

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K13853

研究課題名(和文) スピンポンピング効果の流れ生成メカニズムのミニマムモデルに基づく解明

研究課題名(英文) Theoretical study of mechanism of spin pumping effect in a minimum model

研究代表者

多々良 源 (Tatara, Gen)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・チームリーダー

研究者番号：10271529

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：磁化ダイナミクスからスピン流を生成するスピンポンピング効果を、磁化の時間変化が生み出す有効ゲージ場の概念により明快に表した。この仕事により、時間変化する磁化が強磁性金属内の伝導電子に対してスピンを混合させる有効ゲージ場としてはたらく、これが強磁性非磁性金属界面において非断熱スピン分極を生じることがこの効果の起源であることがはっきり示された。従来の猫像は磁化の運動がスピン流を界面に生成するというものであるが、この記述ではスピン流の定義に伴う原理的不定性を避けられないという理論的に致命的な欠陥があった。我々の定式化では物理量であるスピン密度を通じて記述するためこの曖昧性は伴わない。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピンポンピング効果はスピン流の生成法として最近のスピン트로ニクス研究では欠かせない技術となっている。しかしながらその物理的なメカニズムに関しては本質的な点が曖昧なまま今日に至っていた。我々の研究により、スピン密度の誘起がこの効果の本質であることが有効ゲージ場という現代的視点から明快に示された。この定式化により微視的な物質特性に基づき効果を定量的に予言することが可能となり、これは今後の材料開発への大きな進歩でもある。

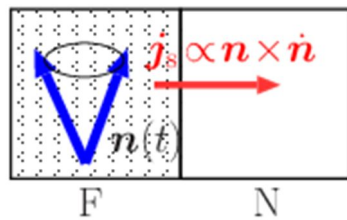
研究成果の概要(英文)：We carried out a consistent microscopic study of spin pumping effects in metallic ferromagnet. We presented a simple quantum mechanical picture of the effect as due to the electron spin flip as a result of a nonadiabatic (off-diagonal) spin gauge field, which generates spin density at the interface. Our theory is free from ambiguity present in the conventional spin current picture. We extended the work to include other spin current generation/detection effects, such as direct and inverse spin Hall effects and presented a unified spin transport theory.

研究分野：物性理論(物理)

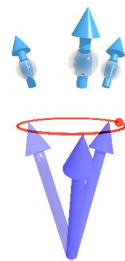
キーワード：スピンポンピング 断熱ポンピング スピン트로ニクス 非平衡統計物理 断熱過程

## 1. 研究開始当初の背景

スピンプンピング効果は強磁性体 F と非磁性金属 N の接合において磁化  $n(t)$  を歳差運動させることで非磁性体中にスピンの流れ(スピン流) $j_s$  を注入する効果である。この効果はスピン流の生成法として利点が多く最近のスピンロニクス研究では欠かせない技術となっている。この効果のメカニズムとしては Tserkovnyak らが 2002 年に提案したものと、界面に生じたスピン分極の拡散という Silsbee により 1979 年に指摘されたものがある。Tserkovnyak のメカニズムは Brouwer が 1998 年に行った電荷のパラメトリックポンピング現象の議論をスピンの流れに適用したもので、磁化の運動が流れを起こす時間変動パラメータの役割を担うとして生成されるスピン流はスピン混合コンダクタンス  $G$  とよばれる量を用いて表される。これまでスピンプンピング効果はマクロ系において研究が行われ、実験の解釈は  $G$  を現象論的パラメータとみなす Tserkovnyak 理論に沿って行われており、メカニズムの特定に踏み込んだ研究はされていない。例えば Tserkovnyak メカニズムと Silsbee のそれとは異なるのか、もし異なるのであるならどちらが主要な寄与となるのかなども明らかにされておらず、メカニズムの物理的な理解は不十分であった。



図：強磁性体 F と非磁性金属 N の接合系で、時間依存する磁化  $n(t)$  により界面を通じてスピン流  $j_s$  が N に注入されるのが、スピンプンピング効果である。従来の一般的な解釈ではスピン流が直接駆動されると考えられてきたが、この解釈ではスピン流の定義に伴う原理的な不定性が避けられず理論的に問題があった。今回の研究により流れを駆動しているのではなく、スピン密度が誘起され、それが流れを生んでいることがはっきり示された。このことは元々の Silsbee らの議論の正しさを示すものでもある。



