

テラヘルツ帯における 反強磁性体磁化ダイナミクスによるスピントロニクスへの変換を実証

—テラヘルツスピントロニクスへ筋道—

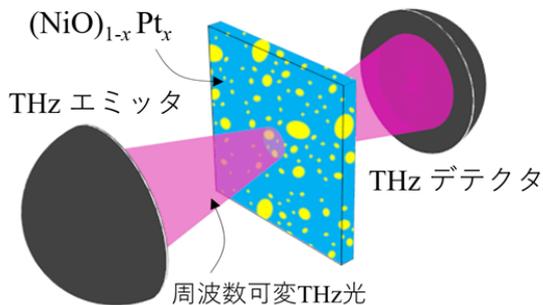
概要

テラヘルツ光・電磁波の利用は将来の大容量通信やセンシング技術を担う重要技術として、注目を浴びています。京都大学化学研究所の森山貴広 准教授、小野輝男 同教授らの研究グループは、岐阜大学工学部の林兼輔 博士課程学生、山田啓介 同助教、嶋睦宏 同教授、大矢豊 同教授、カリフォルニア大学ロサンゼルス校物理学の Yaroslav Tserkovnyak 教授らの研究グループと共同で、テラヘルツ帯の反強磁性共鳴^{注1}によるスピントロニクス効果^{注2}（磁化ダイナミクスからスピントロニクスへの変換現象）を世界に先駆けて実証しました。

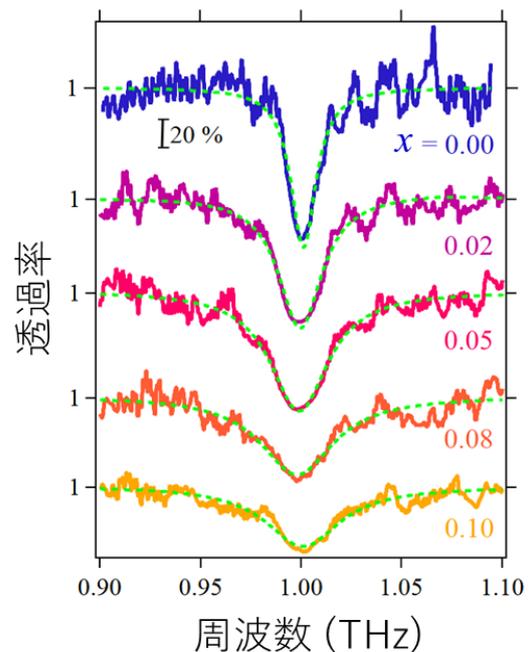
これまでスピントロニクス効果は、強磁性体におけるギガヘルツ帯の磁化ダイナミクスに付随して観測されてきましたが、2桁以上周波数が高いテラヘルツ帯の磁化ダイナミクスを有する反強磁性体では観測されていませんでした。本研究では、反強磁性体である酸化ニッケル中に重金属（HM、白金 Pt やパラジウム Pd）粒子を様々な割合で分散させたグラニューラー構造物質 $(\text{NiO})_{1-x}\text{Pt}_x$ のテラヘルツ透過吸収測定^{注3}を行い、その共鳴スペクトル線幅の変化からスピントロニクス効果を実証し、その多寡を見積もりました。本成果は、テラヘルツ帯においても、磁化ダイナミクスからスピントロニクスへの変換現象を利用できることを示唆するものです。今後、反強磁性体を利用した、テラヘルツ帯で動作可能なスピントロニクスデバイスへの応用が期待されます。

本研究成果は、2020年2月4日（現地時間、日本時間2月5日）に米国の科学誌「Physical Review B: Rapid Communications」にオンライン公開されました。

(a) $(\text{NiO})_{1-x}\text{Pt}_x$ グラニューラー構造物質の
テラヘルツ分光



(b) $(\text{NiO})_{1-x}\text{Pt}_x$ の共鳴スペクトル



1. 背景

テラヘルツ光・電磁波の利用は将来の大容量通信やセンシング技術を担う重要技術として、近年注目を浴びています。特に、ポスト 5 G における通信周波数はテラヘルツ帯域が想定されており、これらの周波数帯に対応するデバイスの開発・創製が早急に望まれています。ギガヘルツ帯に共鳴周波数を持つ強磁性体は従来のマイクロ波デバイスに多用されています。しかしながら、テラヘルツ帯においてはほとんど応答しないため、これらのデバイス応用には強磁性体は不向きです。一方で、反強磁性体における磁気共鳴（反強磁性共鳴）周波数は交換結合^{注4}に起因する交換磁場に比例するため、強磁性体に比べて圧倒的に高くなり、テラヘルツ帯に至ることが知られています（図 1）。また、近年様々なテラヘルツ材料が提案されていますが、反強磁性体を利用するメリットとしてスピントロニクス^{注5}との親和性が挙げられます。反強磁性体に内在するスピン自由度とテラヘルツ光との相互作用を利用することで、新規な“テラヘルツ”スピントロニクスデバイスへと展開できる可能性を秘めています。このような魅力的な可能性があるにもかかわらず、テラヘルツスピントロニクスを見据えた反強磁性ダイナミクスの実験的研究はほとんどありませんでした。

