

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：32612

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20356

研究課題名（和文）静的歪み構造を利用したスピン流生成機構の微視的解析

研究課題名（英文）Microscopic analysis of spin current generation in static strain structures

研究代表者

船戸 匠（Funato, Takumi）

慶應義塾大学・グローバルリサーチインスティテュート（矢上）・特任助教

研究者番号：10908700

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究はまず、動的な格子歪みによるスピン関連現象を解析した。特に、表面弾性波が印加された強磁性金属単膜中において、磁化運動が起電力へ変換される新たな機構を見出した。強磁性金属単膜という貴金属を必要としないシンプルなデバイス構造において実現するため、次世代の表面弾性波デバイスとしての応用が期待される。

次にその知見を基に、ナノチューブ系のスピン軌道相互作用に着目し、その曲率依存性について解析を行った。その結果、カーボンナノチューブにおける曲率依存するスピン軌道相互作用の再現と、シリコンナノチューブにおけるバレー依存したスピン分裂を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子の磁気的性質の流れであるスピン流は、電子デバイスの省エネルギー化や高機能化に革新をもたらすと期待されている。しかし、従来のスピン流生成は、電子スピンと電子の軌道運動が強く結合する貴金属が必須であった。本研究成果は、ナノチューブなど物質の格子（構造）の変形が電子スピンと軌道運動の結合を生み出すことを提供するものである。これはカーボンやシリコンなどの貴金属を必要としない新たなスピンデバイスへの可能性に繋がる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we theoretically study the spin-related phenomena through dynamical lattice deformation. Remarkably, we derived a mechanism for converting magnetization into electromotive force due to a surface acoustic wave in a single ferromagnetic layer. The present mechanism can be realized in a simple layer without both precious metals and complicated device structure. Our finding opens the door for innovative applications using surface acoustic waves. Based on these findings, we investigated the spin-orbit interaction induced by the curvature in nanotube systems. As a result, we successfully reproduced the curvature-dependent spin-orbit interaction in carbon nanotubes and discovered the valley-dependent spin splitting in silicon nanotubes.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピン流 格子歪み 表面弾性波 ナノチューブ スピン起電力 スピン・回転結合

1. 研究開始当初の背景

スピントロニクスは、電子の持つ電荷に加えてスピンという磁気的性質を利用した工学応用を目指す学術分野である。電子スピンの流れであるスピン流は、ジュール熱を伴わない省エネルギーデバイスの実現に向けて、盛んに研究されてきた。しかしながら、従来のスピン流生成法では、スピン軌道相互作用という電子スピンと軌道運動の結合が強い貴金属が必要であった。

近年、回転運動に伴う力学的な角運動量を利用したスピン流生成法が理論的に提案された(Matsuo et al. PRL 2011)。その後、物質表面を伝搬する音波の一種である表面弾性波を用いることで、格子の高速な局所回転運動からスピン流が生成されることが実験的に観測された(D. Kobayashi et al., PRL 2017)。この方法では、物体運動に伴う電子の渦運動から生じる有効磁場と電子スピンの結合であるスピン・渦度結合を利用している(図1参照)。この方法は、角運動量保存則という普遍的な効果に基づくため、従来のスピン軌道相互作用が不要となり、幅広い物質におけるスピン流生成が可能となる。

スピン軌道相互作用の弱い常磁性金属はスピン緩和が小さく、スピン流の長距離伝搬が可能であり、種類が豊富で安価かつ加工しやすいという優位性を持つ。このような物質を活用したスピン流生成の実現には、物質に依存しない普遍的な相互作用を介したスピン流生成手法の開拓が最重要課題となる。

