

令和 4 年 5 月 13 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02929

研究課題名(和文)有効ゲージ場に基づく物質中の電気磁気光学相関現象の包括理論

研究課題名(英文) Unified theory of electromagnetic and optical cross correlation phenomena in solids

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) 14,900,000円

研究成果の概要(和文)：多岐にわたるスピントロニクス現象に対して、有効ゲージ場の観点で統一的な理論体系を提示し明快な物理的理解を与えた。磁化構造がゆっくり変動した極限では磁化構造から現れる有効ゲージ場は通常の電磁気学と全く同じ数学的構造をもち、スピンの輸送現象は電磁気と全く同等の記述に収まる。この中には電流によって発生するスピン移行トルク、磁化から発生するスピン起電力などがあり、磁気モノポールも現れる。一方非断熱ゲージ場の効果としてはスピン流生成に用いられるスピンポンピング効果、磁性体の反対称相互作用などがある。スピン有効電磁場は電荷や光などの自由度にも結合し方向依存した光伝搬などの特異な挙動も明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来スピントロニクス現象は現象ごとに異なった理論が用いられ各論的に理解されていたが、本研究により多岐にわたる現象を有効ゲージ場の働きという統一的視点から整理することができ、明快な物理的解釈と理論体系を提示することができた。これによりスピントロニクス現象の背後にある学理とその美しさがあぶりだされ、現代的視点から基礎物理としての発展が実現された。一方で現象の明快な解釈はデバイス応用や高性能化への道筋を考え実験的に実現する上でも重要な指針となると期待される。

研究成果の概要(英文)：A comprehensive theory of spintronics phenomena was presented based on the concept of effective gauge field. An effective gauge field generally arises when we change a basis to describe system and describes low energy properties of the system. In the case of ferromagnetic metals, it arises from structures of localized spin (magnetization) and couples to spin current of conduction electron. The spin gauge field has adiabatic and nonadiabatic (off-diagonal) components, consisting an SU(2) gauge field. The adiabatic component gives rise to spin Berry's phase, topological Hall effect and spin motive force, while nonadiabatic components are essential for spin-transfer torque and spin pumping effects by inducing nonequilibrium spin accumulation. Effects of photons and heat are discussed within the effective gauge theory.

研究分野：物性理論

キーワード：スピントロニクス 有効ゲージ場

1. 研究開始当初の背景

スピン流とそれに結合するスピングージ場は多岐にわたるスピントロニクス現象において本質的な役割を担っていることが分ってきている。物質中の多種の流れを一般的視点から捉えるのにゲージ場は非常に適した概念であり、これに基づけばスピントロニクス現象を統一的に、またエレクトロニクスを支配している電磁気学と似た枠組みにより記述する理論体系が構築できると期待される。

2. 研究の目的

本研究ではスピントロニクス現象を基本に、磁性、電気伝導、熱及び光学効果にわたる物質特性を流れとそれを生み出す有効ゲージ場という概念で統一的視点から整理し、異なった自由度間の変換(交差相関)現象の開拓、有効ゲージ場を通じた特性制御の可能性、またそれによる新規物質特性の探索を行う。従来異なった研究分野ごとにそれぞれの狭い視点で発展してきた概念を、微視的理論の立場から応答(相関)関数の視点で現象を整理、統一的に記述することを目指す。

3. 研究の方法

物質の持つ応答特性を有効ゲージ場に対する線形応答として理論的に整理、解析する。具体的にはまず有効ゲージ場の拡散領域への拡張、スピン軌道相互作用と磁性が生み出す新規電磁気応答、及び熱輸送現象の解析を行う。これらの現象の詳細を理解した上で、期間の後半では統一的概念の創生を目指した広い視点からの整理と発展を行う。

