

論文の内容の要旨

論文題目 空間反転対称性が破れた金属磁性体における電流磁気相関の研究

氏名 蔣 男

物質中で電子がどのような輸送特性を示すかは古くから興味を持たれている基本的な問題である。例えば、金属中では磁場によって磁気抵抗効果やホール効果が引き起こされ、強磁性体中では磁化によって異常ホール効果が引き起こされることが知られている。近年では、電子の電荷だけでなくスピンも活用したスピントロニクス分野が発展している。巨大磁気抵抗効果に代表されるように、この分野では電流と磁性体の局在モーメントとの結合を活用した研究を行ってきた。磁気構造に依存して抵抗が変わるのはもちろんのこと、電流によって磁気状態を制御することもなされている。スピントロニクス分野は初めは強磁性体に注目して研究が進められてきたが、最近では反強磁性体を扱った反強磁性体スピントロニクスが注目されている。反強磁性体におけるオーダーパラメーターであるネールベクトルを電流のみによって制御することにも成功している。このように強磁性体や反強磁性体を扱って発展してきたスピントロニクス分野であるが、近年の物性物理学においては空間反転対称性が破れた物質に注目が集まっており、空間反転対称性が破れた磁性体への拡張はあまり進んでいない。空間反転対称性が破れた物質を扱う分野として、マルチフェロイクス分野がある。マルチフェロイクス分野では、物質特有の対称性の破れを使用し、真空中のマクスウェル方程式からは決して導き出せないような電気磁気効果の研究が行われている。ここで電気磁気効果とは、静電場によって磁化を誘起したり、静磁場によって電気分極を誘起したりすることを指す。このような電気磁気効果は、真空中では実現できないが、結晶中で起こる自発的対称性の破れを利用することで実現可能である。こ

のような電気磁気効果が起こる物質においては、電場で磁性を制御したり、磁場で電気分極を制御したりするだけでなく、磁気構造を電場だけで制御することも可能である。さらに、電気磁気効果を周波数領域に拡張すると、光の方向二色性などが発生する。方向二色性とは、光の伝搬方向に依存して光学応答が異なる現象である。しかし、強誘電性から発生する電気分極に注目してきたマルチフェロイクス分野では、基本的に絶縁体を扱っており、金属はあまり扱われてこなかった。近年では、上記2分野の複合領域である、空間反転対称性が破れた遍歴磁性体に注目が集まっている。空間反転対称性が破れ磁性体中ではジャロシンスキー・守谷相互作用が働き、スキルミオン格子やカイラルソリトン格子など、実空間に特異なスピン配列を作る磁気相が現れる。その上、遍歴磁性体においては伝導電子と局在モーメントが交換相互作用によって互いに相互作用しているため、実空間のスピン構造が電気伝導に影響を及ぼす。スキルミオン相においては、スキルミオン格子の空間的な磁気構造に起因したベリー位相を伝導電子が獲得することで、トポロジカルホール効果と呼ばれるホール効果が観測されている。また、カイラルソリトン格子では、らせん軸に垂直に磁場をかけるとソリトン数を変えることができることがローレンツ電子顕微鏡で観測されており、そのソリトン密度を反映した振る舞いが抵抗の磁場依存性に現れているのが観測されている。また空間反転対称性が破れた系では、実空間のみならず、波数空間にも空間反転対称性が破れたことに起因する現象が現れる。具体的には、スピン軌道相互作用が働き、伝導電子バンドが波数方向にスピン分裂する。このように、空間反転対称性が破れた遍歴磁性体においては、伝導電子と局在モーメントが結合することによって、様々な新現象が発現することが期待される。

そこで本研究では、空間反転対称性の破れと伝導電子の両方を用いて、空間反転対称性が破れた遍歴磁性体における新たな電気磁気相関の研究を行った。具体的には、空間反転対称性が破れた遍歴磁性体 $\text{Cr}_{11}\text{Ge}_{19}$ 及び MnP に着目し、空間反転対称性が破れたことに起因する電流磁気相関の研究を行った。

まず、 $\text{Cr}_{11}\text{Ge}_{19}$ の単結晶の磁気輸送特性を測定し、 $\text{Cr}_{11}\text{Ge}_{19}$ における空間反転対称性の破れが輸送現象に与える影響の観測を目指した。 $\text{Cr}_{11}\text{Ge}_{19}$ は、結晶の空間反転対称性を破れている遍歴磁性体であるが、今まで十分大きな単結晶が作製されておらず、あまり研究されてこなかった物質である。この物質の単結晶を作製し、磁気輸送特性を測定することで、空間反転対称性の破れに起因する効果の観測を目指した。図1に得られた結果を示す。上から(a)磁場が容易軸(c軸)と平

