



スピンゆらぎによる整流効果を発見 -カイラル磁性体における新規機能性-

1. 発表者：

- 横内 智行（東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 博士課程3年
／理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関物性研究グループ 研修
生）
- 金澤 直也（東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 助教
／理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関物性研究グループ 客員
研究員）
- 吉川 明子（理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関物質研究チーム 技師）
- 森川 大輔（理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関量子構造研究チーム 特別研
究員（研究当時））
- 柴田 基洋（理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関量子構造研究チーム 基礎科
学特別研究員）
- 有馬 孝尚（理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関量子構造研究チーム チーム
リーダー
／東京大学大学院 新領域創成科学研究科 物質系専攻 教授）
- 田口康二郎（理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関物質研究チーム チームリー
ダー）
- 賀川 史敬（理化学研究所 創発物性科学研究センター 動的創発物性研究ユニット ユニッ
トリーダー）
- 十倉 好紀（理化学研究所 創発物性科学研究センター センター長
／東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授）

2. 発表のポイント：

- ◆カイラル磁性体（注1）における整流効果（ダイオード特性、注2）を世界で初めて観測した。
- ◆この整流効果の微視的起源がカイラルスピンゆらぎと呼ばれるカイラル磁性体に特有な熱的および量子的なスピンゆらぎ（注3）であることを解明した。
- ◆磁場や電流といった外場により整流特性の制御が可能なダイオード素子といった新たな機能性素子開発のための基礎原理、探索指針になることが期待される。

3. 発表概要：

電流の向きによって電流の流れやすさが変わる現象を整流効果と呼びます。従来この整流効果は半導体の接合素子（半導体ダイオード）で実現され、広く応用されています。一方、近年カイラルな結晶では整流効果が物質単体で生じることが明らかになってきました。しかしながら、これまでカイラルな結晶における整流効果の報告はいくつかの非磁性体に限られており、カイラルな結晶構造をもつ磁性体、カイラル磁性体における報告はありませんでした。

東京大学大学院工学系研究科の横内智行大学院生、理化学研究所創発物性科学研究センターの十倉好紀センター長らの研究グループは、カイラル磁性体において整流効果を世界で初めて

観測し、その微視的起源がカイラルスピンゆらぎと呼ばれるカイラル磁性体に特有な熱的および量子的なスピンゆらぎであることを明らかにしました。

磁性体における整流効果は、外場によってその特性の制御が可能な整流素子といったカイラル磁性体を用いた新規機能性素子実現へつなぐと期待されます。今回の磁性体における整流効果の発見とその微視的機構の解明は、そのような素子の実現に向けた、巨大応答、室温動作する物質探索への指針を与えると期待されます。

4. 発表内容：

① 研究の背景

ある構造がその鏡像と重ならない性質をカイラリティーと呼びます。このカイラリティーは科学の幅広い分野で非常に重要な概念となっており、分子構造や結晶構造、さらにはスピンの配列（スピン構造）においてみられます。特にカイラルな構造を持つ結晶、カイラル結晶では様々な新奇な物理現象が生じることが明らかになっています。その中の一つに整流効果があげられます。整流効果とは電流を流す向きにより抵抗（電気の流れやすさ）が異なる効果で、従来は半導体の接合素子（半導体ダイオード）で実現され、幅広く産業応用されています。近年この整流効果が、カイラル結晶では接合素子等を作成することなく物質単一で実現可能であることが明らかになってきました。

しかしながら、これまでカイラル結晶における整流効果の報告はいくつかの非磁性体に限られており、カイラルな結晶構造を持つ磁性体、すなわちカイラル磁性体における報告はありませんでした。特にカイラル磁性体では、ジャロシンスキー・守谷相互作用（注4）と呼ばれるスピンを傾けようとする相互作用により、らせん構造に代表されるカイラルなスピン構造が安定化することがあります。この様なスピン構造は磁場や電流といった外場によって制御が容易です。したがって、カイラルスピン構造由来の整流効果が実現すれば、外場によりスピン構造を制御することにより、整流効果の特性を変調することができる新規機能性素子の実現につながることを期待されます。