4. 研究成果

多岐にわたるスピントロニクス現象に対して、有効ゲージ場の観点で統一的な理論体系を提示し明快な物理的理解を与えた。磁化構造がゆっくり変動した断熱極限では磁化構造から現れる電子に対してはたらく有効ゲージ場は通常の電磁気学と全く同じ数学的構造をもち、したがってスピンの輸送現象は電磁気と全く同等の記述に収まる。この中には電流によって発生するスピン移行トルク、磁化から発生するスピン起電力などの効果があり、それらを統合的に記述する有効的電磁気学には磁気モノポールも現れる。一方非断熱効果として現れる現象としてはスピン流生成に用いられるスピンポンピング効果、磁性体の反対称相互作用である Dyaloinski-Moriya 相互作用などがある。このスピンに対する有効電磁場は電荷や光などのほかの自由度にも結合し方向依存した光伝搬などの特異な光学特性が現れることも明らかにした。

主要成果の詳細は以下のとおりである。

(1) スピン流を用いないスピントロニクス理論

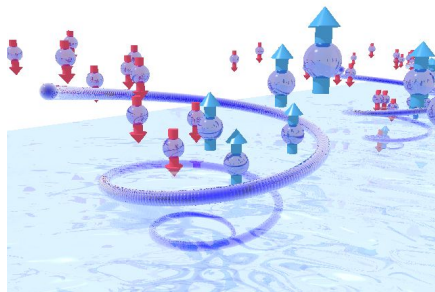
スピントロニクス現象はスピン流の概念を用いて発展してきた。が、スピン流は保存流ではないために現象の現象論的解釈には原理的な不定性が存在する。さらに非保存性によりスピン流は測定可能量ではなく、スピン密度や電流などの物理量により間接的にアクセスする他ない。我々は駆動場と測定場の2つの物理量を線形応答理論で直接結びつける定式化を行い、自然で明快な理論記述を提示した。この研究はスピンポンピング効果によるスピン流生成をスピンへの有効ゲージ場の非断熱成分により定式化した仕事を発展させる中で見出した当初予期していなかった新しい方向性である。

スピンホール効果などスピン軌道相互作用によるスピン電荷変換現象は、従来はスピン流と電流の相関関数で理解されてきたが、この場合測定量であるスピン密度を求めるには拡散方程式などの古典的議論を経る必要があった。我々は、スピン密度と電流の相関関数を用いれば、1つの線形応答公式により現象を明快に記述できることを示した。

従来の記述でのスピン流伝導率に相当するものは、スピンゆらぎによる強磁性帯磁率である。つまりスピン流透過の観測は、波数分解(空間依存した)帯磁率を電氣的測定により検出しているということが出来る。この理解では強磁性体から反強磁性絶縁体にスピン流が「流れる」のは極自然である。

こうした解析の結果、スピンホール効果は電場や電流の渦がスピンを直接誘起する効果(スピン-渦結合)が起源であることが明らかになった。一方向にかけた電場が角運動量であるスピンを生み出すためには渦度を持たねばならないからこのことは自然である。式で表すと電場 E により誘起されるスピン s は $s = \lambda(\nabla \times E)$ と表され電場の渦度 $(\nabla \times E)$ に比例して現れる。 λ はスピンホール係数あるいはスピン-渦結合定数とよぶ定数でスピン軌道相互作用などから生じる。1999年のHirshの理論以後、スピンホール効果においては電場がスピン流を生む効果が本質と

捉えられてきたが、上に述べたようにこの解釈では原理的な曖昧性を排除できない。一方本研究で得られた、スピン軌道相互作用により電場の渦がスピンと結合するために生じる効果だという解釈は物理的に明快で、これは概念的に重要な結果である。



図：電流の渦がスピン(赤青の矢印)を生成するスピン-渦結合効果の概念図。これがスピントロニクス効果の本質である。

スピントロニクスはすでに定量的予言と解釈が不可欠な段階であり、スピン流と現象論パラメータによる感覚的理論では不十分である。スピンと電流の相関関数などの直接的応答量に基づく曖昧性のない記述は今後不可欠であると期待される。

