

# ワイル強磁性体の新しいスピン機能の開拓

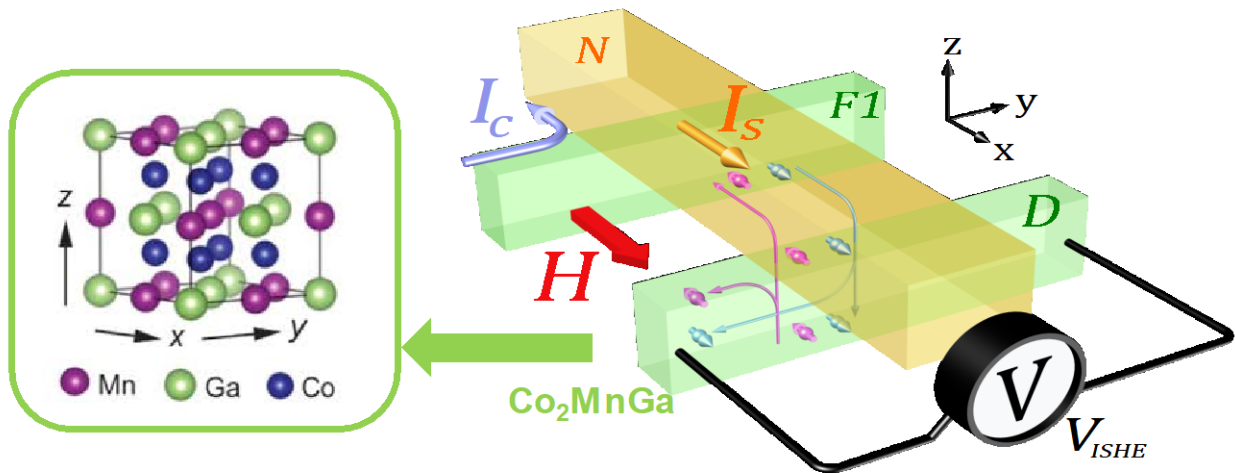
## ～ワイル強磁性体 $\text{Co}_2\text{MnGa}$ における巨大なスピン流＝電流変換効率を発見～

### 概要

京都大学大学院工学研究科電子工学専攻の Livio Leiva 博士課程学生、白石誠司 同教授らのグループは Victoria University of Wellington(ニュージーランド)の Simon Granville 博士らと共同で、近年極めて強い関心を持たれている 21 世紀の新しい物質相であるワイル強磁性体と呼ばれる物質において、電子スピンの流れであるスピン流と電流の間の巨大変換効率が発見できることを発見しました。

2016 年のノーベル物理学賞がトポロジカル物質科学の草分けというべき研究に与えられたことでもわかるように、21 世紀の物質科学におけるトポロジーの役割は巨大なものがあり、トポロジカル絶縁体・トポロジカル超伝導体・ワイル強磁性体など、物質の特徴を決定づける因子がその物質中の電子状態の捻じれに由来する物質群を対象とした研究が爆発的に盛んになっています。本研究では、そのような物質の 1 つで、磁石の機能を持つトポロジカル物質であるワイル強磁性体  $\text{Co}_2\text{MnGa}$  において、その電子状態の捻じれに由来する極めて高いスピン流＝電流変換が可能であることを発見しました。この変換効率は強磁性体では世界最高、現在知られているすべての物質と比べてもタングステン (W) に次ぐ 2 番めの高い効率です。

本成果は、2021 年 1 月 30 日に、米国物理学会学術誌である「Physical Review B」誌に、速報性の高い Letter 論文としてオンライン掲載されました。



本研究で用いたワイル強磁性体  $\text{Co}_2\text{MnGa}$  の構造と、本研究で作製した素子構造・測定原理。F1 電極からスピン流が測定電極 D (共に  $\text{Co}_2\text{MnGa}$  でできている) に流れ込み、スピン流が電流に変換されることで生じる電圧を計測している。H は外部磁場、 $I_s$  はスピンの流れ、 $I_c$  はスピンの流れを生むための電流、N はスピンを運ぶ材料 (本研究では銅(Cu))、 $V_{\text{ISHE}}$  はスピン変換によって生じる電圧を示す。

