

令和元年6月5日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H06601

研究課題名（和文）高強度テラヘルツ光を用いた高効率スピン流生成原理の創成

研究課題名（英文）High-efficiency spin current generation using intense terahertz light

研究代表者

岡村 嘉大（Okamura, Yoshihiro）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：20804735

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、テラヘルツ光を利用することで、高速・高効率のスピン流生成の新原理構築を目指した。テラヘルツ領域は伝導電子のドローデ応答や局在スピンの磁気共鳴などの多彩な応答が存在する上に、光学実験の特長を活かすことで超高速応答やスピン偏極方向などの詳細な知見が得られることが期待できるためである。本研究期間においては、高強度テラヘルツ光照射機構の立ち上げやテラヘルツ光誘起の超高速スピン生成のための予備実験として磁気カー効果を用いることで電流誘起磁化の観測を様々な物質において観測した。これによって、今後これらを組み合わせることでピコ秒程度のスピン生成の実現の土台が整ったといえる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピン制御はメモリデバイスの応用などの観点から非常に重要な意義があり、近年の物性物理における最も大きなテーマの一つとして盛んに研究されている。実際にこれまで、電気・熱・光など様々な原理によるスピン制御方法が実証されてきた。本研究では、その新たな手法として、テラヘルツ光により誘起される伝導電子の極限的に高速なコヒーレントダイナミクスを利用することで、超高速・高効率なスピン生成の新原理実証を目指した。本研究期間では、電流によるスピン偏極の観測や高強度テラヘルツ光の測定系の構築などを達成することができた。これらは完全には目標を達成できていないものの、最終目標に向けて着実に歩を進めることができた。

研究成果の概要（英文）：The goal of our research is to establish the novel principle towards high-speed and high-efficiency spin generation by using terahertz light. Terahertz light is the promising tool to realize this goal since various responses of solid exists such as magnetic resonance, scattering rate of the conduction electron and so on. Moreover, the optical measurement enables to detect ultrafast dynamics and spin polarization direction. In the present term, we have constructed the intense terahertz light system and current-induced magnetization probed by magneto-optical Kerr effect for terahertz induced spin polarization. With this development, we have established the platform to realize the picosecond spin polarization.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス テラヘルツ エデルシュタイン効果

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

スピントロニクス研究は、80年代後半の巨大磁気抵抗効果の発見を一つの契機にメモリ産業に大きなパラダイムシフトを引き起こしてきた。今日においても、電子スピン制御することによって、省電力スピン制御の新原理の開拓が盛んに進められている。その中でも特にスピン流生成は、応用的な観点だけでなく、物性物理における重要なテーマの1つとしても大きな注目を集めている。

これまでのスピントロニクス研究では、電気・熱・光・応力といったような様々な外力によるスピン制御が実証されている。この中でも光を用いたスピン制御は光磁気ディスクをはじめとした非常に重要なデバイスを生み出しており、スピンの超高速・高効率制御に向けて最も有望な手段となっている。しかしながらその一方で、それらの原理では光照射による熱を利用しており、制御効率や制御速度には限界があるため、応用化されたMOディスクも今ではほとんどすたれてしまっている。

本研究では、こうした問題点を解決するべく、光を用いた新しい原理のスピン制御原理の提案を目指した。特に今回注目したテラヘルツ光は、近年のレーザー技術の発展に伴い、ようやく研究が盛んに行われるようになってきている。例えば、パルス面傾斜法による高強度テラヘルツ光発生などの新技術が提案され、これからの著しい発展が期待されている。また、これまでのテラヘルツ研究によれば、テラヘルツ光はスピンや伝導電子に強く応答することが知られており、スピントロニクス分野の新局面を切り開ける可能性があった。

### 2. 研究の目的

本研究では、高強度テラヘルツ光を用いることによって、高速・高効率のスピン流生成の新原理構築を目指す。テラヘルツ領域は伝導電子のドローデ応答や局在スピンの磁気共鳴などの多彩な応答が存在するため、バリエーション豊かなスピンドイナミクスを用いた新奇スピン生成原理が構築できる。さらには、光学実験の特長を活かすことで、誘起されたスピンの超高速応答やスピンの偏極方向などの詳細な知見を得ることができるなど、スピンドイナミクスを研究するには有力な手段になることが期待できる。

