

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400308

研究課題名(和文)ディラック-ワイル電子系の磁性と伝導

研究課題名(英文) Magnetism and transport in Dirac-Weyl electron systems

## 研究代表者

野村 健太郎 (Nomura, Kentaro)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：00455776

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本計画研究ではトポロジカル絶縁体の表面におけるスピン電気変換やワイル半金属における磁気伝導現象、磁化ダイナミクス、スピントロニクス現象への応用に関する理論的研究を行なった。前半はトポロジカル絶縁体における新奇電磁応答の解析を行い、後半は磁性ワイル半金属におけるスピネクスタチャーの有効理論を構築、磁化ダイナミクス、異方的磁気伝導の理論解析を行なった。さらにトポロジカル超伝導体の表面に現れるマヨラナ粒子とその量子熱ホール効果に着目し、新奇なトポロジカル熱応答の解析を行なった。

研究成果の概要(英文)：In this project we studied spin-electricity conversion on the surface of topological insulators, magnetotransport, magnetization dynamics, and spintronics application in magnetic Weyl semimetals. In the first half we worked on novel electromagnetic responses on the surface of topological insulators, and in the second half we worked on a derivation of an effective field theory of magnetic Weyl semimetal with magnetic textures, magnetization dynamics, anisotropic magnetotransport. We also studied novel topological thermal responses in topological superconductors focusing on Majorana fermions and their quantized thermal Hall effect at the surface.

研究分野：物性理論

キーワード：トポロジカル物質 ディラック電子 磁気輸送現象 スピントロニクス

### 1. 研究開始当初の背景

金属をベースとするスピントロニクスデバイスには高いキュリー温度と安定な磁気構造を有し、スピン移行トルクやスピンポンピングなどのスピントロニクス現象の実現で成功を納めたが、高いジュール熱の発生をいかに低減するかが課題として残っている。一方、磁性半導体の分野では半導体独自の電流制御性と、強磁性秩序を用いたメモリー機能の両面を併せ持った次世代デバイスの候補として、高いキュリー温度を有する半導体強磁性相の探索が長年行われている。従来強磁性半導体である(In,Mn)Asや(Ga,Mn)Asでは、強磁性を発現するためには多量のキャリアドーピングが必要のため、その電気的性質は半導体というよりは金属的であり、半導体的な応用が難しい。散逸を最小に抑えたスピン磁化の電気的制御が基礎科学研究への要請である。

### 2. 研究の目的

近年注目を集めているワイル半金属状態や、我々のグループで考案されたカイラル型質量ギャップをもつアクシオン絶縁体の実現可能性を検証し、そこで予想される非自明な電磁応答の解析を行う。ワイル半金属状態が、実験的にも実現可能なナローギャップ半導体にMnやFe、Crなどの磁性不純物をドーピングした系で実現する事を提案し、実現条件を決める相図を温度とドーピング量に対し計算する。低エネルギー集団励起モードを計算し、スピン波スピン流の可能性と、電場とスピン励起の結合を明らかにする。カイラル型質量ギャップをもつアクシオン絶縁体がパイロクロア格子あるいはダイヤモンド格子上の反強磁性状態で実現する事を検証し、この状態の電磁応答を調べる。

### 3. 研究の方法

本研究は格子模型に基づく数値計算の方法と場の理論に基づく解析計算の方法を併用した。

局所磁気モーメントに対する有効理論を微視的に導出する方法として、局所磁気モーメントと結合するディラック電子のハミルトニアンをグラスマン汎関数積分形式の作用積分で表し、フェルミオン場の積分を実行する。ギンツブルグ・ランダウ理論を導く際には局所磁気モーメントで展開し、2次までの項をまとめる。一方、絶対零度近傍のスピンは有効理論を求める際にはスピン自由度をプリマコフ・ホルシュタイン形式で表し、ボゾン場の有効作用を導く。

