

# 東邦大学学術リポジトリ

Toho University Academic Repository

タイトル	非一様磁化構造中におけるスピン流 電流生成に対する理論的研究
作成者（著者）	星, 幸治郎
公開者	東邦大学
発行日	2021.03.17
掲載情報	東邦大学大学院理学研究科 博士論文 内容の要旨及び審査結果の要旨.
資料種別	学位論文
内容記述	主査: 大江純一郎
著者版フラグ	none
報告番号	32661甲第1006号
学位記番号	甲第163号
学位授与年月日	2021.03.17
学位授与機関	東邦大学
メタデータのURL	<a href="https://mylibrary.toho u.ac.jp/webopac/TD28182547">https://mylibrary.toho u.ac.jp/webopac/TD28182547</a>

論文審査の要旨及び審査結果の要旨

2018年入学	研究分野 物性物理学	氏名 星 幸治郎
審査委員	(主査) 東邦大学 教授 (副査) 東邦大学 教授 (副査) 東邦大学 教授 (副査) 東邦大学 教授 (副査) 名古屋大学 教授	大江 純一郎 河原林 透 田嶋 尚也 赤星 大介 水口 将輝
(論文題目) 非一様磁化構造中におけるスピン流 - 電流生成に対する理論的研究		
(論文審査の要旨及び審査結果の要旨)  <p>従来のエレクトロニクス技術に加えて、電子のスピン自由度をデバイス内で積極的に利用するスピントロニクス分野の研究が、国内外で盛んに行われている。このスピントロニクス分野では、電荷の流れである電流に加えて、角運動量の流れをスピン流と呼び、新しい物理量としてその生成と制御の研究が行われている。また、伝導電子の担う電子スピン流の他に、磁性体中の磁化の集団励起もスピン波スピン流としてデバイス中で活用する。通常のスピン波励起の研究では、流れの無い定在波を取り扱う。一方で、空間勾配のある外場下では、スピン波が有限の速度を持ってサンプル内を伝わる。このようなスピン波スピン流を用いた物理現象として、スピンゼーベック効果が挙げられる。これは、強磁性体内に温度勾配を印加することでスピン波スピン流を励起し、非平衡分布にあるスピン状態を非金属端子の逆スピンホール効果によって電圧に変換するものである。この効果は、スピン波スピン流と熱の結合を示した画期的な効果であり、新しい熱電効果として注目を集めている。従来の磁性体中の熱電効果の理論的研究では、伝導電子の状態密度からゼーベック係数などを求めていた。しかしながら、上述のスピン波スピン流と伝導電子の散乱が存在すると、マグノドラック効果と呼ばれる熱電効果の増強効果が起こると考えられる。このようなマグノドラック効果に対する理論的研究はほとんどなく、特に定量的な議論のできる理論手法の確立が求められている。</p> <p>以上のような背景をふまえて、本論文では、磁化ダイナミクスが誘起する電流・スピン流の理論的研究を行った。特に、空間的に非一様な磁化構造を有するナノ磁性体中の電子スピンと磁化のダイナミクスに注目し、数値計算を用いて定量的な議論を行った。研究ではまず、磁化ダイナミクスと、スピン依存電気伝導を逐次的に解く数値的手法を確立した。これにより、任意の磁化構造と実際の磁化ダイナミクスから誘起される電流・スピン流の計算が可能になった。具体的には、磁化の運動を表す Landau-Lifshitz-Gibert 方程式を数値的に解</p>		

き、s-d 相互作用を考慮することで磁化の運動と伝導電子の運動の結合を実現した。磁化ダイナミクスから得られる電流は、断熱ポンピングと呼ばれる量子輸送現象の計算で用いられる Brower 公式を用いた。これらを逐次的に解くことに寄って、任意の磁化ダイナミクスから得られる電流・スピン流の計算ができる。本論文は、数値計算法の紹介と、それを用いた研究結果に分けて構成されている。研究結果ではまず、静的な磁化構造から得られるスピン流の研究が紹介されている。非一様な磁化構造として 1 次元螺旋磁化構造を用い、そこから誘起されるスピン流の計算を行った。数値計算の結果、螺旋構造の右巻き・左巻きに対応した非自明なスピン分極電流が得られること示した。次に、スピン波によるスピン流生成（スピンポンピング効果）の研究が紹介されている。数値計算と線形応答を用いた解析計算の結果、従来の一様磁化から得られるスピンポンピング効果に比べて、数倍の大きさのスピン流が容易に得られることが分かった。また、この電流の起源はスピン起電力に由来し、定量的に生成された電流を説明できることを示した。さらに、2 次元的な磁気渦構造（磁気スカーミオン）に温度勾配を印加した場合のマグノン・ドラッグ効果に対する研究を行った。計算の結果、磁気スカーミオンから誘起される熱ホール電流は、マグノンのホール効果と電子のホール効果両方に由来し、定量的にはマグノンのホール効果による電流が支配的であることが分かった。これらの研究に付随して、螺旋磁性体中の特殊な集団励起モードの存在を明らかにした。螺旋磁性体の螺旋軸に対して垂直に外部磁場を印加することで、ねじれた磁化構造がソリトンとして振る舞うことを見出し、さらにこのソリトン間には強磁性状態を介した斥力が働くことを明らかにした。この相互作用により、ソリトンの連成振動子モードが低周波数領域に出現することを示した。この結果は、螺旋磁性体中を用いた磁性熱電効果に対して、低温での効果が大きくなることを示している。