② 研究内容

本研究グループでは、カイラル磁性体である、*B20*型マンガンケイ素(MnSi)に着目しました。MnSiには右巻と左巻の結晶構造が存在します（図1a）。そして、ジャロシンスキー・守谷相互作用により結晶の巻き方に対応して、右巻または左巻のらせん構造というカイラルなスピン構造が低温で安定化します（図1b）。また温度を上げていくと熱ゆらぎによりこのらせん構造は不安定になり、スピンの時間的にゆらいだ状態である常磁性状態に相転移します。しかし、相転移点近傍ではこのゆらいでいる状態のスピンにも、右巻か左巻かという性質、すなわちカイラルな性質が残っていることが明らかになっています。この状態はカイラルスピンゆらぎと呼ばれ、ジャロシンスキー・守谷相互作用がその発見に重要な役割を果たす、カイラル磁性体特有のスピンゆらぎです。

このMnSiにおいて整流効果を温度・磁場を変化させ詳細に測定したところ、温度や磁場の値によって整流効果の整流特性の大きさが大きく変わり、特に相転移点近傍の常磁性状態、すなわちカイラルスピンゆらぎが存在する領域で、整流効果が最も増大することが明らかになりました（図2）。これは、カイラルスピンゆらぎにより、伝導電子が非対称に散乱されることによって整流効果が引き起こされていることを意味します。また、結晶の巻き方に依存してこの整流効果の極性が反転することが対称性の議論から要請されます（図1a）。そこで右巻結

晶と左巻結晶で整流効果の測定を行い、結晶の巻き方に依存して整流効果の極性が反転することを実証しました（図3）。

さらに、MnSiに圧力を加えると、量子力学的な起源をもつゆらぎである量子ゆらぎ（注3）の効果により低温でもらせん構造が不安定化し、partial order（部分的秩序）と呼ばれる、時間的にゆらいでいるトポロジカルスピン構造（注5）が発現することが提唱されています。本研究グループは圧力下においても整流効果を測定し、partial order相においても、常圧の常磁性相と同程度の大きさの整流効果を観測しました（図4）。このことは、partial order相における量子力学的起源をもつカイラルスピンゆらぎによっても整流効果が生じることを意味しています。

③ 今後の展望

本成果によりカイラル磁性体における整流効果が熱的および量子的なカイラルスピンゆらぎによって引き起こされることが明らかになりました。このことはカイラル磁性体での輸送現象の基礎学理を深化させることにつながると期待されます。さらにカイラルスピンゆらぎは磁場といった外場によって制御しやすいという特徴を持ちます。したがって、今回明らかになった微視的機構に基づいて巨大応答、室温動作する物質の探索を行うことにより、外場によってその特性の制御が容易な整流素子という、カイラル磁性体を用いた新規機能性素子実現へつながる可能性があります。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Nature Communications」（オンライン版の場合：10月11日）

論文タイトル：Electrical magnetochiral effect induced by chiral spin fluctuations

著者：T. Yokouchi *, N. Kanazawa, A. Kikkawa, D. Morikawa, K. Shibata, T. Arima, Y.

Taguchi, F. Kagawa, and Y. Tokura *

DOI 番号：10.1038/s41467-017-01094-2

6. 問い合わせ先：

（研究に関すること）

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻

大学院生 横内 智行（よこうち ともゆき）

東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 教授

理化学研究所創発物性科学研究センター センター長

十倉 好紀（とくら よしのり）

7. 用語解説：

（注1）カイラル磁性体

右手はその鏡像である左手と重ねることができない。このように、ある構造とその鏡像が重ね合わせられない性質をカイラリティーといい、カイラリティーを持つ結晶構造をした磁性体をカイラル磁性体と呼ぶ。