図：伝導電子のスピン(上部の矢印)は磁化(下の矢印)の歳差運動につられて運動を起こす。この効果は電子スピンに対してはたらく有効ゲージ場により数学的には表される。このゲージ場は電子スピン密度を誘起する。

## 2. 研究の目的

本研究ではスピンプンピング効果を基礎物理の問題として正面から捉えなおす。まず現象のパラメトリックポンピングとしての側面を抽出するために、量子ドット系においてスピンプンピングを実現するミニマムモデルを提案しこれを解析的及び数値的手法など複合的に解析する。パラメトリックポンピングの観点で理解されているにも関わらず、スピンプンピングにおいては強磁性体内の伝導電子の位相がスピン流生成にどのような役割を果たしているのかなどの本質的な点が曖昧なまま残されている。位相を有効ゲージ場という一般的な概念から捉え直し、スピンの流れの駆動のメカニズムを物理的に明らかにする。また、量子ドットのミニマムモデルでは数学的に曖昧性のない解析が可能であることを生かし、メカニズムの完全な理解を実現しまたスピン流生成とスピン分極生成の関係も明らかにする。

## 3. 研究の方法

バルク系に対しての解析的手法でのアプローチでは、界面に局在する強い sd 型交換相互作用を考え、これにより時間変化する磁化がどのようなスピン分極を生み出すのか、そのスピン分極から生じる拡散スピン流がどうなるか、をスピン空間のユニタリ変換を用い、スピンに作用

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

する有効SU(2)ゲージ場の概念を用いて解析する。

非平衡物理的な観点からの数値的解析においては、ミニマムモデルに基づき磁化ダイナミクスから電極に流れ込むスピン流を厳密に計算し、また、どの程度のスピン分極が誘起されるか、また両者の相関を調べることから進める。パラメトリックポンピングの観点では、スピンの歳差運動という周期的運動がスピンの流れを生み出す要因とみなせ、生成されるスピン流と直接関係づけることができるはずである。このことを完全計数統計法により解析し、歳差運動がもつ時間的なスピン Berry 位相と、生成される 2 種のスピン流またスピン分極との関係を明らかにし、スピンポンピング効果のメカニズムを量子論的視点から理解する。

#### 4. 研究成果

磁化ダイナミクスからスピン流を生成するスピンポンピング効果を、磁化の時間変化が生み出す有効ゲージ場の概念により明快に表した。この仕事により、時間変化する磁化が強磁性金属内の伝導電子に対してスピンを混合させる有効ゲージ場としてはたらき、これが強磁性非磁性金属界面において非断熱スピン分極を生じることがこの効果の起源であることがはっきり示された。従来の猫像は磁化の運動がスピン流を界面に直接生成するというものであるが、この記述ではスピン流の定義に伴う原理的不定性を避けられないという理論的に致命的な欠陥があった。我々の定式化では物理量であるスピン密度を通じて記述するためこの曖昧性は伴わない。

ゆっくり変化する(断熱的)外部自由度がある場合には、注目している量子自由度に対して位相が付加されることが知られている。これは Berry 位相とよばれる一般的な概念で、物理のみならず化学や生物など広い分野の現象において本質的な役割を演じる重要なものである。この位相は有効ゲージ場から発生する有効磁場によるものと理解することができる。今のスピンポンピングの文脈では、断熱的自由度は強磁性体の磁化で、注目している自由度は金属の自由電子である。このときの有効ゲージ場は磁化の時間微分から生じるもので、電子スピン密度と結合する。このためスピンポンピングで誘起されるのは電子スピン密度であり、従来いわれていたようなスピン流ではない。スピン密度が誘起されることは実は初めてスピンポンピング効果が提案された Silsbee らの古い仕事(1979年)では指摘されていたが、スピントロニクスの発展の過程でスピン流が重要視される中で、スピン流生成現象として再提案され(2002年)それが一般的解釈となったという経緯がある。その中でスピン密度誘起からスピン流生成に置き換わったために物理的な解釈が曖昧になっていた。当初のスピン密度の議論は理論的な明瞭性に欠くものであったが、我々の仕事はその理解の正しさを有効ゲージ場という現代的視点に基づいた議論により明確に示したものである。

さらに、実験的状況を想定しスピンポンピング効果から逆スピンホール効果による検出までを統一的視点により記述する理論を提示した。「スピン流」媒体として反強磁性体を用いた場合にこの理論を応用し、従来のスピン流透過率が実は強磁性帯磁率にほかならないことを示し、温度依存性などの特性を理論的に解析し、実験事実と整合していることを示した。

