

東邦大学審査学位論文(博士)の要旨

論文審査の要旨及び審査結果の要旨

平成 27 年入学	研究分野	物性物理学	氏名	嶋田 裕樹
審査委員	(主査)	東邦大学 准教授	大江 純一郎	
	(副査)	教授	河原林 透	
	(副査)	教授	西尾 豊	
	(副査)	教授	齊藤 敏明	
	(副査)	早稲田大学 教授	望月 維人	
(論文題目)				
ねじれた磁気秩序中に誘起される磁気-電気-熱交差現象に対する数値的研究				
(論文審査の要旨及び審査結果の要旨)				
<p>現代のコンピュータ技術に代表されるエレクトロニクス分野は、電子の持つ電荷の流れを制御することで発展してきた。しかしながら、従来のエレクトロニクスでは、量子力学から来るデバイスの微細化の限界などに伴い、性能の成長限界が指摘されている。これに対し、近年、電子の持つスピン自由度を積極的に利用する新しい研究分野が開拓され、スピントロニクス分野として盛んに研究が行われている。これまでに、強磁性体中に電流を流すことで磁化構造を変化させるスピントルク効果や、スピン軌道相互作用によって電圧と垂直方向にスピン流が流れるスピントルク効果などが報告されている。スピン流とは、アップスピンとダウンスピンの電子が反対方向に進む流れのことである。このスピントロニクスの舞台となるナノスケールの磁性体では、マクロな磁性体とは異なる磁化構造や磁化ダイナミクスが現れる。特に、空間的に非一様な磁化構造では、電気や磁気、さらには熱に対する交差応答が生じる。それらの交差応答現象のなかでも、スピン起電力と呼ばれる現象は、磁化ダイナミクスから電氣的な出力が可能のため、新しいスピン流電池を可能にする現象として注目されている。スピン起電力は、電子のスピン自由度に起源を持つ起電力であり、磁性体中の磁化と伝導電子スピン間の交換相互作用が本質的な役割を果たしている。具体的には、強磁性体中に誘起された磁化のダイナミクスによって、伝導電子がスピンに依存した力を受けて加速され、起電力が生じる。これまでに、ナノサイズの磁気渦を用いた実験でスピン起電力が観測されたが、その値は数十ナノボルトと小さく、また高度な微細加工が必要であったため、より大きな出力が期待できる系の探索が望まれていた。</p> <p>本研究では、ねじれた磁化構造を有する磁性金属において、磁化ダイナミクスから誘起されるスピン起電力の理論的研究を行った。特に、一次元系の磁壁の運動や、二次元系磁気スカーミオンと呼ばれる特殊な磁化構造のダイナミクスから得られるスピン起電力について、数値計算を用いた理論的研究を行った。</p>				

磁気スカーミオンとは、二次元磁性体中に発生する渦状の磁化構造のことで、渦度など量子化されたトポロジカル量を持つため、外場に対して非常に強固な性質を持つ。このため、新しい情報輸送ビットへの応用が期待され、研究が盛んに行われている。研究では、磁化のダイナミクスを表す非線形方程式から、この磁気スカーミオン構造を数値計算によって得ることに成功した。具体的には、4次のルンゲ・クッタ法を用いて磁化の運動を表すランダウ・リフシッツ・ギルバート方程式を解き、ランダムな磁化構造（高温極限）からエネルギー緩和を利用することで、スカーミオン構造を得た。また、面内方向の周期磁場によって、このスカーミオン構造の回転集団励起を誘起し、スカーミオンの運動と垂直方向にスピンの起電力が発生することを明らかにした。さらに、多数のスカーミオンが周期構造を取る「スカーミオン格子」と呼ばれる系では、個々のスカーミオンから得られるスピンの起電力が直列につながるカスケード効果が得られることを明らかにした。このカスケード効果によって、実験で得られるスピンの起電力の大きさが数十マイクロボルトにまで増幅され、微細加工を用いない実験でも十分観測可能であることを示した。一方、有限サイズの磁気ディスクに形成されるスカーミオンに対してもスピンの起電力の計算を行い、現実的なスピントロニクスデバイス作成の指針を与えた。具体的にはスカーミオン構造とディスク端に形成される磁化構造のカップリングの存在を明らかにし、バルク系とは異なる集団励起を見出した。このディスクから得られるスピンの起電力の計算を行い、低エネルギーでの集団励起では、バルク系と同様のカスケード効果が起こることを明らかにした。また、熱勾配によって駆動されるスピン波や、スカーミオンの運動に着目し、熱誘起スピンの起電力の提案を行った。その結果、熱勾配と垂直方向に起電力が発生し、新しいスピネルンスト効果を発見した。さらにスカーミオン上を通過する交換スピン波が横方向に曲げられるスピン波のホール効果が起こることを明らかにした。