（注2）整流効果（ダイオード特性）

電流の向きによって抵抗（電流の流れにくさ）が異なる現象のこと。従来この整流効果は半導体の接合素子（半導体ダイオード）で実現され、幅広く産業応用されている。この効果は、空間反転対称性と時間反転対称性の両方が破れた結晶では、接合素子を作らなくても生じる。特にカイラルな結晶における整流効果は「電流磁気カイラル効果」と呼ばれる。

（注3）熱スピンゆらぎ、量子スピンゆらぎ

一般にスピンの向きは、時間ごとに違う方向を向いている。このとき、スピンの向きの時間平均値からのずれのことをスピンゆらぎと呼ぶ。特に、物質の熱エネルギーを起源に持つ揺らぎを熱スピンゆらぎ、量子力学的な起源をもつものを量子スピンゆらぎと呼ぶ。量子スピンゆらぎは、熱スピンゆらぎと異なり、絶対零度（0 ケルビン＝ -273.15 度）でも存在する。

（注4）ジャロシンスキー・守谷相互作用

相対論的な起源をもつスピンの間に働く相互作用で、隣り合うスピンの向きをお互いに直角になるようにしようとする。このジャロシンスキー・守谷相互作用と隣り合うスピンの向きをそろえようとする強磁性的な相互作用の競合により、らせん構造や磁気スキルミオンと呼ばれる渦状の磁気構造といった長周期な非共線的な磁気構造が安定化する。

（注5）トポロジカルスピン構造

スピンの向きを連続変形したときにスピンがそろった状態（強磁性）に変形できないスピン構造のこと。代表的な例として、磁気スキルミオンと呼ばれる、渦状のスピン構造があげられる。本研究の対象の一つである **partial order** は、連続変形によって磁気スキルミオンと同じ構造に変形できるような磁気構造であることが提唱されている。