具体的な研究課題としては、(i)反転対称性の破れた伝導体におけるテラヘルツスピン流生成、(ii)テラヘルツ波誘起スピン波ホール効果の観測という2つのテーマを提案した。(i)のテーマでは、反転対称性の破れた系において期待されるフェルミ面におけるスピン運動量ロッキング状態に対して、テラヘルツ光照射により伝導電子の分布を変調することで、超高速なスピン生成を目指す。特に、電場の次数に依存したスピン生成効果について注目し、エデルシュタイン効果と呼ばれる電場の一次に比例するマクロなスピン偏極効果に加え、電場の二次に比例して現れるスピン流生成の観測を行う。(ii)のテーマは、テラヘルツ光によって励起されるスピン波の伝搬ダイナミクス、特にホール運動の観測を目指す。スピン波ダイナミクスの実空間イメージングは、これまでいくつか報告例があるものの、物質はYIGといった典型的なものに限られる上、ホール運動などの詳細に踏み込んだ研究はほとんどなかった。そこで、より多彩な物質やダイナミクスへの拡張を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究課題では、テラヘルツ光によるスピンドイナミクスを検出するため、励起手段として高強度テラヘルツ発生系を用い、検出手段として磁気光学カー効果をそれぞれ用いる。高強度テラヘルツ光は、通常の電流電圧印加では達成できないほど大きな電場強度を物質に対して瞬時的に印加することが可能なため、ヒーティングが問題になる測定や高次効果の観測などこれまで実現できなかったようなスピンドイナミクスを議論できる可能性がある。さらに、そのテラヘルツ光のパルス幅がピコ秒程度であり、光を用いることで初めて実現できる超高速ダイナミクスを誘起可能である。

一方で、検出に用いる磁気光学カー効果は、通常電氣的検出の困難なスピンの情報に関して、偏光回転によって超高速に読み出すことが可能になる。これら2つの光学的手法を組み合わせることで、新奇なテラヘルツスピンドイナミクスの開拓を目指した。

### 4. 研究成果

本研究期間では、上記の通り、高強度テラヘルツ光励起・磁気光学カー効果プローブによるスピン検出が非常に重要になるため、それぞれの光学系について立ち上げから行った。

まず、高強度テラヘルツ光発生については、当初から完成に近い状況にあったものの、精密に調整を行うことで最大 800 kV/cm 程度の尖頭値を達成することができた。

これは、他のグループによって報告されているのに対しても全く遜色のない値になっている。この測定系を用い、(ii)テラヘルツ光誘起のスピนว波ダイナミクスのテーマの予備測定として、高強度テラヘルツ光照射下におけるスピนว波励起のスペクトルを測定した。スピนว波は強励起極限では、ダンピング係数大きくなるなど、様々な余剰効果が生じる可能性があるが、今回の電場範囲では特にテラヘルツ光強度依存性などはなく、線形応答領域として議論が行えることが確認できた。

一方、磁気光学カー効果については、それまでほとんど測定ノウハウがなかったため、簡単なテスト光学系構築を平行してスタートさせた。光弾性変調器を用いた方法やバランス検出法など様々な測定手法をテストし、測定方法を最適化し、強磁性体などで偏光回転を精密に測定するノウハウを確立した。

さらに、その中で(i)の反転対称性の破れた伝導体におけるテラヘルツスピนว流生成のテーマの予備測定として、電流を印加した際に発生するスピนว偏極（エデルシュタイン効果）の測定を行った（図1 (a)）。このスピนว偏極量が大きいほど、テラヘルツ測定が容易になるのはもちろんのこと、この実験自体全く新しい成果を生み出すことができるためである。

このエデルシュタイン効果は、スピนว運動量ロッキング状態に対して、電流印加しフェルミ面の電子分布を変調し、その結果マクロなスピนว偏極が期待できるものである（図1 (b)）。本研究では、ポーラーな対称性を有するBiTeBrやカイラルな対称性を有するTeといった物質において、測定を行った（図1 (c, d)）。一般に、ポーラーな対称性を持つ場合には、その対称性を反映して、スピนวと運動量が必ず直交するようになり、結果として電流とスピนว偏極の関係も垂直になる。その一方で、カイラルな対称性を持つ場合においては、電流とスピนว偏極の関係は平行になることが期待される。BiTeBr・Te どちらの場合においても電流に比例したカー回転が観測された一方で、BiTeBr の場合には電流と垂直、Te の場合には電流と平行なスピนว偏極が観測され、対称性の議論が満たされていることを証明することができた。特に、後者のカイラルな対称性におけるエデルシュタイン効果はほとんど報告されておらず、新奇な対称性のものを実証することに成功したといえる。