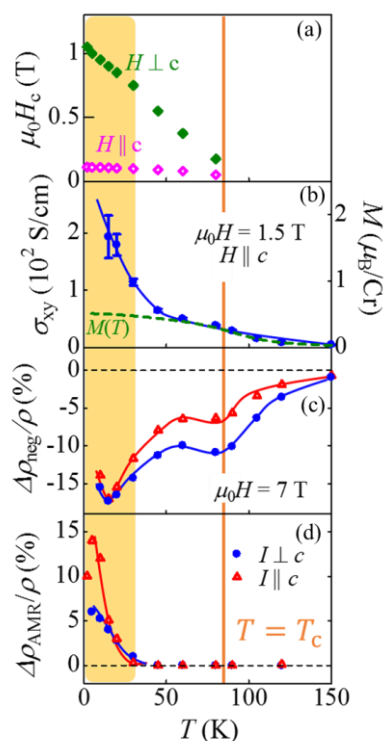


図1. $\text{Cr}_{11}\text{Ge}_{19}$ における磁化と輸送特性の結果

行または反平行のときの飽和磁場、(b) 1.5 T 付近のホール伝導度の平均と、 $H \parallel c$ での磁化、(c) 7 T における磁場が磁化容易軸 (c 軸) と平行または反平行のときの負の磁気抵抗効果、(d) 磁場が c 軸と平行または反平行のときの異方的磁気抵抗効果、の温度依存性を示す。飽和磁場や磁化の温度依存性からは 30 K 以下で異常は見られないのに対し、異常ホール伝導度、負の磁気抵抗、異方的磁気抵抗が大きく増大しているのが観測された。これらの結果は、 $\text{Cr}_{11}\text{Ge}_{19}$ が空間反転対称性の破れた結晶であることに起因する効果だと考えることができる。

次に、 MnP を用いて、対称性の破れ方であるらせんのヘリシティを電流によって制御することを試みた。 MnP は、結晶は空間反転対称であるが、らせん磁気構造に転移することで空間反転対称性を破る遍歴磁性体である。そのような磁性体中ではらせんのヘリシティが内部自由度として残るため、外場で制御することが可能であると考えられる。らせん磁性体のヘリシティを制御するために、今回はスピントランスファートルクを利用した。具体的にらせん磁性体中のスピントランスファートルクを考えると、電流と磁場を平行に印加するか反平行に印加するかでヘリシティの縮退を解くことができる (図 2)。ヘリシティを制御した後、ヘリシティを観測する手法として電流磁気カイラル効果を用いた。これは、第 2 次高調波抵抗として

観測することができ、ヘリシティが変わると電流磁気カイラル効果の符号も反転する。そのため、電流磁気カイラル効果の符号を観測することで、らせんのヘリシティが制御できているかを判別した。図 2 に、電流と磁場を平行または反平行に印加したときの、電流磁気カイラル効果の磁場依存性を示す。電流・磁場の符号に依存して電流磁気カイラル効果の符号が入れ替わっていることから、電流によってらせん磁性体のヘリシティが制御できたことを表している。