### 1. 背景

2016 年のノーベル物理学賞がトポロジカル物質科学の草分けというべき研究に与えられたことでもわかるように、21 世紀の物質科学におけるトポロジーの役割は巨大なものがあります。ここでいうトポロジーとは、例えば数学においては「ドーナツには穴が 1 つあるが、野球のボールには穴がなく、この 1 や 0 という穴の数＝不連続な指標は変形によって変化しない」という図形のもつ「不変な」指標に着目することです。物質科学

におけるトポロジ的な性質もまた、物質の状態が連続的に変化しても、その変化に影響されない「不変な」指標を与えてくれます。この観点から、近年では「トポロジカル絶縁体」「トポロジカル超伝導体」などが、世界的に熾烈な研究競争の対象となっています。その物質の電子状態の捻じれに由来する、トポロジカルに特徴的なスピン構造やエネルギー散逸のない情報伝播性を生かした超低消費エネルギー演算や、外場による擾乱に強い量子計算の実現が期待されるためです。「ワイル物質」はこういったトポロジカル物質の1種で、これも近年急速に注目を集める物質となっています。中でもワイル物質を始めとするトポロジカル物質の中では、エネルギー散逸のないスピン情報伝播が理論的に可能であるため、そのスピン情報を効率的に取り扱うための技術開発が焦眉の急となっていました。

## 2. 研究手法・成果

そこで私達の研究グループではワイル物質であり、かつ磁石の性質を持つワイル強磁性体に着目しました。ワイル強磁性体は、磁石の性質を持つがゆえにスピン情報を「出す」ことができるだけでなく、ワイル物質特有のトポロジカルな効果である電子状態の捻じれゆえに、スピン角運動量の流れであるスピン流を高効率に電流に変換することが予想されたためです。スピン流は電流と異なり保存される流れではないため、ある一定の距離で情報が消えてしまうこと、電流計などのように直接測定する手法がないことから別の物理量（今の場合は電流）に一度変換しないといけないこと、から高効率なスピン流=電流変換はトポロジカル物質のスピントロニクス応用に極めて重要です。ワイル強磁性体はスピン情報を「出す」と「観測する」ことの両方に用いることのできる有力な候補材料だ、という点に着目したわけです。

ワイル強磁性体としては一般に「ホイスラー合金」と呼ばれる金属合金が適していることがわかっていたため、共同研究先である Victoria University of Wellington（ニュージーランド）の Simon Granville 博士グループが準備した  $\text{Co}_2\text{MnGa}$  という合金を研究で用いるワイル強磁性体としました。この  $\text{Co}_2\text{MnGa}$  電極で作成したスピン流を銅 (Cu) ワイヤを介してもう1つの  $\text{Co}_2\text{MnGa}$  電極に注入したところ、強磁性体としては世界最高のスピン流=電流変換効率（-19%、符号は電流の流れる向きを表す）を示すことがわかりました。この効率は現在知られているすべての材料における変換効率と比較しても最高レベルにあり、 $\text{Co}_2\text{MnGa}$  に勝る変換効率を示しているのはタングステン(W)の-33%のみです。このような高い変換効率が実現した背景には  $\text{Co}_2\text{MnGa}$  というワイル物質が持つ電子状態の捻じれが生み出す物質内部の「有効磁場」と呼ばれる仮想的な磁場が寄与していると考えられます。

## 3. 波及効果、今後の予定

今後求められる研究成果としては、Wを超える変換効率を有するトポロジカル物質の開発です。また、今回の我々の発見によりワイル強磁性体はスピン流を効率的に生み出すと同時に効率的に計測することも可能であることが実証されました。この機能を生かしたオールワイル物質からなる超低消費エネルギー情報伝播・演算システムの創出が期待できます。