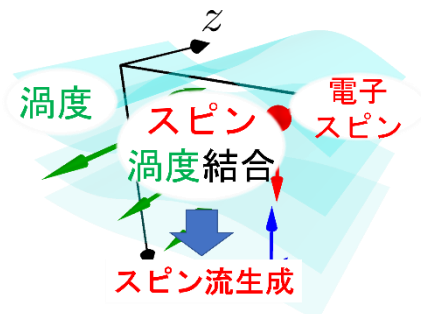


図1 スピン・渦度結合によるスピン流生成の概念図

2. 研究の目的

本研究の目的は、系の歪み構造を活用したスピン流生成機構について微視的な解析を行うことである。スピン・渦度結合はスピンと物体の回転運動に伴う有効磁場の結合である。電磁場とスピンの結合を鑑みれば、有効電場とスピン流の結合の存在も考えられる。これは、歪みにより誘起されるスピン軌道相互作用と理解することができる。本研究では、系の歪み構造に由来するスピン軌道相互作用に着目し、それを用いたスピン制御を目指した理論解析を行う。本研究が成功すれば、スピン軌道相互作用を必要とせずにスピン流生成が可能となるため、スピン軌道相互作用の弱い物質を活用したスピン流の長距離伝搬が実現し、メモリやセンサなどの技術革新が期待される(図2参照)。

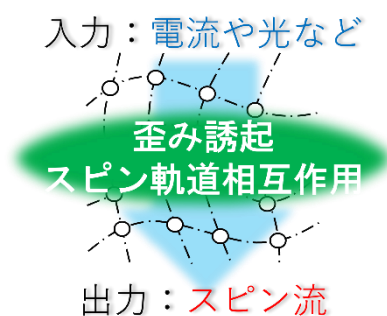


図2 歪み誘起スピン軌道相互作用によるスピン流生成

3. 研究の方法

本研究ではまず、これまでよく知られている動的な格子歪みを利用したスピン流生成メカニズムに着目し、物質固有の性質を組み合わせることで現れる新機能性の探索を行った。次に、それらの解析で得られた知見に基づいて、静的な歪み構造により誘起されるスピン軌道相互作用について解析を行った。

(1) 表面弾性波を用いた磁化運動のスピン依存起電力への変換

強磁性金属へ表面弾性波が印加されることで生じるスピン依存起電力の解析を行った。本研究では強磁性金属へ表面弾性波が印加されている状況を考え、表面弾性波に伴う歪みにより励起される磁化運動をランダウ・リフシッツ・ギルバート方程式という古典的な運動方程式を用いて解析した。一方で、伝導電子スピンの表面弾性波に伴う格子回転から受ける効果は、スピン・渦度結合により取り入れた。伝導電子スピンの磁化運動に断熱的に追従する仮定のもと、伝導電子が磁化から受ける起電力を計算した。得られた起電力を基に、磁化の方向と表面弾性波の伝搬方向が成す角度依存性を計算した。

(2) 超伝導体における表面弾性波を用いた準粒子スピン流生成

本研究では、表面弾性波により駆動される超伝導体中の準粒子スピンの解析を行った。モデルとして、電子間相互作用を平均場理論で取り扱ったBCSハミルトニアンを考えた。ここへ表面弾性波が印加される場合を考え、その効果をスピン・渦度結合によって考慮した。ボゴリューボフ変換を行うことで、超伝導体中の伝導を担う準粒子の運動を記述するハミルトニアンを導出す

る。この準粒子ハミルトニアンを基に、量子運動論を用いて渦度の線形範囲でスピン拡散方程式を導出し、超伝導体中に生じるスピン流を計算した。

(3) 液体金属の非定常流により駆動されるスピン流

液体金属の非定常流によって生じるスピン流について解析した。具体的には、二枚の平板で閉じ込められた液体金属を考え、片方の平板を振動させることで生じる振動流、片方の平板を突然動かして始めることで生じる過渡流の二種類の非定常流を考えた。ナビエ・ストークス方程式を用いて、振動流および過渡流によって生成される渦度を求めた。得られた渦度によるスピン・渦度結合を考慮したスピン拡散方程式を導出し、非定常流から生じるスピン流を解析した。

(4) 静的な歪み構造に誘起されるスピン軌道相互作用

静的な歪み構造が引き起こすスピン軌道相互作用の解析を行った。具体的な物質として原子が細長い円筒形に結合して構成されるナノチューブ物質を対象として、結晶構造の対称性に基づいて、歪み構造によって生じる曲率と電子スピンの相互作用を群論的な手法により求めた。その後より詳細な解析手法として、強束縛モデルから出発し、座標変換を用いて曲率が電子スピンへ与える効果を解析した。また、曲率電子とスピンとの相互作用の定量的な解析を行った。

