OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

| | |
|---|---|
| Title | Non-linear and Non-equilibrium Phenomena in Magnetic Tunnel Junctions |
| Author(s) | 岩切, 秀一 |
| Citation | 大阪大学, 2021, 博士論文 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://doi.org/10.18910/82000 |
| rights | |
| Note | |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

# 論　文　内　容　の　要　旨

| 氏　名　（　岩切　秀一　） | |
|---|---|
| 論文題名 | Non-linear and Non-equilibrium Phenomena in Magnetic Tunnel Junctions<br>（磁気トンネル接合における非線形非平衡現象） |

論文内容の要旨

外場に対する物質の応答を理解することは、物性物理学の大きな目的であり、電子輸送や、電気/磁気モーメントの応答など、その対象は多様である。特に、外場が弱く、系が平衡（基底状態）に近い領域で成り立つ線形応答理論は、物性を理解する一般的な枠組みとなっている。

さらに、近年の微細加工技術により、物性物理学の対象は、ナノスケール素子へと展開している。こうした系では、外場や熱ゆらぎの効果が、素励起など系に内在するエネルギースケールを上回ることで、応答やダイナミクスの非線形性や相互作用の効果が顕著に現れる。しかし、こうした非線形・非平衡状態を理解し制御するための一般的な枠組みは知られておらず、今なお挑戦的な問題となっている。

その探究の舞台として、本研究では、磁気トンネル接合（Magnetic tunnel junction, MTJ）に注目した。MTJは、ナノスケールの強磁性体/絶縁体/強磁性体からなる素子で、スピンに依存した電子輸送（スピン流）が現れる。さらに、スピン流は強磁性体に角運動量を運び込み、磁化に有効的な「力」を及ぼす。この原理により、従来からスピン流による磁化ダイナミクスが研究され、磁化方向の反転や、首ふり運動(歳差運動)など、工学的にも重要な現象が発見されてきた。これらは、定常状態や小振幅の現象であり、物理的には平衡・線形応答の枠組みで理解できる。

一方、それを超えた非線形・非平衡領域の磁化ダイナミクスや、その起源の解明は、未開拓の領域である。そこで本研究では、MTJをモデル系として用いることで、多彩な非線形・非平衡現象を研究することを目的とした。

本研究ではまず、非平衡状態の電子輸送に注目し、量子効果（パウリの排他律）を取り込んだスピン流の描像や、非線形輸送（電流と電圧の比例関係の破れ）の背後に、マグノンによる電子散乱という物理的な起源があることを明らかにした。

さらに、従来は平衡状態の近くに集中していた磁化制御の枠組みを、非線形・非平衡領域にまで展開することで、磁化の準安定状態や、強く駆動された磁化ダイナミクスが示す振動スペクトルの分裂現象を発見した。

こうした成果は、物質が示す多彩な応答やダイナミクスを理解し制御するという物性物理学に、直接貢献するものであるとともに、新しい原理に基づいたメモリや計算素子など、新しいテクノロジーの開発にもつながることが期待される。

様式 7

# 論文審査の結果の要旨及び担当者

| 氏　名 | （　岩切　秀一　） | |
|---|---|---|
| | （職） | 氏　名 |
| 論文審査担当者 | 主 査　教授 | 小林　研介 |
| | 副 査　教授 | 小川　哲生 |
| | 副 査　教授 | 波多野　恭弘 |
| | 副 査　教授 | 松野　丈夫 |
| | 副 査　准教授 | 新見　康洋 |

## 論文審査の結果の要旨

外場に対する物質の応答を理解することは、物性物理学の大きな目的であり、電子輸送や、スピンの応答など、その対象は多様である。特に、外場が弱く、系が熱平衡に近い領域で成り立つ線形応答理論は、物性を理解する一般的な枠組みとなっている。さらに、近年の微細加工技術により、物性物理学の対象は、ナノスケール素子へと展開している。こうした系では、外場やゆらぎの効果が、素励起など系に内在するエネルギースケールを上回ることで、応答の非線形性や相互作用の効果が顕著に現れる。しかし、こうした非線形・非平衡状態を理解し制御するための一般的な枠組みは確立しておらず、今なお挑戦的な問題となっている。

その探究の舞台として、本研究では、磁気トンネル接合（Magnetic tunnel junction, MTJ）に注目した。MTJ は、ナノスケールの強磁性体/絶縁体/強磁性体からなる素子で、スピンに依存した電子輸送が現れる。スピンの流れ（スピン流）は強磁性体に角運動量を運び込み、磁化に有効的な「力」を及ぼす。この原理により、従来からスピン流による磁化ダイナミクスが研究され、磁化方向の反転や、首ふり運動(歳差運動)など、工学的にも重要な現象が発見されてきた。これらは、定常状態や小振幅の現象であり、物理的には平衡・線形応答の枠組みで理解できる。一方、それを超えた非線形・非平衡領域の磁化ダイナミクスや、その起源の解明は、未開拓の領域である。そこで本研究では、MTJ をモデル系として用いることで、多彩な非線形・非平衡現象を研究することを目的とした。

本研究では、MTJ における非線形・非平衡現象に注目し、以下の 4 つの成果を挙げた。(1) MTJ を通過する電流に含まれるショット雑音を理論的に取り扱い、量子効果（パウリの排他律）を取り込んだスピン流の描像を確立した。(2) MTJ における非線形輸送（電流と電圧の比例関係の破れ）の背後に、マグノンによる電子散乱という物理的な起源があることを明らかにした。(3) 電流注入により MTJ における磁化の準安定状態の制御に成功した。(4) 強く駆動された MTJ における磁化ダイナミクスが示す振動スペクトルの分裂現象を発見し理論的な解釈を与えた。

以上の成果は、物質が示す多彩な応答やダイナミクスを理解し制御するという観点から物性物理学に直接貢献するものであり、非線形輸送の一般論や非平衡物理、さらには様々な系への展開につながるものである。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。