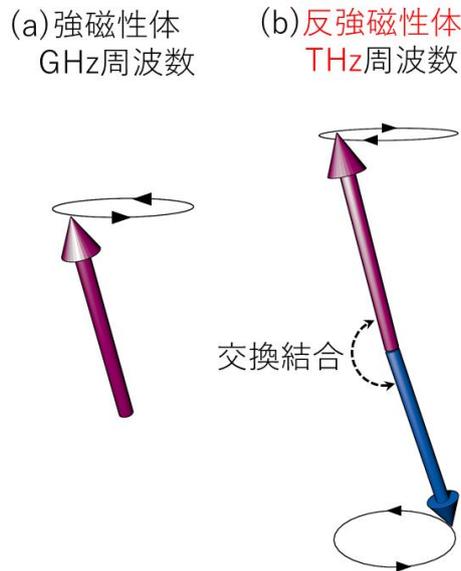


図 1 : (a) 強磁性磁化ダイナミクスと(b)反強磁性磁化ダイナミクスの概念図

2. 研究手法・成果

本研究では、1 テラヘルツ (THz) 付近に共鳴周波数を有する反強磁性体・酸化ニッケル(NiO)に着目し、反強磁性磁化ダイナミクスからスピン流への変換現象（スピンプンピング効果）について調査しました。まず、酸化ニッケル中に重金属（HM、白金 Pt やパラジウム Pd）粒子を様々な割合で分散させたグラニューラ構造物質((NiO)_{1-x}HM_x)を焼結法により作製しました。これらの試料に対して、図 2 (a)に示したようなテラヘルツ透過吸収測定を周波数を変化させて行いました。この試料系におけるスピンプンピング効果の理論概念図を図 2 (b)に示します。NiO の反強磁性磁化ダイナミクスにより、スピン流 (I_s^{pump}) が生成され、重金属粒子 (Pt, Pd) に注入されて、重金属中にスピン蓄積が起きます。これらの重金属はスピン軌道相互作用^{注6}が強いいため I_s^{pump} のほとんどは散逸し、残った僅かなスピン蓄積によりスピン流の逆流 (I_s^0) が起きます。反強磁性磁化ダイナミクスのダンピング定数^{注7}は、スピン流の絶対値 ($|I_s^{\text{pump}}|$) とその逆流の絶対値 ($|I_s^0|$) の差、すなわち重金属でのスピン散逸の大きさに比例して増加することが理論的に知られています。つまり、グラニューラ

一物質中の重金属の割合を増加させてスピン散逸が増加するに従い、NiO の磁化ダイナミクスへのダンピング定数は大きくなるのが予想できます。

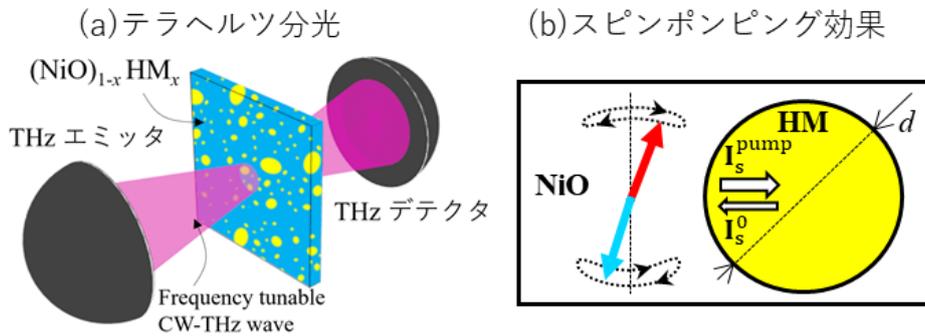


図 2 : (a)テラヘルツ分光の模式図(b)反強磁性磁化ダイナミクスによるスピンプンピング効果の理論概念図

一般に、反強磁性磁化ダイナミクスのダンピング定数は、反強磁性共鳴のスペクトル線幅から見積もることができます。テラヘルツ透過吸収測定から得られた $(\text{NiO})_{1-x}\text{Pt}_x$ の共鳴スペクトルを図 3 に示します。ちょうど 1THz に NiO の反強磁性共鳴による吸収ピークを観測しました (図 3(a))。また、共鳴周波数は Pt の組成比 x に因らず一定であるのに対して、共鳴スペクトル線幅は x の増加に従って大きくなっていることが分かりました (図 3(b))。これは、スピンプンピング効果の理論予想と一致しており、確かにテラヘルツ帯の反強磁性スピンダイナミクスにおいてもスピンプンピング効果が起こることを実証した結果です。さらに、図 3(b) に示したスペクトル線幅およびダンピング定数の x 依存性から、スピンプンピング効果の多寡を決定するパラメータであるスピンミキシングコンダクタンスを求めたところ、Pt と Pd それぞれにおいて 12nm^{-2} および 5nm^{-2} という値が得られました。これらは、強磁性体におけるスピンプンピング効果と同程度の大きな値です。