スピントルクの計算の際にはディラック電子のスピン密度を線形応答理論とファインマンダイアグラムを用いて摂動展開を行う。

磁化ダイナミクスの解析にはランダウ・リフシッツ・ギルバート方程式に新奇トルク項

を入れ、ルンゲ=クッタ法により時間発展を求める。

### 4. 研究成果

本計画研究ではトポロジカル絶縁体の表面におけるスピン電気変換やワイル半金属における磁気伝導現象、磁化ダイナミクス、スピントロニクス現象への応用に関する理論的研究を行なった。前半はトポロジカル絶縁体における新奇電磁応答の解析を行い、後半は磁性ワイル半金属におけるスピントルクスチャーの有効理論を構築、磁化ダイナミクス、異方的磁気伝導の理論解析を行なった。さらにトポロジカル超伝導体の表面に現れるマヨラナ粒子とその量子熱ホール効果に着目し、新奇なトポロジカル熱応答の解析を行なった。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計18件)

1. N. Okuma and K. Nomura, “Microscopic derivation of magnon spin current in topological insulator/ferromagnet heterostructure”, Phys. Rev. B 95, 115403 - 1-8 (2017).

DOI:

<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.115403>

(査読有)

2. Y. Ominato, K. Kobayashi, and K. Nomura, “Anisotropic magnetotransport in Dirac-Weyl magnetic junctions”, Phys. Rev. B 95, 085308 - 1-6 (2017).

DOI:

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.95.085308>

(査読有)

3. T. Inoue, G. E. W. Bauer, and K. Nomura, “Spin pumping into two-dimensional electron systems”, Phys. Rev. B 94, 205428 - 1-7 (2016).

DOI:

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.94.205428>

(査読有)

4. D. Kurebayashi and K. Nomura, “Voltage-driven magnetization switching and spin pumping in Weyl semimetals”, Phys. Rev. Applied 6, 044013 - 1-6 (2016).

DOI:

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.6.044013>

(査読有)

5. Y. Araki, A. Yoshida, and K. Nomura,  
 “Universal charge and current on magnetic domain walls in Weyl semimetals”,  
 Phys. Rev. B 94, 115312 - 1-7 (2016).  
 DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.94.115312>  
 (査読有)
6. R. Nakai and K. Nomura,  
 “Crossed responses of spin and orbital magnetism in topological insulators”,  
 Phys. Rev. B 93, 214434 - 1-8 (2016).  
 DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.93.214434>  
 (査読有)
7. Y. Araki and K. Nomura,  
 “Spin textures and spin-wave excitations in doped Dirac-Weyl semimetals”,  
 Phys. Rev. B 93, 094438 - 1-12 (2016).  
 DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.93.094438>  
 (査読有)
8. R. Nakai, S. Ryu and K. Nomura,  
 “Finite-temperature effective boundary theory of the quantized thermal Hall effect”,  
 New J. Phys. 18, 023038 - 1-12 (2016).  
 DOI:<http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/18/2/023038>  
 (査読有)
9. A. Sekine and K. Nomura,  
 “Chiral Magnetic Effect and Anomalous Hall Effect in Antiferromagnetic Insulators with Spin-Orbit Coupling”,  
 Phys. Rev. Lett. 116, 096401 - 1-5 (2016).  
 DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.096401>  
 (査読有)
10. K. Nomura and D. Kurebayashi,  
 “Charge-Induced Spin Torque in Anomalous Hall Ferromagnets”,  
 Phys. Rev. Lett. 115, 127201 - 1-5 (2015).  
 DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.127201>  
 (査読有)
11. A. Sekine, K. Nomura  
 “Weyl semimetal with strong long-range Coulomb interactions”,  
 Journal of Physics: Conference Series 603 (1), 012017 - 1-7 (2015).  
 DOI:<http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/603/1/012017>  
 (査読有)
12. Y. Shimizu, A. Yamakage, K. Nomura  
 “Quantum thermal Hall effect of Majorana fermions on the surface of superconducting topological insulators”,  
 Phys. Rev. B 91, 195139 - 1-8 (2015).  
 DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.91.195139>  
 (査読有)
13. Y. Shiomi, K. Nomura, Y. Kajiwara, K. Eto, M. Novak, K. Segawa, Y. Ando, and E. Saitoh  
 “Spin-Electricity Conversion Induced by Spin Injection into Topological Insulators”,  
 Phys. Rev. Lett. 113, 196601 - 1-5 (2014).  
 DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.196601>  
 (査読有)
14. D. Baasanjav, O. A. Tretiakov, K. Nomura  
 “Magnetolectric effect in topological insulator films beyond the linear response regime”,  
 Phys. Rev. B 89, 045149 - 1-6 (2014).  
 DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.89.045149>  
 (査読有)
15. A. Sekine, K. Nomura  
 “Stability of Multinode Dirac Semimetals against Strong Long-Range Correlations”,  
 Phys. Rev. B 90, 075137 - 1-7 (2014).  
 DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.90.075137>  
 (査読有)
16. A. Sekine, K. Nomura  
 “Axionic Antiferromagnetic Insulator Phase in a Correlated and Spin-Orbit Coupled System”,  
 J. Phys. Soc. Jpn. 83 (2014) 104709 - 1-7.  
 (査読有)
17. A. Sekine, K. Nomura  
 “Weyl semimetal in the strong Coulomb Interaction Limit”,  
 J. Phys. Soc. Jpn. 83 (2014) 094710 -1-8.  
 (査読有)
18. D. Kurebayashi, K. Nomura  
 “Weyl semimetal phase in solid-solution narrow-gap semiconductors”,  
 J. Phys. Soc. Jpn. 83 (2014) 063709

