向に磁場を印加すると、ある特定の磁場値において、外部からの入力がないにもかかわらず、MoGeの面内方向に直流電圧が発生することが明らかとなりました(図2)。この直流電圧は、電磁ノイズのある測定環境では一日中安定して観測され続けました。

直流電圧が生じる温度と磁場の条件を詳細に調べると、MoGeがいわゆる渦糸液体相にあるときに電圧が生じていることがわかりました(図3)。渦糸とは第二種超伝導体特有の“欠陥”であり、超伝導体の内部に侵入する磁束線のことを

指します。渦糸液体相とは、この渦糸が超伝導体内部で自由に運動できる状態になっている相です。渦糸の特徴は、試料の表面でのみ超伝導体内部へ入ったり出たりすることができ、一度試料内部に導入されると非常に安定に存在します。超伝導体が単独で熱平衡状態にあるときは、この表面から外部へ出たり入ったりする渦糸は、試料の全ての表面で一様であり、渦糸の運動に特別な向きは生じません。

本研究で示された直流電圧は、磁性絶縁体である  $Y_3Fe_5O_{12}$  が MoGe の片側に取り付けられていることによって生じていると解釈できます。 $Y_3Fe_5O_{12}$  が付いている表面と付いていない表面とでは渦糸が超伝導体内部へ入り込むために必要になるエネルギーが異なり、それぞれの表面近くでの渦糸の量にアンバランスが生じます。MoGe 薄膜の面内方向に電流を流したとき、薄膜の面直方向に駆動される渦糸の数が電流の正と負で異なります。この渦糸の流れによって、面内方向に電圧が生じ、超伝導の電気抵抗として観測されます。従って、ダイオードと同じように、電流の向きによって電気抵抗が異なり、すなわち整流効果を発揮させると考えられます。測定された直流電圧は、測定器内部にある電磁ノイズが、渦糸の量のアンバランスによって整流された結果であると解釈できます。

### 【今後の展望】

本研究は超伝導体渦糸を利用した新たな整流機能を実証しました。低温動作ながらも非常に感度の高い整流素子であり、ノイズ評価や微弱信号の検出に利用できる可能性があります。また、同様の整流機能が、渦糸の他の様々なトポロジカルな欠陥にも期待され、新たな物質機能開拓の端緒となると期待されます。

### 【付記事項】

本研究は、科学技術振興機構（JST） 戦略的創造研究推進事業 総括実施型研究（ERATO） 齊藤スピン量子整流プロジェクトの一環で行われました。

【論文情報】

“Vortex rectenna powered by environmental fluctuations”

J. Lustikova, Y. Shiomi, N. Yokoi, N. Kabeya, N. Kimura, K. Ienaga, S. Kaneko,  
S. Okuma, S. Takahashi and Eiji Saitoh

Nature Communications

DOI:10.1038/s41467-018-07352-1

【参考図】

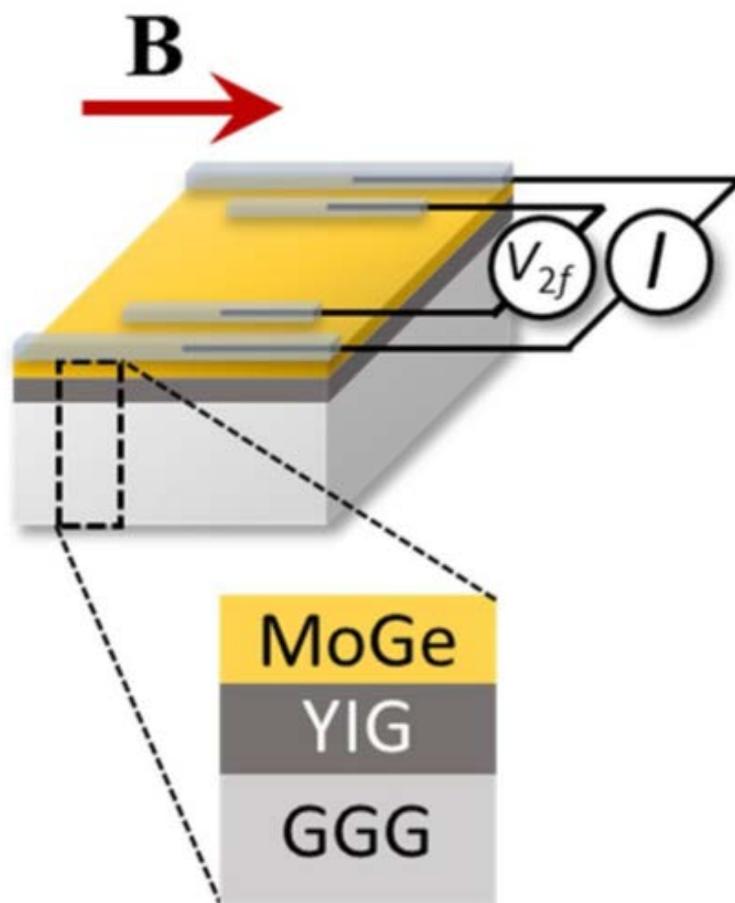


図1 実験に使用した試料と測定セットアップの模式図。ガドリニウムガリウムガーネット (GGG) 基板上に YIG 単結晶を成長させた試料に、MoGe をスパッタリング成膜している。MoGe 膜上に、電気測定 (電流 (I)、電圧 (V)) の電極を作製した。磁場 (B) は MoGe 膜の面内方向に印加している。