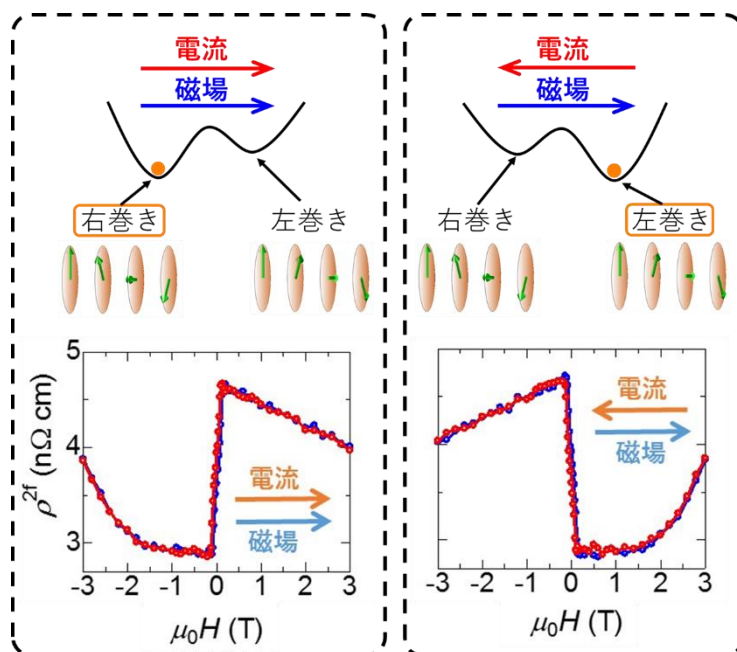


図 2. 電流・磁場下における自由エネルギーと、ヘリシティ制御に成功したデータ

最後に、 MnP を用いて磁気メモリー効果の観測とその起源解明を試みた。通常らせん磁性相から他の相に相転移するとヘリシティの情報はなくなるが、特定のマルチフェロイック物質では、非らせん磁性相においてもヘリシティの情報が保存されているという磁気

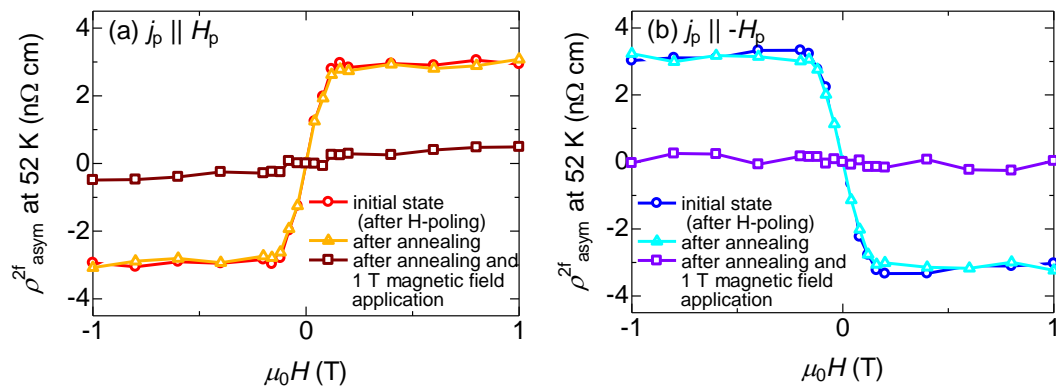


図3. 初期状態と、アニーリング後、アニーリングかつ磁場印加後の電流磁気カイラル効果の磁場依存性。

メモリー効果が観測されている。それを遍歴磁性体 MnP においても観測することを目指した。さらに、MnP の磁気抵抗効果を同時に測定し、磁気メモリー効果の起源解明を目指した。図3に、初期状態と、アニーリング後、アニーリングかつ磁場印加後の電流磁気カイラル効果の磁場依存性を示す。初期状態は、図2に示した方法で用意した。またここでアニーリング操作とは、磁場と電流を切って、温度を80 Kまで上昇させて強磁性相に転移させてから、再び30 Kまで冷やしてらせん相に転移させる操作のことをさす。アニーリング操作を行った後でも、初期状態と同じ符号・大きさの電流磁気カイラル効果が観測されていることから、磁気メモリー効果を観測することができたことがわかる。さらに、アニーリング操作の途中、80 Kにおいて磁化容易軸であるc軸に磁場を1 T印加した。その結果、図3に示すように電流磁気カイラル効果の信号が消滅した。これはヘリシティの情報が失われ、右巻きと左巻きが同じ割合で存在していることを示している。80 Kで印加する磁場の強さを変化させ、80 Kにおける磁気抵抗効果と比較したところ、磁気抵抗のヒステリシスがなくなる磁場でメモリー効果も消失した。この結果は、磁場によって強磁性相の磁壁が消失したのと同時にメモリー効果も消失していることを表している。先行研究において、強磁性相におけるブロッホ磁壁が観測されており、ブロッホ磁壁もヘリシティを持っていることから、強磁性相におけるブロッホ磁壁がMnPでの磁気メモリー効果の起源になっていることがわかった。

まとめると本研究では、空間反転対称性が破れた遍歴磁性体における電流磁気相関として、対称性の破れが負の磁気抵抗、ホール抵抗、異方的磁気抵抗、第2次高調波抵抗に与える影響を観測した。また、電流によって磁気構造の内部自由度を制御することにも成功した。さらに、その内部自由度が別の磁気相においても保存していることを発見し起源を解明した。この結果によって、対称性と輸送現象の物理の一般的理解に貢献しただけでなく、磁性体の内部自由度を電流によって制御する新たな手法を確立した。