

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	強磁性/反強磁性ヘテロ構造におけるスピンの流伝搬特性
Title(English)	Characterization of spin-current propagation in ferromagnet/antiferromagnet heterostructures
著者(和文)	崎村 広人
Author(English)	Hiroto Sakimura
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11447号, 授与年月日:2020年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:史 蹟,中村 吉男,合田 義弘,中川 茂樹,ファム ナムハイ,安藤 和也
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11447号, Conferred date:2020/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

# Characterization of spin-current propagation in ferromagnet/antiferromagnet heterostructures

(強磁性/反強磁性ヘテロ構造におけるスピン流伝搬特性)

物質理工学院 材料系 材料コース 博士後期課程  
崎村 広人

## 論文要約

### 概要

反強磁性体は外部磁場の揺らぎに対し安定であり、更にTHzオーダーのダイナミクスを有することなどから強磁性体に代わる次世代スピントロニクス素子の基盤材料として注目を集めている。その本格的な活用には、スピン減衰長（スピン流が物質中をどれだけの長さ伝搬可能かを表す値）の定量が必要不可欠である。しかし先行研究における反強磁性体のスピン減衰長は測定方法により2桁程度のばらつきがあり、その正確かつ簡便な測定方法の確立が急務である。本研究では、その最も標準的な方法である強磁性(FM)/反強磁性絶縁体(AFI)接合を含む系を用いた面直スピンプンピング法に焦点を当て、先行研究において見落とされていた2マグノン散乱の効果を補正することでより精確なスピン減衰長定量方法を確立した。以下に各章の要約を記す。尚、本論文要約中の引用文献の番号は論文本文中における表記に基づく。

## Chapter 1: Background and objective

本研究の背景となるスピントロニクス基礎知識と、近年の反強磁性スピントロニクス研究の動向をまとめた。反強磁性体は応用上強磁性体にはない複数の強みを持ち、スピントロニクスデバイスへの応用が期待されている[31]。その達成にあたり物質のスピントロニクス特性を表す一つの指標であるスピントロニクス減衰長の正確な定量は不可欠である。この値は反強磁性金属では数nmオーダーだが、マグノンによるスピントロニクス伝搬のみが許される反強磁性絶縁体においては長いもので数 $\mu\text{m}$ という報告がされている。その測定には現在主に2種類の方法、面内非局所法と面直スピントロニクスポンピング法が用いられているが、測定方法により測定結果に2桁ほどのばらつきがある（理想的には測定方法依存性はないはずである）[27-31]。初めて反強磁性絶縁体中のスピントロニクス伝搬が観測された際には後者が用いられたことからわかるように、後者の方がより標準的である。しかし後者の方法で測定されたスピントロニクス減衰長の方が前者で測定されたものより一般的に小さい。そこで本研究では、この測定方法によるスピントロニクス減衰長の違いに着目した。その上で、本研究を遂行する目的を「スピントロニクスポンピング法による反強磁性絶縁体中のスピントロニクス伝搬特性の正確な評価方法の確立」と定めた。本研究で用いる反強磁性絶縁体として、磁気ダンピングが小さく長いスピントロニクス減衰長が期待できるにもかかわらず、実験的には前者の方法に比べ比較的短いものしか報告されていないNiOを用いることとした。

[27] H. Wang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **113**. 097202 (2014)

[28] C. Hahn *et al.*, Europhys. Lett. **108**. 57005 (2014)

[29] H. Wang *et al.*, Phys. Rev. B **91**. 220410 (2015)

[30] T. Moriyama *et al.*, Appl. Phys. Lett. **106**. 162406 (2015)

[31] R. Lebrun *et al.*, Nature **561**. 222 (2018)

## Chapter 2: Fabrication of single-layer NiO and NiO/Pt bilayers on thermally oxidized silicon substrates and their structural evaluation

3-5章で使用する室温反強磁性体NiO薄膜の作成と構造特性評価を行った。NiOは単層膜とNiO/Pt二層膜の二種類で、NiO膜厚 $d_{\text{NiO}}$ を変化させたものを用意した(Pt膜厚は5 nmで固定した)。基板には熱酸化Siを用いた。成膜は室温でRFスパッタリング法により行い、構造・表面特性評価にはXRD, XRR, AFMを用いた(図1)。その結果から単層・二層膜共にNiOは多結晶を構成しており、表面のラフネスは膜厚に依らず1 nm以下であることが確認された。