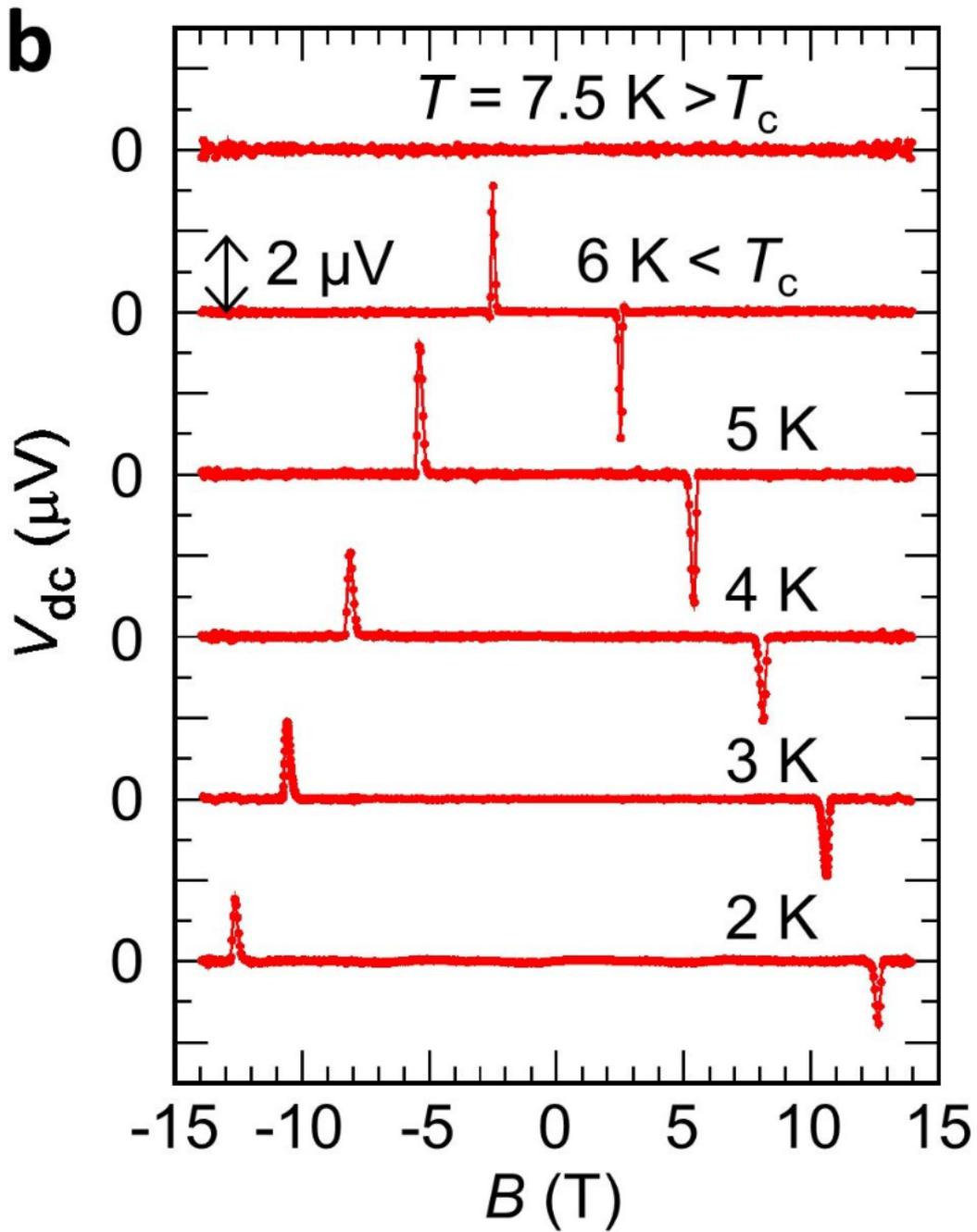


図2 MoGe 超伝導薄膜に生じる電圧 ( $V_{dc}$ ) の磁場依存性。温度 ( $T$ ) を一定にした状態で、MoGe の面内方向に印加した磁場 ( $B$ ) を変化させると、ある磁場値において非常に鋭い電圧ピークが観測された。転移温度 ( $T_c$ ) を超えると観測されなくなったことから、この電圧は、MoGe の超伝導性による電圧と考えられる。