4. 研究成果

(1) 表面弾性波を用いた磁化運動のスピン依存起電力への変換

本研究は、表面弾性波に伴う動的な格子歪みを利用することで、強磁性金属中の磁化運動がスピン依存する起電力へ変換される新しいメカニズムを発見した(図 3 参照)。強磁性金属への表面弾性波を注入すると、格子回転と格子歪みの 2 種類の格子変形が励起される。格子の回転変形は伝導電子スピンとスピン・渦度結合を通して結合する。一方で、格子の歪み変形は局在磁化と結合することで磁化運動を励起する。伝導電子スピンと磁化との交換相互作用によって、スピン・渦度結合と磁化運動が組み合わさることで起電力が生成される。この起電力は、表面弾性波の進行方向および深さ方向に、直流および交流の起電力が生じることが示された。また、表面弾性波の伝搬方向と外部磁場の印加方向に関する特徴的な非相反性を示すことがわかった。



図 3 表面弾性波(SAW)を用いた磁化運動のスピン依存起電力変換

この新しい起電力生成メカニズムは、強磁性金属単膜というシンプルなデバイス構造で実現することができるため、磁性金属への微細加工を伴わない点、また貴金属を必要としない点から、新しい表面弾性波デバイスへの応用が期待される。今後の展望としては、本メカニズムによる起電力生成の実証実験へ取り組むことで、デバイス応用への可能性を近づけていく。

(2) 超伝導体における表面弾性波を用いた準粒子スピン流生成

本研究は、磁性体を用いることなく超伝導体単膜中にスピン流生成する方法として、表面弾性波を用いた方法を提案した(図 4 参照)。従来の超伝導体におけるスピン流の生成方法では、電場や磁場を用いたスピン制御が困難であったため、磁性体からのスピン注入が不可欠であった(J. Linder and J. W. A. Robinson, Nat. Phys. 2015)。一方で、表面弾性波に伴う格子回転が持つ角運動量は、伝導電子のスピン角運動量とスピン・渦度結合によって結びつくことから、超伝導体中でもスピン流の生成が可能となる。本研究は、これまで困難であった超伝導体中のスピン輸送を可能とし、超伝導体を利用したスピントロニクス応用の幅を広げることに繋がる。

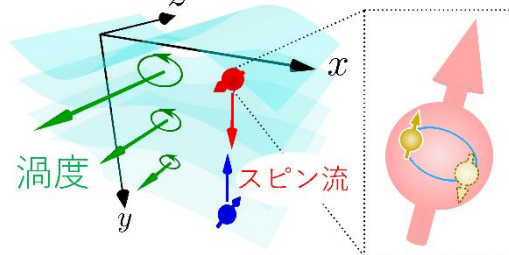


図 4 超伝導体におけるスピン流生成

(3) 液体金属の非定常流によるスピン流駆動

本研究は、液体金属の非定常流からスピン流が生成されること、また非定常流を特徴づける時間および空間スケールがスピン流生成において重要であることを明らかにした(図 5 参照)。これまで液体金属の定常流を用いたスピン流生成は実証されているものの(R. Takahashi et al, Nat. Phys. 2016)、非定常流に着目した研究は行われてこなかった。本研究は、液体金属の非定常流を用いたスピン流生成に着目した初めての研究であり、流体を用いたスピントロニクス応用の範囲の拡大に貢献する。

本研究の解析から、液体金属の振動流から振動的なスピンの生成されること、過渡流から過渡的なスピンの生成が生じることがわかった。これらのスピンの生成は、振動流の境界層の長さスケール、また過渡流から定常流れへの減衰時間という流体の特徴的なスケールによって制御されることが示された。また、本研究の定量的な解析から、非定常流に駆動されるスピンの生成から観測可能な大きさの電圧が誘起されることが示された。本成果は、非定常流を用いた流体スピンの実装を可能にし、流体スピンの発展に貢献することが期待される。