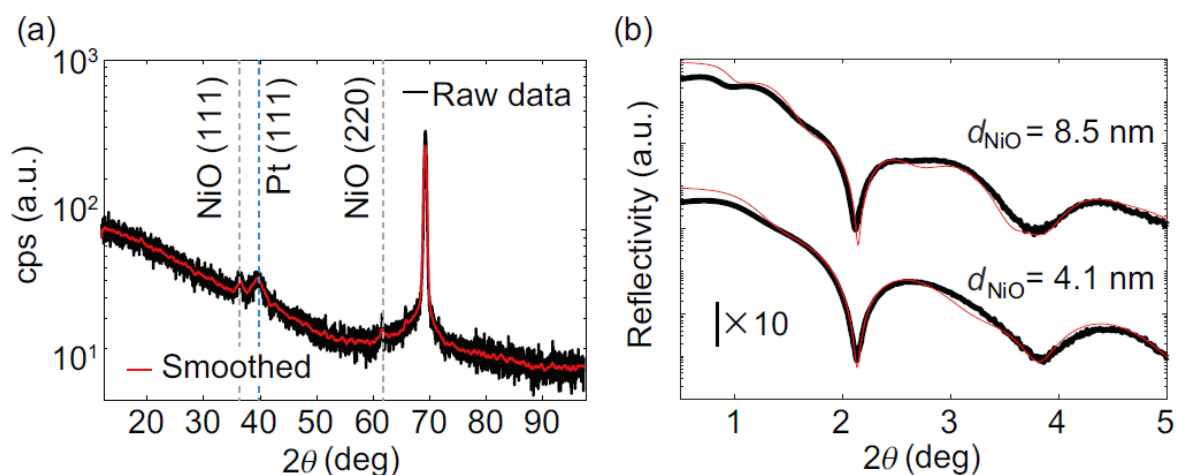


図 1: (a) NiO ( $d_{\text{NiO}} = 32 \text{ nm}$ )/Pt(5 nm)二層膜のXRDスペクトル。(b) NiO( $d_{\text{NiO}} = 4.1, 8.5 \text{ nm}$ )/Pt(5 nm)二層膜のXRRスペクトル(黒)とそのフィッティング(赤)。

### Chapter 3: Evaluation of two-magnon scattering magnitude in FM/AFI bilayer

Angular-dependent ferromagnetic resonance (AD-FMR)測定による磁気共鳴線幅の磁場角度依存性からNi<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>/NiO/Sub.系における強磁性層の2マグノン散乱 (TMS) 強度の定量を行い, その強度がNiO層の膜厚増加に伴い増加するという結果を得た (図 2(a)). ここでNiO膜厚 $d_{\text{NiO}}$ は0 ~ 12.5 nmとした. TMSの発現は多結晶NiOが作るランダム配向の界面交換磁場によるNi<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>の磁化配列の乱れの発生に起因する. またTMS強度のNiO膜厚依存性は, NiO膜厚増加に伴う界面交換磁場の増大による強磁性体側の磁化配列の乱れの増加で説明される. また, NiOへのスピンの注入によりNiO膜厚増加に伴うパーマロイNi<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>のギルバート緩和定数 $\alpha$ の増加も見られた (図 2(b)). 本章では, FM/AFI二層膜において強磁性層の磁化ダイナミクスが接合する反強磁性相からの交換磁場により大きく影響されることを定量的に示した. 本章の結果は参考文献[39]として発表された.

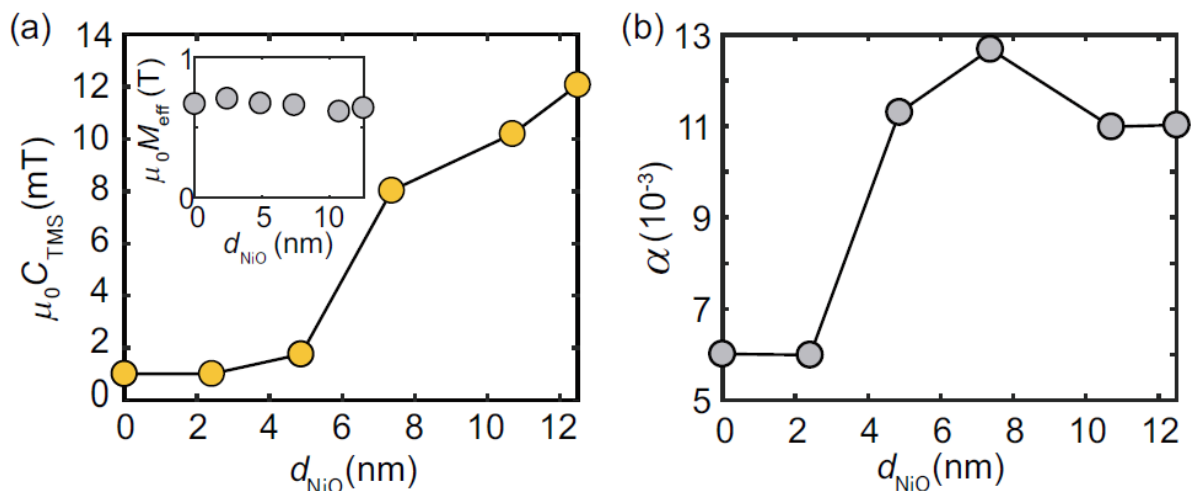


図 2: (a) 2マグノン散乱 (TMS) 強度 $C_{\text{TMS}}$ の $d_{\text{NiO}}$ 依存性. Insetは有効反磁場 $M_{\text{eff}}$ の $d_{\text{NiO}}$ 依存性を示す.  $\mu_0$ は単位を磁束密度にするために掛けられている. (b) パーマロイNi<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>のギルバート緩和定数 $\alpha$ の $d_{\text{NiO}}$ 依存性.