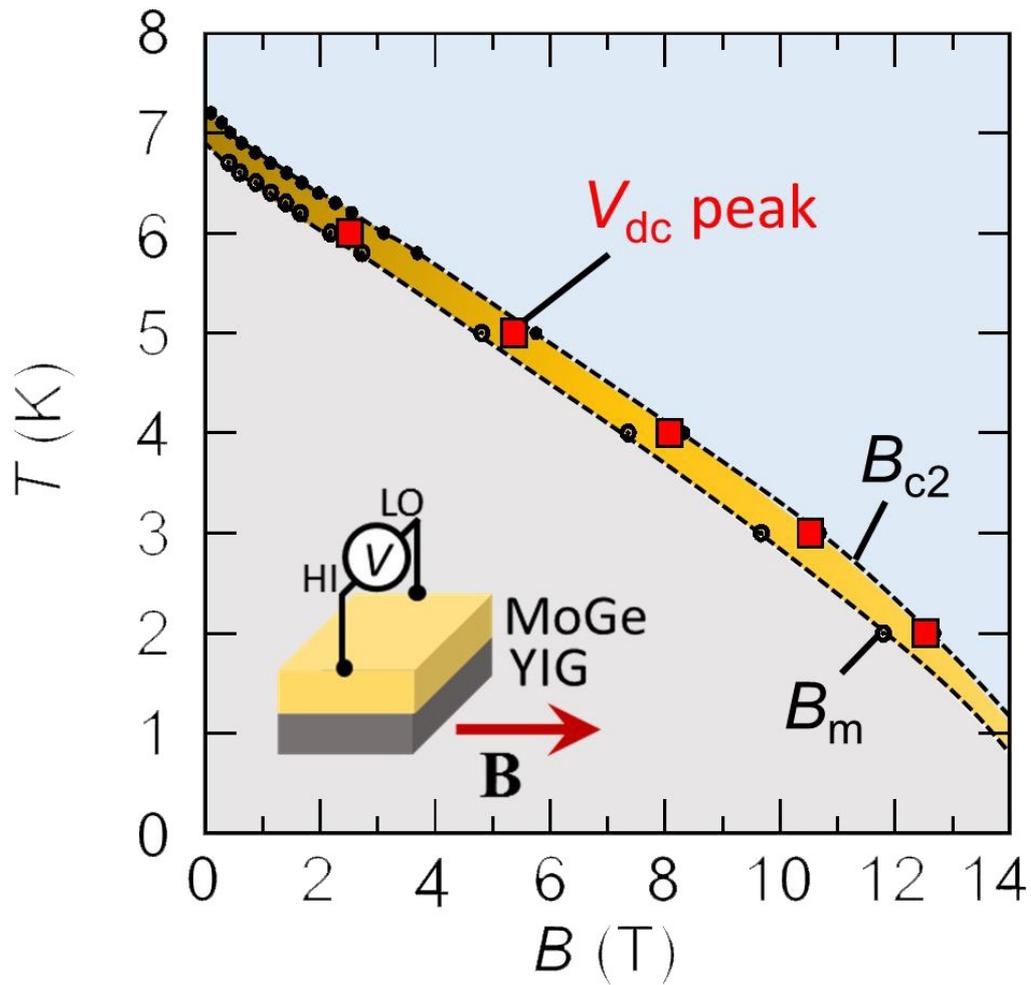


図3 MoGeに電圧が生じた温度 ( $T$ ) と磁場 ( $B$ ) の組み合わせを、MoGeの超伝導相の相図と照らし合わせた結果。電圧が生じた条件は赤い正方形で示されており、全て黄色い帯の領域内で生じていることがわかる。この黄色い帯の部分は、渦糸液体相に対応する。

## 【用語解説】

### 注1) 第二種超伝導体

超伝導体にはある一定の磁場（臨界磁場）を超えた場合、常伝導状態に移行する第一種超伝導体と、超伝導状態を保ったまま一定の磁束線が侵入する渦糸状態を経て、常伝導状態へ移行する第二種超伝導体とがある。

### 注2) 渦糸液体状態

渦糸とは第二種超伝導体特有の“欠陥”であり、超伝導体の内部に侵入する磁束線のこと、この渦糸が超伝導体内部で自由に運動できる状態のことを指す。

### 注3) 整流効果

電流の向きによって、その流れやすさが変わる現象のこと。

## 【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 齊藤量子スピン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

〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

Tel : 022-217-6238 Fax : 022-217-6395

E-mail : eizi@ap.t.u-tokyo.ac.jp

◆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

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町

Tel : 03-3512-3528 Fax : 03-3222-2068 E-mail : eratowww@jst.go.jp

◆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

Tel : 022-217-6146 E-mail : aimr-outreach@grp.tohoku.ac.jp

東北大学 金属材料研究所 情報企画室広報班

Tel : 022-215-2144 E-mail : pro-adm@imr.tohoku.ac.jp

科学技術振興機構 (JST) 広報課

Tel : 03-5214-8404 E-mail : jstkoho@jst.go.jp

東京大学大学院工学系研究科 広報室

Tel : 03-5841-1790 E-mail : kouhou@pr.t.u-tokyo.ac.jp

東京工業大学 広報・社会連携本部 広報・地域連携部門

Tel : 03-5734-2975 E-mail : media@jim.titech.ac.jp