-1-4.  
(査読有)

[学会発表](計 15 件)

1. 野村健太郎 “ワイル半金属におけるカイラル異常と磁気テクスチャの荷電効果”  
トポロジカル物質科学第2回領域会議  
2016/12/17 東北大学

2. K. Nomura, “Weyl Semimetals for Spintronics”

KINKEN-KIST joint seminar, Future electronic materials and devices beyond Si  
Oct. 24<sup>th</sup> 2016, Institute for Materials Research, Tohoku University, Japan

3. K. Nomura, “Spin-Electromagnetic Responses in Weyl semimetals”

International Symposium on Revolutionary Atomic-Layer Materials  
Oct. 21<sup>st</sup> 2016, WPI-AIMR

4. K. Nomura, “Spin-Electromagnetic Responses in Topological Matters”

Frontier of Quantum Material Science and Nano-Technology  
Sep. 5<sup>th</sup> 2016, Institute for Solid State Physics, the University of Tokyo

5. 野村健太郎 “トポロジカル物質における電磁結合”

熱場の量子論とその応用  
2016/8/22 理化学研究所

6. K. Nomura, “Recent development in Weyl semimetals”

Topological Science Kick-Off Symposium  
Mar. 14-15, 2016, Keio University

7. 野村健太郎 “トポロジカル物性と電子相関の協奏”

トポロジカル物性と計算物質科学が創出する新物質科学  
2016/3/8 東京大学物性研究所

8. 野村健太郎 “ディラック・ワイルフェルミオンのスピン電磁応答”

第6回集中連携研究会 人工量子系におけるトポロジ  
2016/2/9 東京大学

9. 野村健太郎 “ワイル半金属におけるカイラル量子異常と電荷磁化結合”

第9回物性科学領域横断研究会  
2015/11/13-15 東京大学

10. 野村健太郎 “トポロジカル絶縁体とワイル半金属”

トポロジカル物質科学 第5回トポロジ  
集中連携研究会

2015/11/6 東北大学 WPI-AIMR

11. K. Nomura, “Chiral anomaly and coupled charge-magnetization excitations in a Weyl semimetal” 10/8

International workshop: Mathematical Approach to Topological Phases in Spintronics

Oct. 5-9, 2015, Tohoku Forum for Creativity, Tohoku University

12. 野村健太郎 “ディラック電子系のスピン物性”

日本物理学会秋季大会 領域7, 4 シンポジウム

主題: グラフェン・二次元薄層物質スピン物性の新展開

関西大学 2015/9/16-19

13. K. Nomura, “Spintronics in topological materials”

9/7-11, 2015, Lorentz Center, Universiteit Leiden, the Netherlands

14. K. Nomura, “Coupled charge and magnetization in a Weyl semimetal” 6/12

New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics, Jun. 1-19, 2015, Kashiwa, Japan

15. K. Nomura, “Weyl semimetal phase in spin-orbit coupled semiconductor”

Novel Quantum States in Condensed Matter 2014, Nov. 4-Dec. 5, 2014, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Japan

[図書](計 1 件)

“トポロジカル絶縁体・超伝導体” 現代理論物理学シリーズ6 丸善出版 野村健太郎  
371 ページ 平成 28 年 12 月 20 日 発行

[産業財産権]

出願状況(計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:

種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野村 健太郎 (Kentaro Nomura)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：00455776

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：

(4) 研究協力者

( )