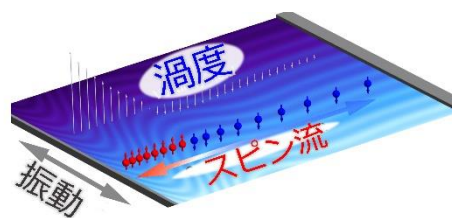


図 5 振動流によるスピンの生成

(4) 静的な歪み構造に誘起されるスピンの軌道相互作用

本研究は、物質の静的な歪み構造に伴う曲率によって、スピンの軌道相互作用の制御が可能であることを明らかにした。本研究は当初、静的な歪みとスピンの結合によるスピンの生成機構の解析を目的としていた。しかし、この機構は特殊な物質でなければ現れないことがわかった。そこで、本研究では手法を変えてナノチューブ系に焦点を合わせ、系の対称性の基づく群論を用いた手法と強束縛モデルから格子変形を座標変換によって取り入れる手法の 2 つを用いた解析を行った。

ナノチューブは、カーボンナノチューブなどが既に実用化されており、さらにシリコンや二次元物質のナノチューブの合成も実現されている。まず、カーボンナノチューブにおいて曲率に依存したスピンの軌道相互作用について解析を行い、先行研究で知られている対称性および大きさの再現に成功した。次に、解析範囲をシリコンナノチューブに広げることで、曲率によるバレー依存したスピンの分裂が発現し、さらにそれを曲率によって制御できることを発見した。

本研究の成果は、曲率を用いたスピンの軌道相互作用の制御方法を提供し、歪み構造を与えることでこれまで注目されてこなかったスピンの軌道相互作用の弱い軽元素を利用したスピンの実装に繋がると期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Funato Takumi, Matsuo Mamoru	4. 巻 572
2. 論文標題 Spin hydrodynamic generation in unsteady flows	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 170574 ~ 170574
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2023.170574	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 Funato Takumi, Yamakage Ai, Matsuo Mamoru	4. 巻 106
2. 論文標題 Acoustic spin transport by superconducting quasiparticles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214420-214420
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.214420	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 Kikuchi Risako, Funato Takumi, Yamakage Ai	4. 巻 106
2. 論文標題 Quantum transport of a spin-1 chiral fermion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235204-235204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.235204	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 Funato Takumi, Kato Takeo, Matsuo Mamoru	4. 巻 106
2. 論文標題 Spin pumping into anisotropic Dirac electrons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 144418-144418
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.144418	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 Funato Takumi、Matsuo Mamoru	4. 巻 128
2. 論文標題 Spin Elastodynamic Motive Force	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 07720-1 ~ -5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.128.077201	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7件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Takumi Funato and Mamoru Matsuo
2. 発表標題 Theory of Spin Elastodynamic Motive Force
3. 学会等名 ICMFS2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 船戸匠, 松尾衛
2. 発表標題 表面弾性波を用いたヘリシティ流とスピン起電力
3. 学会等名 カイラル物質科学の新展開 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 船戸匠, 加藤武生, 松尾衛
2. 発表標題 ビスマスへの異方的スピンポンピング
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takumi Funato and Mamoru Matsuo
2. 発表標題 Spin elastodynamic motive force
3. 学会等名 AFM2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 船戸匠, 山影相, 松尾衛
2. 発表標題 s波超伝導体における表面弾性波を用いたスピン流生成
3. 学会等名 日本物理学会 年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 船戸匠, 松尾衛
2. 発表標題 磁化・渦度・伝導電子スピンの交差応答を用いたスピン流生成理論
3. 学会等名 Spin-RNJ Symposium 2022 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 船戸匠, 松尾衛
2. 発表標題 表面弾性波によるスピン起電力
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

慶應義塾大学理工学部能崎研究室ホームページ
<http://www.phys.keio.ac.jp/guidance/labs/nozaki/>
慶應義塾大学・中国科学院大学共同プレスリリース
<https://www.keio.ac.jp/ja/press-releases/2022/2/21/28-104329/>

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
研究協力者	松尾 衛 (Matsuo Mamoru)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
中国	中国科学院大学			