また、スピンポンピング効果ではこれまでゆっくりした磁化の回転である断熱領域のみに焦点が当たっていたが、本研究では非断熱性が生み出す効果についての数値的解析も行った。速い運動に対しての効果量子性を取り込みつつ可能とする完全係数統計という手法を用いた計算の結果、非断熱性がスピンポンピング効果を抑制してゆくこと及びそのメカニズムが明らかになった。

平成 28 年度にはスピンポンピング効果を非平衡統計物理の広い視点から捉えるために、量子輸送問題、非平衡量子統計力学をテーマとした国際シンポジウムを、本研究の分担者と代表者が会議の組織委員長と副委員長となり開催した。参加者は様々な国から広い分野にわたる研究者 50 名以上を数え大変盛況で、量子非平衡系の一般論や、非マルコフ的な時間発展の一般論などの議論に進展があった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Fujimoto Junji, Tatara Gen	4. 巻 99
2. 論文標題 Nonlocal spin-charge conversion via Rashba spin-orbit interaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 054407 (1-17)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.054407">https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.054407</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tatara Gen	4. 巻 106
2. 論文標題 Effective gauge field theory of spintronics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures	6. 最初と最後の頁 208 ~ 238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="http://doi.org/10.1016/j.physe.2018.05.011">http://doi.org/10.1016/j.physe.2018.05.011</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Tatara Gen	4. 巻 98
2. 論文標題 Spin correlation function theory of spin-charge conversion effects	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174422 (1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.174422">https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.174422</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tatara Gen, Mizukami Shigemi	4. 巻 96
2. 論文標題 Consistent microscopic analysis of spin pumping effects	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.064423">https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.064423</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hashimoto Kazunari、Tatara Gen、Uchiyama Chikako	4. 巻 96
2. 論文標題 Nonadiabaticity in spin pumping under relaxation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.064439">https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.064439</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Gen Tatara	4. 巻 94
2. 論文標題 Green's function representation of spin pumping effect	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 224412 (1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.224412">https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.224412</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hashimoto Kazunari、Uchiyama Chikako	4. 巻 21
2. 論文標題 Nonadiabaticity in Quantum Pumping Phenomena under Relaxation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Entropy	6. 最初と最後の頁 842 ~ 842
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="http://dx.doi.org/10.3390/e21090842">http://dx.doi.org/10.3390/e21090842</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hashimoto Kazunari、Tatara Gen、Uchiyama Chikako	4. 巻 99
2. 論文標題 Spin backflow: A non-Markovian effect on spin pumping	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.205304">https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.205304</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 8件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Gen Tatara
2. 発表標題 Effective gauge field theory of spintronics
3. 学会等名 International Symposium on Magnetism and Magnetic Materials 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Gen Tatara
2. 発表標題 Spintronics without spin current
3. 学会等名 Collective Spin Dynamics in Nanostructures (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Gen Tatara
2. 発表標題 Effective gauge field theory of spintronics
3. 学会等名 The 13th International Summer School of Theoretical Physics "Symmetry and Structural Properties of Condensed Matter" (SSPCM) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Gen Tatara
2. 発表標題 Effective gauge field theory of spintronics
3. 学会等名 Sol-SkyMag International Conference, San Sebastian (Gipuzkoa) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Gen Tatara
2. 発表標題 Anomalous optical properties of Rashba conductor
3. 学会等名 SPIE Nanoscience + Engineering conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Gen Tatara
2. 発表標題 Green's function formulation of spin pumping
3. 学会等名 SPIE Nanoscience + Engineering conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Gen Tatara
2. 発表標題 Doppler shift picture of the Dzyaloshinskii-Moriya interaction and light propagation in systems with broken inversion symmetry
3. 学会等名 The European Conference PHYSICS OF MAGNETISM 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Gen Tatara
2. 発表標題 Electron transport and emergent spin electrodynamics in magnetization textures
3. 学会等名 The Twelfth International Summer School of Theoretical Physics "Symmetry and Structural Properties of Condensed Matter" (SSPCM) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 多々良源	4. 発行年 2019年
2. 出版社 内田老鶴圃	5. 総ページ数 232
3. 書名 スピントロニクス物理場の理論の立場から	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	内山 智香子  (Uchiyama Chikako)  (30221807)	山梨大学・総合研究部・教授   (13501)	
研究 分担者	橋本 一成  (Hashimoto Kazunari)  (10754591)	山梨大学・総合研究部・助教   (13501)	