

学位論文 博士 (工学)

金属薄膜系におけるスピン流・軌道流  
の生成現象と電流誘起トルクに関する研究

2023 年度

慶應義塾大学大学院 理工学研究科

鈴木 隆起

指導教員: 安藤和也 准教授

主 論 文 要 旨

No.1

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |       |   |     |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---|-----|-------|
| 報告番号                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Ⓐ 乙 第 | 号 | 氏 名 | 鈴木 隆起 |
| 主 論 文 題 名：<br>金属薄膜系におけるスピン流・軌道流の生成現象と電流誘起トルクに関する研究                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |       |   |     |       |
| <p>(内容の要旨)</p> <p>スピントロニクス研究において、スピン角運動量の流れ(スピン流)を利用した磁化の制御は、非常に重要な役割を果たしてきた。そのスピン流を生成する現象であるスピンホール効果や異常ホール効果についても積極的に研究が行われてきた。スピンホール効果は Pt などの重金属、異常ホール効果は Ni 及び Co などの遷移金属強磁性体で発現することが広く知られており、今もなお注目されている。さらに近年では、軌道角運動量の流れ(軌道流)の存在が理論的に示唆されたことを契機として、スピン流と同様に、磁化の制御に用いることが可能であると明らかになりつつある。軌道流は、軌道ホール効果によって生成することができるが、これはスピン軌道相互作用を必要としない効果であるため、Ti などの軽金属でも発現する。したがって非常に有望であるが、軌道流に由来する電流誘起トルクの物理は、Ti/Ni および Ti/Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub> 二層膜では報告されているが、まだ明らかになっていない部分が多い。本研究では、金属薄膜系における角運動量流の生成現象(スピン・異常・軌道ホール効果)の観測及び強磁性体中で発現する電流誘起トルクに関する新たな知見を得ることを目指した。</p> <p>本論文は、全 6 章により構成される。第 1 章では序論として、スピントロニクス発展の背景と本研究の目的について説明する。さらに、電子の持つ角運動量や磁化ダイナミクス、角運動量流の生成現象を含むホール効果、電流誘起トルクなど本研究での前提知識となる理論について説明する。第 2 章では、本研究における実験方法や解析方法について説明する。第 3 章では、強磁性体/常磁性体二層膜におけるスピンホール効果を観測し、スピン流由来の電流誘起トルクの電氣的制御を実現した結果を示す。第 4 章では、近年注目を集めるファンデルワールス強磁性体における異常ホール効果の観測及びスケーリング則に基づいた物理的特性の解明を行い、大きな外因性異常ホール効果の発見を示す。第 5 章では、強磁性体/常磁性体二層膜における軌道ホール効果に起因する軌道トルクを観測し、軌道トルクの強磁性層依存性を明らかにする。第 6 章では、本研究の結論として、得られた成果を集約して説明する。</p> |       |   |     |       |

# Thesis Abstract

No. \_\_\_\_\_

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                         |      |              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|--------------|
| Registration<br>Number                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <input checked="" type="checkbox"/> “KOU” <input type="checkbox"/> “OTSU”<br>No. _____ *Office use only | Name | Suzuki Ryuki |
| Thesis Title<br>Study on Generation Phenomena of Spin and Orbital Currents and Current-Induced Torque in Metallic Thin Film Systems                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                         |      |              |
| Thesis Summary<br><p>In spintronics research, the control of magnetization using the spin current has played a crucial role. The spin Hall effect and the anomalous Hall effect, which are the phenomena that generate the spin current, have been actively studied. It is widely known that spin Hall effect occurs in heavy metals such as Pt, and anomalous Hall effect in transition metal ferromagnets such as Ni and Co, and these phenomena continue to attract much attention. More recently, the existence of orbital current has been theoretically suggested, indicating that it can be used for magnetization control, similar to spin current. Orbital current can be generated by the orbital Hall effect, that does not require spin-orbit interactions, and thus can be observed even in light metals such as Ti. Therefore, it is very promising, but the physics of current-induced torque originating from orbital current is not fully understood. This study focuses on the observation of angular momentum flow generation phenomena (spin Hall effect, anomalous Hall effect, and orbital Hall effect) in metal thin film systems and on new knowledge of the current-induced torque in ferromagnetic materials.</p> <p>This thesis consists of six chapters. In Chapter 1, as an introduction, the background of spintronics development and the purpose of this study are explained. Furthermore, the theories that are the prerequisites for this study, such as the angular momentum of electrons, magnetization dynamics, the Hall effect including the generation of angular momentum flow, and current-induced torque, are explained. Chapter 2 describes the experimental methods and analysis techniques used in this study. Chapter 3 demonstrates the observation of the spin Hall effect in ferromagnetic/heavy metal bilayers and the electrochemical control of torque derived from spin current, establishing a robust quantitative method for torque efficiency. Chapter 4 discusses the observation of the anomalous Hall effect in van der Waals ferromagnetic thin films, which have attracted much attention in recent years, based on scaling laws to reveal a significant extrinsic anomalous Hall effect. Chapter 5 observed orbital torque due to the orbital Hall effect in ferromagnetic alloy/light metal bilayers and clarified the dependence of the orbital torque on the ferromagnetic layer. In Chapter 6, as a conclusion, the results obtained in this study is summarized.</p> |                                                                                                         |      |              |