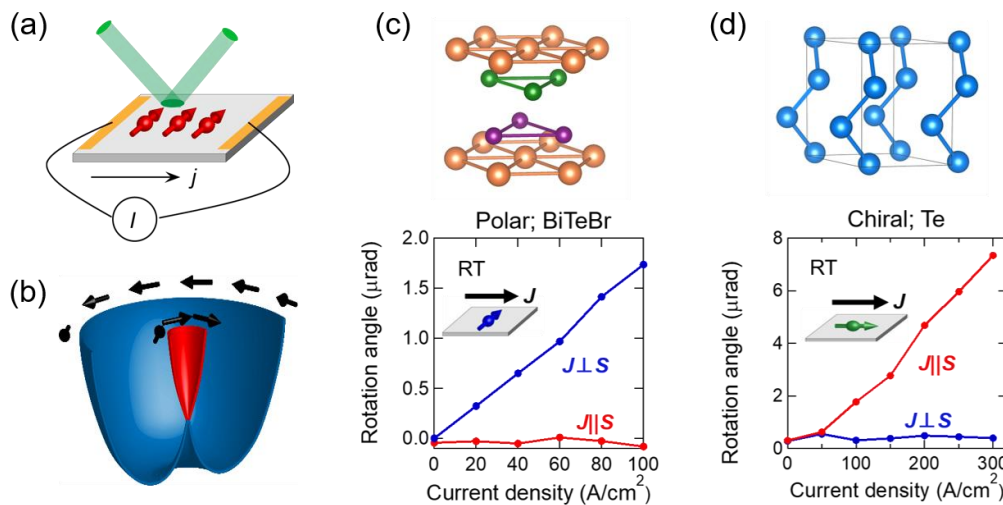


図1 : (a) 実験の概念図。電流印加時における偏向回転を測定する。(b) ポーラーな対称性を持つ系に現れるラシュバ型のスピนว運動量ロッキング状態。(c,d) 電流誘起カー回転。(c) ポーラーな対称性を持つ BiTeBr。(d) カイラルな対称性を持つ Te。

また、この研究を足掛かりに、カイラルな対称性を持つ磁性体 FeGe についても測定を行った。FeGe は、基底状態はらせん磁性で、磁気転移点近傍においては、スキルミオンと呼ばれる渦状の磁気構造体が発現する（図2 (a)）。そのため、エデルシュタイン効果と磁気構造の相関の議論を行った。その結果、やはりカイラルな対称性を持つエデルシュタイン効果が観測されたことに加え、各磁気相の相境界において、カー回転信号が増大することがわかった（図2 (b)）。これの結果により、エデルシュタイン効果はほとんど磁気構造には影響を与えられない一方で、カイラル磁性体特有の磁壁の電流駆動がカー回転に寄与する可能性が示唆された。

以上のように、高強度テラヘルツ光発生系、磁気光学測定系の構築にそれぞれ成功し、さらには予備測定の結果エデルシュタイン効果について、これまであまり議論されたことのないカイラル系での研究を推進することができた。現在では、それぞれの

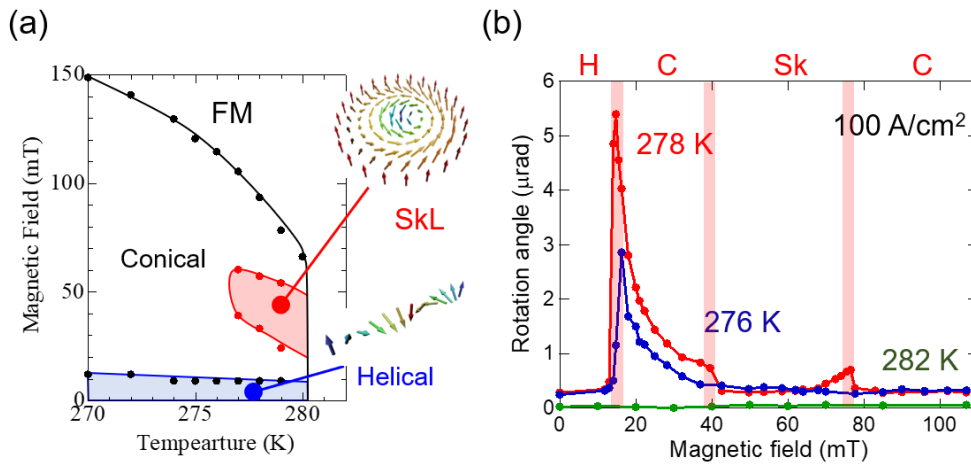


図 2 : (a) FeGe における磁気相図。(b) 電流誘起カー回転の磁場依存性。

測定系を統合したポンプ・プローブ測定系の構築を進めており、さらなる進展を目指す。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 1 件)

① 「カイラル磁性体 FeGe における電流誘起磁化の光検出」  
 日本物理学会 2018 年秋季大会 東北学院大学 領域 5 11pB-10 2018 年 9 月  
岡村嘉大、バトトルガムソフツェツェグ、金澤直也、十倉好紀、高橋陽太郎

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

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

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
 発明者：  
 権利者：  
 種類：  
 番号：  
 取得年：  
 国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。