

京都大学教育研究振興財団助成事業  
成 果 報 告 書

令和 4 年 4 月 27 日

公益財団法人京都大学教育研究振興財団

会 長 藤 洋 作 様

所 属 部 局 工学研究科電子工学専攻

職 名 助教

氏 名 重松 英

助 成 の 種 類	令和 3 年度 ・ 研究活動推進助成			
申請時の科研費 研究 課 題 名	交流スピン流機能素子の創製			
上記以外で助成金 を 充 当 した 研 究 内 容	該当なし			
助成金充当に関 わる共同研究者	該当なし			
発表学会文献等	・Full calculation of inter-conversion between charge, spin, and heat current using a common partial differential equation platform (投稿中査読付き論文)			
成 果 の 概 要	研究内容・研究成果・今後の見通しなどについて、簡略に、A4版・和文で作成し、添付して下さい。(タイトルは「成果の概要／報告者名」)			
会 計 報 告	交付を受けた助成金額	1,000,000	円	
	使用した助成金額	1,000,000	円	
	返納すべき助成金額	0	円	
	助成金の使途内訳	費 目	金 額	
		【備品費】電流電圧計	520,080	
		【備品費】金属加工装置・付属品	455,040	
【備品費】データ保存用HDD		17,059		
	【その他】図書2点	7,821		
当財団の助成に つ い て	(今回の助成に対する感想、今後の助成に望むこと等お書き下さい。助成事業の参考にさせていただきます。) 本助成を受けることができたことで、研究課題に先鞭をつける実験的成果を上げることができたとともに、研究の発展に不可欠な理論検討においても大きな進展を得られた。重ねてお礼申し上げたい。			

## 成果の概要／重松英

スピントロニクスデバイス開発において、近年高周波デバイスとしての視点が脚光を浴びている。古くは、低ダンピング磁性絶縁体であるイットリウム・鉄・ガーネットを用いた YIG 共振器など、磁化ダイナミクスを応用した高周波デバイスは既に実用化されている。スピントロニクスの基礎研究の方面では、交流スピンの交流電流との相互変換現象がさまざまな物質で実証・報告されている。スピン流とは、電子の持つ電荷に着目した電流に対して、スピン角運動量の移動を流れとして捉えなおしたものであり、ここではスピン偏極方向が時間変化しないものを直流スピン流と呼ぶ一方、時間経過に従って正弦状に変化するものを交流スピン流と呼ぶ。交流スピン流は主に、強磁性体/非磁性体界面において強磁性共鳴下の磁化ダイナミクスに起因するスピンプンピングにより生成されるので [H. Jiao *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 217602 (2013)], その周波数は典型的に GHz オーダーである。この周波数領域は無線通信や情報処理デバイスで多用される領域であるので、交流電流の変換機能にスピン流の要素を付加した新規デバイスは、産業応用に直結する可能性を有する。その第一歩として、スピン流電流変換機能が特異的に発現することが期待できる素子構造に着目した。作成したデバイスは、スピン流電流変換が介在しその生成電流が効率的に交流磁界を生み出す球状磁性体/帯状スピン変換金属構造である。

実験では市販の 1mm 直径の YIG 球に帯状のスピンホール金属材料を蒸着することとした。そのために、球状 YIG の上下にレジストを、周を残した形で塗布し、スパッタリング法により Pt を蒸着した。液浸処理により、周上以外の部分の Pt は除去され、帯状のスピンホール金属構造が YIG 球において形成された。測定ではコプレーナ導波路の両端を高周波ケーブルでベクトルネットワークアナライザに接続した実験系を用いた。YIG 球に垂直の向きに外部静磁場が印加されるように、電磁石と固定器具からなる系を新たに構成した。中央に位置するコプレーナ導波路に作製した試料を近接して設置した。この部分は電磁石中に設置されており、試料系全体に外部静磁場を印加した。電流電圧計とホールピースからなる磁場測定系により、精密な印加磁場のモニタリングを行った。また、試料を固定し所望の角度で外部静磁場を印加するための治具を作製するために金属加工装置を調達した。試料を設置した状態においてベクトルネットワークアナライザで測定される複素の  $S_{21}$  パラメータは、外部静磁場に依存して球状 YIG が磁化ダイナミクスにより吸収するマイクロ波は反映している。先行研究で確立している磁性体の磁化ダイナミクスによる寄与を取り出すプロトコル[A. J. Berger *et al.*, *Phys. Rev. B* **97**, 094407 (2018)] [E. Shigematsu *et al.*, *Phys. Rev. B* **103**, 094430 (2021)] に従い、外部静磁場・周波数に依存した吸収強度スペクトルが得られた。Pt 帯による効果を取り出すために、Pt 帯を設置しない状態の YIG 球においても同様の測定を行い、スペクトルの比較を行うこととした。比較においては、はじめに、球上の磁化が全域で一様に歳差する一様強磁性共鳴モードのスペクトルを両実験で比較した。その

結果、Pt 帯を設置した場合に、磁化ダンピングを示す共鳴線幅が大幅に増大していることがわかった。

ここで、磁化ダンピングの増大の要因となる物理現象をまとめる。[1] 磁化ダンピングは磁化スピンの近接している導体にスピン角運動量を受け渡し、スピン流を注入する際に増大することが知られている。交流スピン流が Pt に注入されることが期待される Pt 帯を設置した場合にこの寄与は現れ得るので、実験結果を説明するひとつの原理と言える。

[2] また、Pt のような導体の帯が設置されている場合、近接している YIG の歳差磁化によるダイポール磁場を妨げる向きに渦電流が発生する。この渦電流も更に全体の交流磁場に影響を与えて、磁化ダイナミクスの駆動力となっていた元々の交流磁界と重畳することで、共鳴スペクトルにおける半値線幅に影響を与える。現時点においては、上述の2つの効果が観測されたスペクトルの半値線幅の増大の原因になっていると考える。

本研究の目的は、交流スピン流電流変換による機能を高周波素子系に付加して、新たな機能を開拓することであった。そのためには、今回の研究で観測した磁化ダンピングの増大の上記の2つの要因を切り分けることが、今後の交流スピントロニクス素子の創製の基礎となる課題である。したがって、今後の研究方針として、上記の問題に対応するために、(A) 前述のスピン流電流変換に起因する[1]の効果が発現する金属材料と、そうでない金属材料で帯構造を構成して比較することがまず挙げられる。具体的には、先述の Pt 帯構造と Cu 帯構造を用いた実験を行い比較することである。Cu はスピン流電流変換効率が小さいことが知られている。また、(B) 得られた  $S_{21}$  が複素信号であることを利用して、共鳴スペクトルを複素の磁気感受率として解析することで、[1][2]の寄与を分離することを検討している。すでに、この両者の寄与と複素感受率を結ぶ式を導出しており、解析に適したスペクトルを得るための外部静磁場・周波流領域での測定を行うための検討を行っている。

さらに、研究を進展させて新規デバイス構造を検討するにあたり、スピン流分布の数値解析が不可欠である。上記の知見を活かしてスピン拡散方程式の有効な数値計算方法を開発し、その成果を学術誌に投稿している。

本助成によって得られた上述の実験結果は、高周波デバイスにおけるスピン流電流変換機能の積極的利用という学理上・応用上重要な課題の達成のための第一歩となる成果であると言える。