


磁性伝導体における新しい創発電磁誘導

	研究代表者	東京大学・東京カレッジ・卓越教授 十倉 好紀 (とくら よしのり)	研究者番号:30143382
	研究課題情報	課題番号: 23H05431 キーワード: 創発電磁誘導、らせん磁性体、スキルミオン、マルチフェロイクス	研究期間: 2023年度~2027年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか (研究の背景・目的)

●研究の全体像

古典電磁気学におけるファラデーの電磁誘導の法則は、発電機、モーターからインダクター素子に至るまで、現代文明の基盤をつくるものである。一方、固体中の電子がもたらす仮想的な磁場 (創発磁場) と仮想的な電場 (創発電場) の関係は、ナノスケールの世界における創発電磁誘導現象を与える。この現象は、ナノ、マイクロスケールでの誘導電流発生や従来のインダクター-コイル素子の劇的なダウンサイジング (体積比100万分の1) など、将来の電子技術学理に大きなインパクトを与える。創発電磁誘導の実現と検証を目指して、局在スピンの伝導電子が強く結合する物質群を対象に、時間変化する電磁場への応答現象を開拓する。

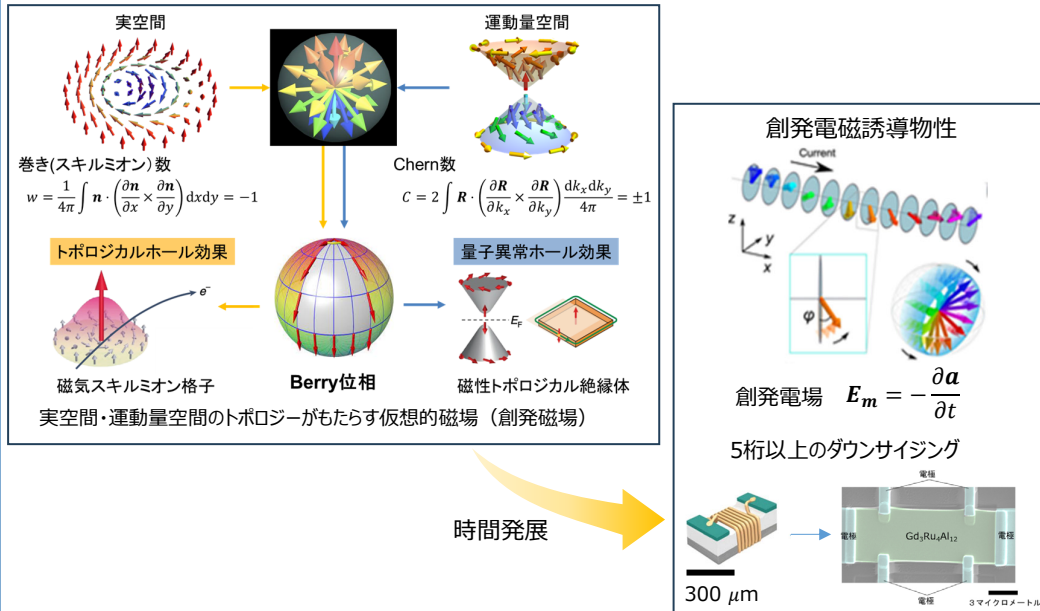


図1.創発電磁誘導物質の探索・設計と機構の解明・実証

●研究背景

「量子物質」の研究がかつてない規模で展開されている。量子物質とは、電子間に働く強いクーロン相互作用 (強相関) や、電荷やスピンなどの相秩序によって、量子力学の奥深い機構に基づく物性を現出する物質群を指す。一方、半導体物理学における量子ホール効果とその嚆矢とするのが、電子の持つ幾何学的性質 (トポロジー) である。この性質が生み出すベリー位相によって、電子は磁場を受けたかのように運動する (創発磁場)。現在の物性物理学の最も重要な研究対象の一つは、このトポロジーと強相関の二大潮流が合流した領域にある。特に、量子物質において、伝導電子がスピン秩序と結合するときにベリー位相を強く発現することがわかってきた。この研究の重要な発展として、創発磁場の時間変化に由来する創発電場の効果、すなわち「創発電磁誘導」についての研究がある (図1)。創発電磁気学を追求し、マイクロスケールの素子に代替する可能性を探索することは、将来の量子技術を考える上でも極めて意義深い。