渦がスピントロニクス効果の本質であるという本研究により得られた知見は、物質中の電子を量子流体と捉え流体記述に基づく理論を構築することの重要性を示唆している。この方向性は2021年度以降の科研費にて開拓を進めている。

(2) 反強磁性体中のスピン輸送の帯磁率理論

反強磁性絶縁体中のスピン流透過現象の線形応答理論を提示した。スピン流透過と従来見なされている現象を電気的に誘起されたスピン蓄積の伝搬と見ることによってスピン流に伴う曖昧性なく現象を記述する定式化を行った。スピン流伝導度は強磁性帯磁率で与えられ、これをマグノン表示により計算し、実験事実と整合する結果を得た。この帯磁率理論では、スピン流の定義の不確定性という従来のスピン流理論のもつ原理的な問題を回避され、曖昧性のない予言が可能である。

(3) 磁壁によるスピン波放出の理論

磁性体中の磁壁は幾何学的に守られた構造で安定した伝搬特性をもつが、それでも運動に際してはゆらぎをスピン波として放出することによる減衰が生じる。磁壁の運動によるスピン波放出を強磁性と反強磁性の場合に理論的に解析した。運動する磁壁は有効ゲージ場で表されるためこの効果は有効ゲージ場によるスピン波放出という意味を持つ。

強磁性磁壁の場合は厚さの振動が強いスピン波放出を起こすことがわかった。この効果は強いオーミック型の散逸を引き起こし、これが磁壁の運動による散逸の主要因と思われる。

反強磁性体の場合は系がローレンツ不変性を持つため磁壁は相対論的に振る舞うことが知られている。スピン波にとっての光速に近い速度をもつ相対論的磁壁は、非常に強くスピン波ペア生成を起こすことを見出した。これは高速で動くためにスピン波が強いローレンツブーストを受け、応答関数が不安定化するためである。この現象は非常に強い電場のもとで真空が荷電粒子ペア生成を起こし不安定化するシュビンガー不安定性と同等の興味深い現象である。



図：磁壁によるスピン波放出の概念図。反強磁性体中の磁壁は相対論的に振る舞うことが知られており、速度が有効的な光速に近づくとき激しいスピン波放出を起こす。

スピントロニクス現象は半古典的で現象論的な理論による記述が主流で、各論的な理論解釈が

与えられてきていた。本研究では有効ゲージ場に引き起こされる流れという視点にたち多岐にわたる現象を統一的に説明することに成功した。現代物理の課題としてのスピントロニクス現象の重要性を示したことは高い学術的価値がある。

今後は本研究で築かれた明快な理論基盤を科学技術として価値のある現象の探索に発展させることを目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 19件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Gobel Borge, Akosa Collins Ashu, Tataru Gen, Mertig Ingrid	4. 巻 2
2. 論文標題 Topological Hall signatures of magnetic hopfions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013315(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.013315	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 該当する
1. 著者名 Tataru Gen, Pauyac Christian Ortiz	4. 巻 99
2. 論文標題 Theory of spin transport through an antiferromagnetic insulator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 180405(R)(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.180405	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 Tataru 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) 10.1016/j.physe.2018.05.011	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 Akosa Collins Ashu, Li Hang, Tataru Gen, Tretiakov Oleg A.	4. 巻 12
2. 論文標題 Tuning the Skyrmion Hall Effect via Engineering of Spin-Orbit Interaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 54032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.12.054032	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 Fujimoto Junji, Tataro 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 54407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.054407	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, Tataro 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) 10.1103/PhysRevB.99.205304	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 Kim Junyeon, Chen Yan-Ting, Karube Shutaro, Takahashi Saburo, Kondou Kouta, Tataro Gen, Otani YoshiChika	4. 巻 96
2. 論文標題 Evaluation of bulk-interface contributions to Edelstein magnetoresistance at metal/oxide interfaces	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 140409(R) (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.140409	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 Puebla Jorge, Auvray Florent, Xu Mingran, Rana Bivas, Albouy Antoine, Tsai Hanshen, Kondou Kouta, Tataro Gen, Otani Yoshichika	4. 巻 111
2. 論文標題 Direct optical observation of spin accumulation at nonmagnetic metal/oxide interface	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 092402 ~ 092402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4990113	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, Shigemi Mizukami	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 Phys. Rev.	6. 最初と最後の頁 064423 (1-23)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.064423	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 064439 (1-12)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.064439	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 Takagi R., Morikawa D., Karube K., Kanazawa N., Shibata K., Tatara G., Tokunaga Y., Arima T., Taguchi Y., Tokura Y., Seki S.	4. 巻 95
2. 論文標題 Spin-wave spectroscopy of the Dzyaloshinskii-Moriya interaction in room-temperature chiral magnets hosting skyrmions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 220406 (1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.95.220406	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 Funaki Hiroshi, Tatara Gen	4. 巻 3
2. 論文標題 Hydrodynamic theory of chiral angular momentum generation in metals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 023160 (1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.023160	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 Sousa Frederico, Tataro Gen, Ferreira Aires	4. 巻 2
2. 論文標題 Skew-scattering-induced giant antidamping spin-orbit torques: Collinear and out-of-plane Edelstein effects at two-dimensional material/ferromagnet interfaces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 043401(1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.043401	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 該当する