本研究は、ねじれた磁化構造を有する磁性体中の磁化ダイナミクスから発生するスピンの起電力の理論的解析を行い、特に実験系への提案やデバイス応用に対する面で非常に有用な情報を含んでいる。嶋田裕樹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4報、国際学会6件、国内学会12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、論文提出者の嶋田裕樹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。

氏名 嶋田 裕樹 ㊦

論文題目

ねじれた磁気秩序中に誘起される磁気-電気-熱交差現象に対する数値的研究

論文要旨

電子スピンの情報をデバイス中で積極的に活用するスピントロニクス分野では、次世代スピン機能デバイス中の情報ビットとしてナノ磁化構造を用いる提案がある。近年では、パルス磁場などの外場を用いてねじれた磁化構造を記録／消去する試みがなされている。一方、ナノ磁化構造の読出しには、主に光学的手法が用いられている。しかしながら、磁化構造の光学的観測には、レーザー発振器や光センサーが必要になり、デバイスの集積化や省電力化には適さない。

本論文では、このナノ磁化構造、特にねじれた磁化構造を電氣的に読み出す手法について研究を行った。特に、磁性体内の磁化ダイナミクスから発生する「スピン起電力」と呼ばれる現象に着目し、磁気や熱勾配などの様々な外場から発生する電氣的応答について、数値計算を用いた解析を行った。本研究で扱ったねじれた磁化構造として、1次元的な空間構造を持つ磁壁や、2次元的な磁気渦構造がある。また、空間反転対称性が破れた結晶構造を持つカイラル磁性体では、静磁場中でスカーミオンと呼ばれるナノスケールの渦磁化構造が多数発現する。このときスカーミオンは三角格子を形成し、振動磁場によって回転モードが集団励起される。[1] このスカーミオン格子の集団励起に対して、スピン起電力の計算を行った。その結果、スカーミオン構造から決定されるトポロジカルチャージの運動に対して、垂直方向にスピン起電力が誘起されることを明らかにした。また、スカーミオン格子の集団励起では、個々のスカーミオンから誘起されるスピン起電力が直列に繋がり、系全体として非常に大きな交流電圧（マイクロボルト程度）を取り出せることを明らかにした。[2,3] また、磁気ディスク上に形成されるスカーミオン格子についても同様の計算を行い、集団励起によって大きな電圧を取り出すための実験的な条件を明らかにした。1次元磁壁の運動から誘起されるスピン起電力に対する計算では、低周波数帯域で、印加する交流磁場の周波数の増大と共に、得られる電圧が増大することを示した。[4]さらに、熱勾配から発生するスカーミオン上の磁化ダイナミクスとスピン起電力についても研究を行った。計算の結果、熱勾配からは(1)スカーミオン構造の平行移動、(2)スカーミオン上を流れる交換スピン波、の2種類の磁化ダイナミクスが誘起される事を明らかにした。それぞれの磁化ダイナミクスから、熱勾配と垂直方向にスピン起電力が発生することを明らかにし、(1)からは直流電圧、(2)からは交流電圧のシグナルが得られることを示した。[5] 以上の研究結果より、ねじれた磁化構造を電氣的に読み出す手法を確立し、今後のスピントロニクス分野の発展に大きく貢献したといえる。

[1] M. Mochizuki, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 017601 (2012).

[2] J. Ohe and Y. Shimada, *Appl. Phys. Lett.* **103**, 242403 (2013).

[3] Y. Shimada and J. Ohe, *Phys. Rev. B* **91**, 174437 (2015).

[4] Y. Shimada and J. Ohe, *JPS Conf. Proc.* **1**, 012018 (2014).

[5] Y. Shimada and J. Ohe, *in preparation*.