●研究目的

局在磁性と伝導電子が結合する強相関電子伝導系において、スピン系の動的変化によって惹起される創発電磁誘導現象を実証し、定量化することによって、統一的な創発電磁誘導の学理を構築する。ここで対象とする物質系は、らせん磁性を有する伝導体や、極性 (電気分極) と強磁性を同時に持つ (マルチフェロイック) 伝導体・半金属などである。一方、創発電磁誘導を具現化するこれらの量子物質群について種々の理論モデルを用いて、創発電磁誘導効果を増大化する物質の設計・探索指針を明らかにする。展望として、古典電磁気学におけるファラデーの電磁誘導を代替しうる創発電磁誘導を創出し、それをマイクロ・ナノスケールで実現しうる量子物質を将来の省電力電子技術に活用するための基盤的な学理を与えることまでを目指す。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

この研究の重要な点は、磁性伝導体において、電子系に作用する創発磁場を微視的機構から同定し、その時間変化による創発電場をいかに実現するかにある。ここでは、本研究での対象物質系である、(a)らせん磁性を示す伝導体、(b)拡張マルチフェロイック伝導体、(c)磁気スキルミオン系、における独自の研究戦略を述べる。

●らせん磁性を示す伝導体

らせん磁性では、交流電流によりスピンを時間変化させることで非共面なスピン配置を実現し、創発電場が生じる (図2左)。これにより交流周波数に比例する物質系の複素インピーダンス虚部が観測される。これは、コイルで発生する電流変化による誘導起電力 (インダクタンス) に対応する。この創発インダクタンスは研究代表者らのグループによって実証され、製品化されている体積が1mm³を下回る微小インダクター-コイルに対して、100万分の1の小さな単結晶デバイスで、同程度以上のインダクタンス値を示すことが明らかになった (図2右)。

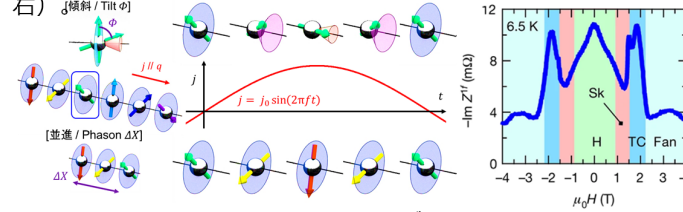


図2 らせん磁性の創発電磁誘導の起源と創発インダクタンスの観測例

ただ、単純な予想を上回る、はるかに多様で深淵な問題があることがわかりつつある。多様な物質群での詳細な測定によって、微視的機構の統一的理解を得ることを期している。

●マルチフェロイック伝導体

マルチフェロイック絶縁体では電場 (磁場) による磁化 (分極) の誘導などの電気磁気 (ME) 効果が表れ、この20年で大きな研究分野として進展した。ここでは、スピン・分極秩序によって、時間反転・空間反転の対称性を同時に破った系の伝導体・半金属を拡張マルチフェロイックとして、ME効果の伝導版を創発電磁誘導として捉え直す。その典型は、片側表面だけに強磁性モーメントを持つ半磁性トポジカル絶縁体やバルク全体で分極をなす強磁性ラッシュバ半導体などである (図4)。これらの物質において、面内磁場を印加し回転することで、面内誘導電流を検出する。また、反転対称の破れによるワイル半金属状態において磁気単極子の運動による創発電磁誘導の検出も課題とする。

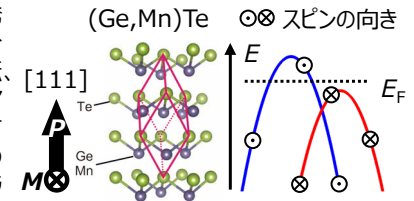


図3 マルチフェロイック伝導体の例: 強磁場ラッシュバ半導体

●磁気スキルミオン系

上記以外にも、創発磁場が平衡状態で存在する場合には、その時間変化によっても創発電場が生じる。例えば、磁気スキルミオンの場合、電流などでスキルミオンが運動すると、その直交した方向に創発電場が生じる (図5)。実際、この効果はスキルミオン格子が出すトポジカルホール効果に対する微小なホール電圧の補正として検出されており、数少ない創発電磁誘導の検出例である。マイクロデバイスでの高い電流密度によるスキルミオン格子の動的変形をホール電場の変調として測定を試みる。

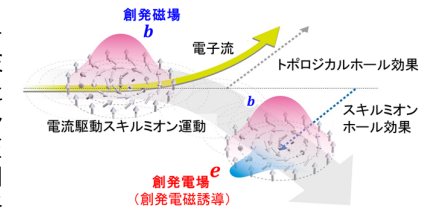


図4 スキルミオンの電流駆動と創発電場