[39] H. Sakimura *et al.*, Phys. Rev. B **98**, 144406 (2018)

## Chapter 4: Magnetic domain observation in FM on various thickness of AFI underlayer

前章で観測されたTMS発現の原因である強磁性層の磁区構造のNiO膜厚 $d_{\text{NiO}}$ 依存性を、Fe/NiO/Sub.試料を用いてSpin polarized low-energy electron microscopy (SPLEEM)により観察した。結果は論文誌に投稿され現在査読中のため公表しない。

## Chapter 5: Determination of intrinsic spin decay length of AFI

スピンプンピング法により $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{NiO}/\text{Pt}/\text{Sub.}$ 系でNiO層を透過するスピン流量のNiO膜厚 $d_{\text{NiO}}$ 依存性からNiOのスピン減衰長を定量した。NiO膜厚は0 ~ 128 nmとした。NiO膜厚増加に伴うTMS増大によるスピン流生成抑制の効果を除外した結果、NiOのスピン減衰長は常磁性で約3 nm、反強磁性で約100 nmという結果を得た(図3)。これは先行研究で報告されていた反強磁性NiOスピン減衰長の10倍の値である。この方法ではFMRで励起された $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 中の磁化ダイナミクスにより注入されたスピン流がNiOを透過しPtに到達する。それがPt中の逆スピンホール効果により電気信号に変換され、透過スピン流量として検出した。また透過型電子顕微鏡(TEM)による試料断面解析から本研究で用いたNiO薄膜はその膜厚に依らずPt上厚さ5 nm程度の地点に粒界が存在し、その上で柱状成長していることがわかった。本研究で得られた透過スピン流量のNiO膜厚依存性はNiOがサイズ効果により室温で常磁性を示す領域と反強磁性を示す領域で滑らかに繋がる挙動を示したが、それはこの粒界を境としたNiO薄膜中の反強磁性秩序の強さの差に起因するものと考えられる。本章の結果は参考文献[113]として発表された。

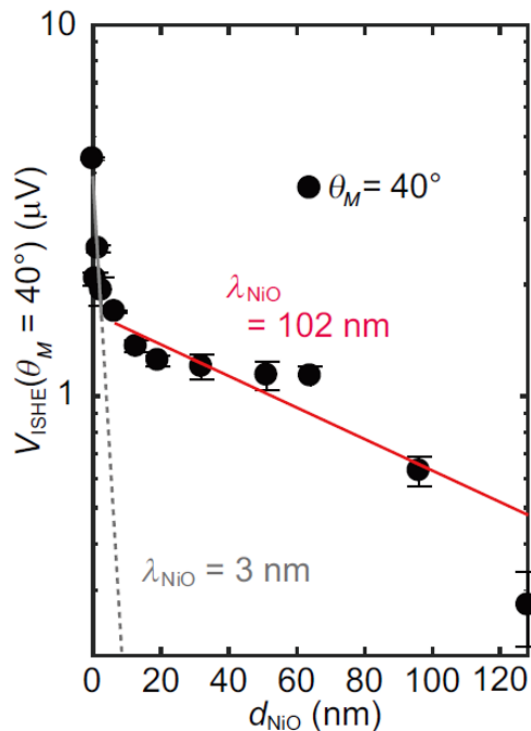


図 3: NiO中のスピン流透過信号 $V_{\text{ISHE}}$ のNiO膜厚 $d_{\text{NiO}}$ 依存性. TMSの効果は取り除かれている. 常磁性 (灰色) ・反強磁性 (赤) NiO中のスピン減衰長 $\lambda_{\text{NiO}}$ を $\exp(-d_{\text{NiO}}/\lambda_{\text{NiO}})$ のフィッティングにより求めた.

[113] H. Sakimura *et al.*, Phys. Rev. Research **1**, 013013 (2019)

## Chapter 6: Conclusions

本研究の成果として、FM/AFI/Ptのような3層膜系でのスピンプンピング法による反強磁性絶縁体中のスピン減衰長測定においてTMSの効果を取り入れることの重要性が示された。それを考慮することで先行研究より1桁大きいスピン減衰長が求めたことから、スピン減衰長測定におけるスピンプンピング法の有用性が示された。以上を以て、本研究の目的である「スピンプンピング法による反強磁性絶縁体中のスピン流伝搬特性の精確な評価方法の確立」に成功したと言える。