1. 著者名 Obadero S. A., Yamane Y., Akosa C. A., Tataro G.	4. 巻 102
2. 論文標題 Current-driven nucleation and propagation of antiferromagnetic skyrmionium	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 014458(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.014458	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 Karashtin E., Tataro Gen	4. 巻 101
2. 論文標題 Optical response of ferromagnetic materials induced by a spin gauge field at the second order	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174439(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.174439	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 Otxoa R. M., Rama-Eiroa R., Roy P. E., Tataro G., Chubykalo-Fesenko O., Atxitia U.	4. 巻 3
2. 論文標題 Topologically-mediated energy release by relativistic antiferromagnetic solitons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 043069 (1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.043069	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 該当する

1. 著者名 Akosa C.?A.、Tretiakov O.?A.、Tatara G.、Manchon A.	4. 巻 121
2. 論文標題 Theory of the Topological Spin Hall Effect in Antiferromagnetic Skyrmions: Impact on Current-Induced Motion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 097204(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.097204	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 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) 10.1103/PhysRevB.98.174422	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 Kawaguchi Hideo、Tatara Gen	4. 巻 87
2. 論文標題 Effective Hamiltonian Approach to Optical Activity in Weyl Spin?Orbit System	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 064002 ~ 064002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.064002	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6件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Gen Tatara
2. 発表標題 Recent developments in nano-magnitism and spintronics
3. 学会等名 The 10th International Conference of the African Materials Research Society (AMRS2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Gen Tatara
2. 発表標題 Spintronics theory without spin current
3. 学会等名 Euro-Asian Symposium "Trends in Magnetism" (EASTMAG-2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Gen Tatara
2. 発表標題 Spintronics theory without spin current
3. 学会等名 Spintronics XII SPIE (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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 (PM ' 17) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017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 of 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	河野 浩 (Kohno Hiroshi) (10234709)	名古屋大学・理学研究科・教授 (13901)	
研究分担者	柴田 絢也 (Shibata Junya) (20391972)	東洋大学・理工学部・教授 (32663)	
研究分担者	岸根 順一郎 (Junichiro Kishine) (80290906)	放送大学・教養学部・教授 (32508)	

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1件

国際研究集会 SPIN PERU International workshop on Spintronics 2019	開催年 2019年～2019年
--	--------------------

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			
ドイツ	Max-Planck-Institut	Martin-Luther-Universitat		
ナイジェリア	African Univ of Sci.&Tech(AUST)			
英国	Hitachi Cambridge Laboratory	University of York		
スペイン	Donostia International Physics Center			