8. 添付資料：

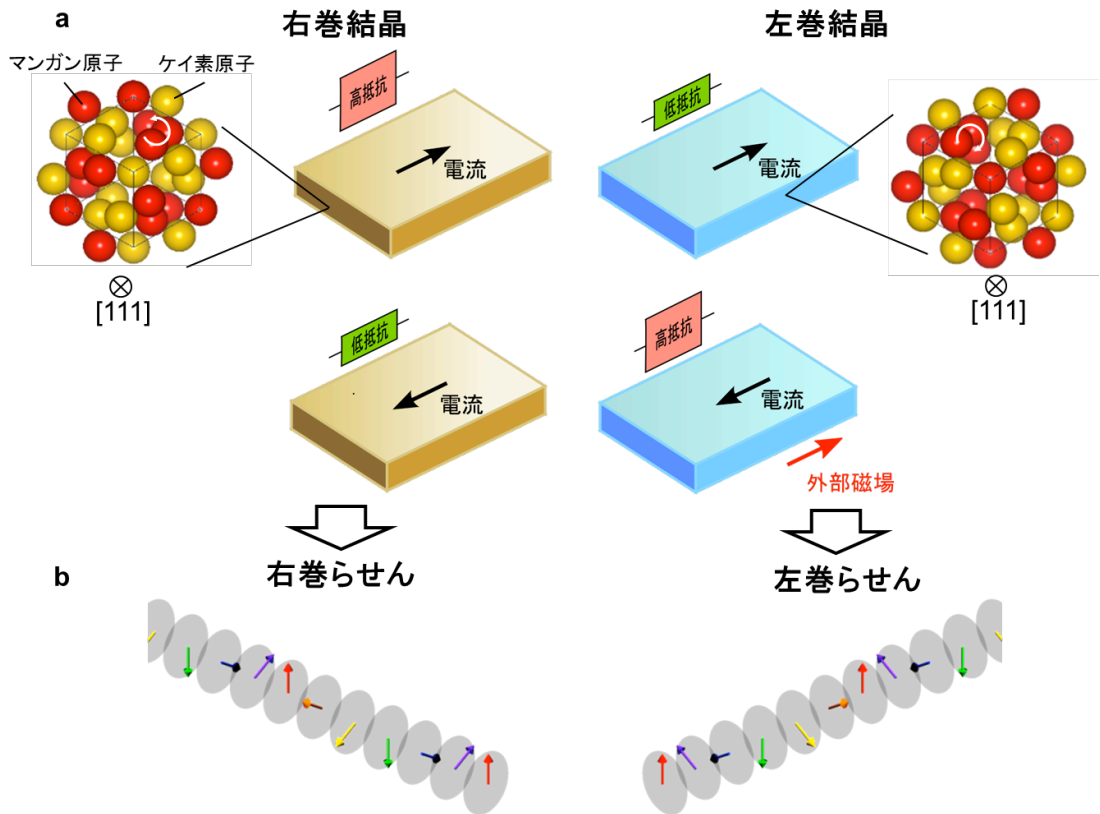


図1：(a) [111]方向から見た右巻と左巻のマンガンケイ素(MnSi)の結晶構造と、対応する整流効果の概念図。整流効果の極性(電流が流れやすい向き)は結晶の巻き方によって反転する。(b) 右巻と左巻らせん構造。結晶構造に対応してらせんの巻き方が逆になる。