## 4. 研究プロジェクトについて

本研究を遂行するにあたり、科学研究費補助金・基盤研究 (S)「半導体ナノスピントロニクス」、同・新学術領域研究「ナノスピン変換科学」、同・若手研究(A)「半導体表面・界面におけるスピン輸送エンジニアリング」の支援を受けました。また L. Leiva 君は文部科学省・国費留学生制度の支援を受けています。ここに謝意を表します。

### <用語解説>

・ トポロジカル物質科学の草分けというべき研究に与えられた：D.J. Thouless (ワシントン大学)、F. D. M. Haldane (プリンストン大学)、J. M. Kosterlitz (ブラウン大学) の3教授に「トポロジカル相転移および物質のトポロジカル相の理論的発見」の業績による2016年のノーベル物理学賞が贈られました。

・ ワイル物質：相対論的な運動をする電子を記述する方程式において、特に質量をゼロとしたとき得られるフェルミ粒子[電子などのスピン1/2を持つ粒子]のことを特にワイル粒子と呼びますが、このワイル粒子が存在できる物質のことをいいます。1929年にドイツの理論物理学者ヘルマン・ワイルによって提唱された粒子がワイル粒子であり、ワイル物質中においては、異なるカイラリティをもつワイル粒子が対となって現れる点に特徴があります。

・ スピン：スピン角運動量とも言われ、電子の持つ電荷と並んで重要な内部自由度であり、磁石の持つ磁性の源でもあります。スピンはアップとダウンの2値を持つため、情報を担うことが可能です。

・ スピントロニクス：電子の持つスピン角運動量を情報担体として用いようとする研究分野の総称です。1980年代後半の巨大磁気抵抗効果の発見(2007年ノーベル物理学賞)によって創出された分野であり、これまでに磁気ヘッドや磁気メモリなど様々な素子に応用が広がっていると同時に、豊かで新しい基礎物性を内包する研究分野でもあります。

・ ホイスラー合金： $X_2YZ$  という組成を持つ合金を(フル)ホイスラー合金と言います。ここで、XとYは遷移金属、Zは半導体もしくは非磁性金属であり、今の場合はCoとMnという遷移金属と、Gaという半導体を用いた合金となっています。実はホイスラー合金はスピンのほぼアップ(ないしダウン)しかない、ハーフメタルという良い磁石を実現するための1つの理想的な材料であるとも認識されています。

### <研究者のコメント>

トポロジカル物質は、この分野の比較的草創期である2013年頃から我々の研究室でも取り組んでいる思い入れのある物質群です。特にワイル物質は、私(白石)が大学院時代に講義を受けた二宮正夫教授(現・京都大学名誉教授)がH.B. Nielsen教授(ニールス・ボーア研究所)と共に発見した極めて革新的な効果の現れる舞台であるために、ワイル物質群で何か面白くてインパクトのある効果を発見できないか、と注目していた物質でもありました。今回、ニュージーランドのS. Granville博士という素晴らしい共同研究者を得て、この驚くべき巨大効果を発見できたことをとても嬉しく思っています。今後も特に我々の得意とするスピントロニクス技術を切り口に広くトポロジカル物質におけるワクワクできる新しい効果の発見を目指して研究を進めていきます。

### <論文タイトルと著者>

タイトル Giant spin Hall angle in Heusler alloy  $\text{Co}_2\text{MnGa}$ , a Weyl ferromagnet

(ワイル強磁性体であるホイスラー合金  $\text{Co}_2\text{MnGa}$  における巨大スピホール角)

著者 L. Leiva<sup>1</sup>, S. Granville<sup>2,3</sup>, Y. Zhang<sup>2,3</sup>, S. Dushenko<sup>1,4,5</sup>, E. Shigematsu<sup>1</sup>, T. Shinjo<sup>1</sup>,

R. Ohshima <sup>1</sup>, Y. Ando <sup>1</sup>, and M. Shiraishi <sup>1</sup>

1. 京都大学大学院工学研究科、2. Robinson Research Institute, Victoria University of Wellington, NZ、3. The MacDiarmid Institute for Advanced Materials and Nanotechnology, NZ、4. Univ. Maryland, USA、5. NIST, USA.

掲 載 誌 Physical Review B (Letter)

D O I <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.103.L041114>