本研究では、空間的に非一様な磁化構造から誘起される電流・スピン流を解析する数値的手法を確立し、新規スピントロニクス素子開発のための基礎的な学理を構築したものとする。特に、磁性熱電効果に対して、従来熱電性能を数倍に向上させる効果を提案するなど、非常に有用な情報を含んでいる。星幸治郎はこうした数値計算を行うプログラムを独力で構築し、計算結果を得る一方で、物性物理学における基礎的な概念、特に磁性体やスピントロニクス分野について学び、幅広い見識を身につけている。研究によって得られた結果について、英文誌 3 報、国際学会 4 件、国内学会 13 件など積極的に外部発表を行っている。こうしたことから、全審査委員は、論文提出者の星幸治郎が博士の学位を受けるのに十分な学力と資格があると認めた。

# 論 文 要 旨

東邦大学大学院 理学研究科 物理学専攻 博士後期課程

物性理論教室 星 幸治郎 印

## 論文題目

非一様磁化構造中におけるスピン流 - 電流生成に対する理論的研究

## 論文要旨

電子デバイス中のスピン自由度を積極的に活用するスピントロニクス分野において、スピン流は新規スピントロニクス素子を実現するための重要な物理量である。近年、このスピン流の生成と制御に対する研究が盛んに行われている。特に、磁性体中の磁化構造をスピン流により制御することで、高速・高密度の新規磁気メモリの提案がされている。しかしながら、従来の研究では、磁壁などの単純な磁化構造が用いられていたため、高密度化や高度な制御ができなかった。また、複雑な磁化ダイナミクスと電子スピンダイナミクスを同時に扱うような理論的手法の確立も急務の課題である。

本研究では、非一様磁化構造から誘起されるスピン流・電流生成に対する理論的研究を行った。特に、ねじれた磁化構造を有するカイラル磁性体や、温度勾配下のスピン波から誘起されるスピン流に注目した。研究ではまず、磁化ダイナミクスと、スピン依存電気伝導を逐次的に解く数値的手法を確立した。これにより、任意の磁化構造と実際の磁化ダイナミクスから誘起される電流・スピン流の計算が可能になった。1次元螺旋磁化構造から誘起されるスピン流の計算では、螺旋構造の右巻き・左巻きに対応した非自明なスピン分極電流が得られること示した[1]。スピン波によるスピン流生成（スピンポンピング効果）の研究では、従来の一様磁化から得られるスピンポンピング効果に比べて、数倍の大きさのスピン流が容易に得られることが分かった。また、この電流の起源はスピン起電力に由来し、定量的に生成された電流を説明できることを示した[2]。さらに、2次元的な磁気渦構造（磁気スカーミオン）に温度勾配を印加した場合のマグノン・ドラッグ効果に対する研究を行った[3]。計算の結果、磁気スカーミオンから誘起される熱ホール電流は、マグノンのホール効果と電子のホール効果両方に由来し、定量的にはマグノンのホール効果による電流が支配的であることが分かった。また、これらの研究に付随して、螺旋磁性体中の特殊な集団励起モードの存在を明らかにした[4]。螺旋磁性体の螺旋軸に対して垂直に外部磁場を印加することで、ねじれた磁化構造がソリトンとして振る舞うことを見出し、さらにこのソリトン間には強磁性状態を介した斥力が働くことを明らかにした。この相互作用により、ソリトンの連成振動子モードが出現することを示した。これらの研究により、複雑な磁化ダイナミクスから誘起される電流・スピン流に対する理論的手法を確立し、新規スピントロニクス素子開発のための基礎的な学理を構築したものとする。

[1] H. Watanabe, K. Hoshi, and J. Ohe, Phys. Rev. B 94, 125143 (2016)

[2] K. Hoshi, H. Kohno and J. Ohe submitted to Phys. Rev. B (2020).

[3] K. Hoshi, T. Yamaguchi, A. Takeuchi, H. Kohno and J. Ohe, Appl. Phys. Lett. **117**,062404 (2020).

[4] K. Hoshi, J. Kishine and J. Ohe, Phys. Rev. B **102**, 134414 (2020).