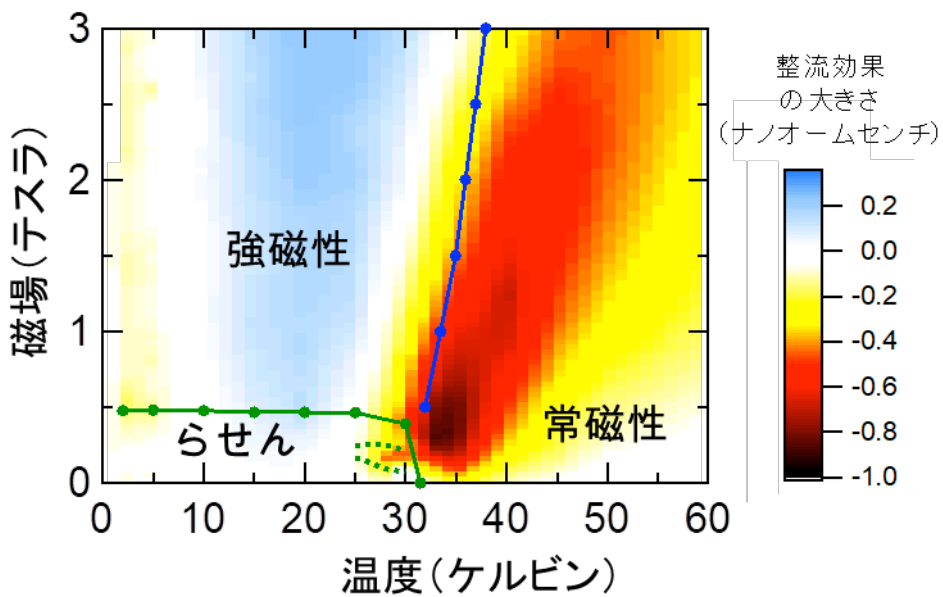


図2：整流効果とスピン構造の対応関係。赤い領域で大きな整流効果が観測される。

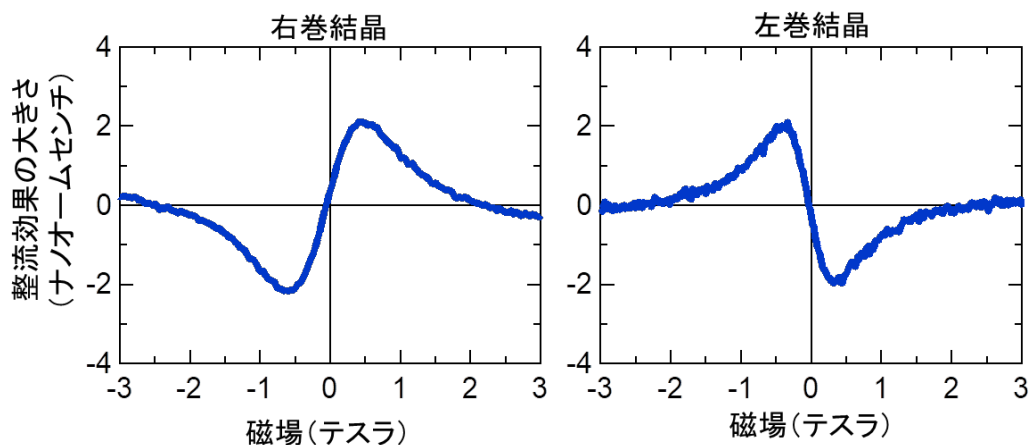


図 3 : 右巻と左巻結晶の整流効果の磁場依存性。整流効果の大きさの符号が極性に対応しており、結晶の巻き方に依存して極性が反転していることが分かる。

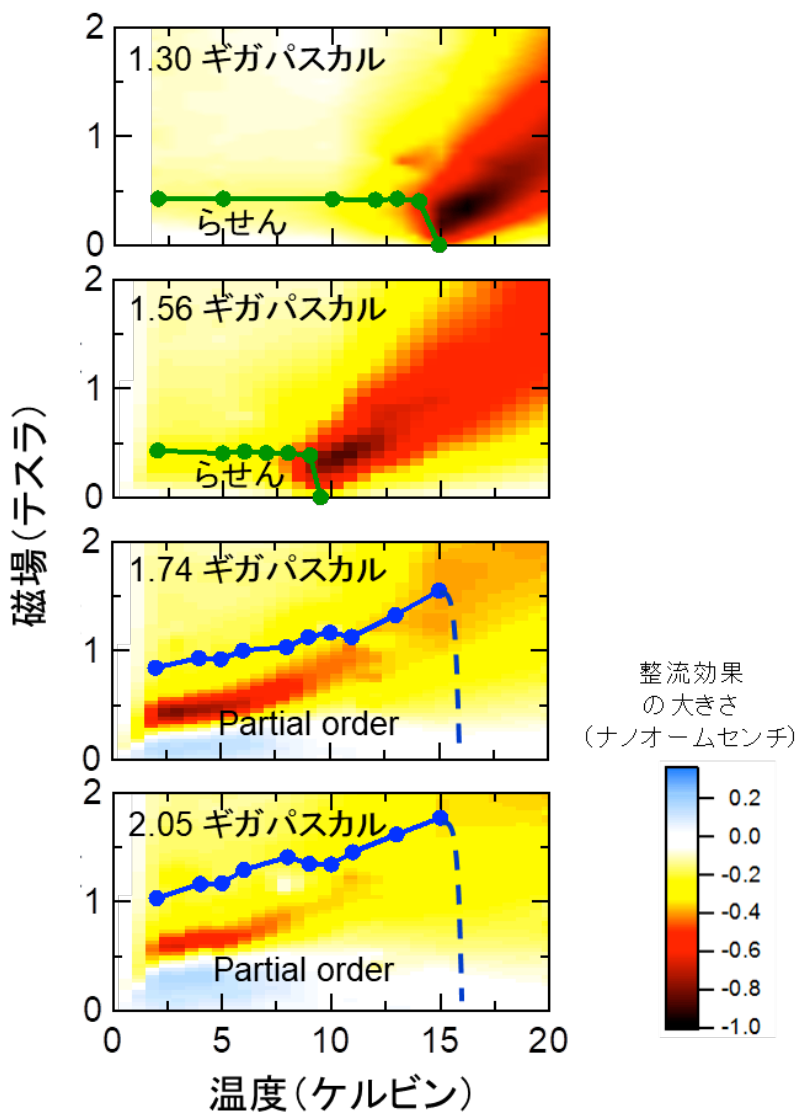


図 4 : 圧力下における整流効果の磁気相図との対応。赤い領域が大きな整流効果を示す。