本成果は、反強磁性共鳴を利用したテラヘルツ帯におけるスピンプンピング効果 (磁化ダイナミクスからスピン流への変換現象) を世界に先駆けて実証したものであり、反強磁性磁化ダイナミクスとスピン自由度の相互作用の一端を明らかにしました。

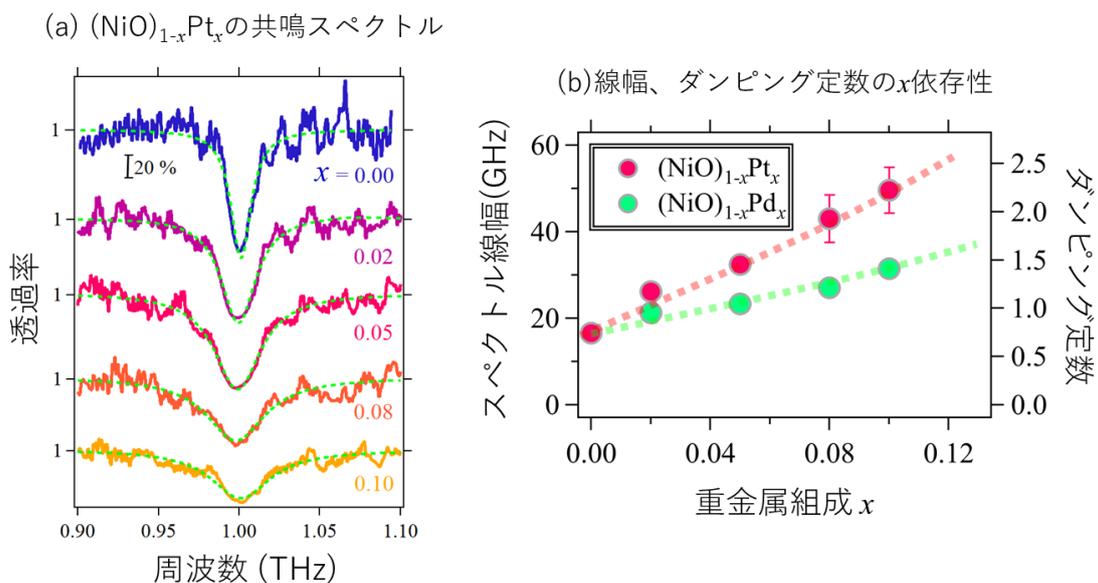


図 3 : (a) $(\text{NiO})_{1-x}\text{Pt}_x$ の共鳴スペクトル (b) スペクトル線幅およびダンピング定数の重金属組成 x 依存性

3. 波及効果、今後の予定

近年、反強磁性体の特質を積極的に利用した反強磁性スピントロニクス^{注8}の研究が盛んに行われています。様々な興味深いスピン物性が明らかになっており、反強磁性体を用いたスピンメモリデバイスなども提案されています^[参考文献]。本成果で実証した反強磁性ダイナミクスによるスピンプンピング効果は、様々な形で発現する磁化ダイナミクスと電子スピンの相互作用のあくまで一端ですが、テラヘルツデバイスにおける反強磁性体の可能性を示した重要な成果です。今後は、反強磁性体に内在するスピン自由度とテラヘルツ光との相互作用を積極的に利用した新規な“テラヘルツ”スピントロニクスへと展開していきます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究の一部は、科研研究費補助金「特別推進研究」、「若手研究 (A)」、「新学術領域研究：ナノスピン変換科学」、スピントロニクス学術研究基盤連携ネットワークの助成を受けて行われました。

<用語解説>

注1 反強磁性共鳴：反強磁性体は隣り合う磁気モーメントがそれぞれ反平行に結合している磁性体です。一方の磁気モーメントはもう一方の磁気モーメントから強い交換結合^{注4}による交換磁場を受けるため、これらの集団的な磁気モーメントの運動 (=磁化ダイナミクス) の共鳴はテラヘルツ周波数に達します。

注2 スピンプンピング効果：磁化ダイナミクスにより電子スピンの流れ (=スピン流) が生成される現象。

注3 テラヘルツ透過吸収測定：テラヘルツ周波数帯の光を試料に照射し、試料を透過した光の強度を測る手法です。共鳴が起こると試料内でその周波数の光が吸収されるので透過率が下がります。

注4 交換結合：電子の軌道の重なりにより、磁気モーメントを担う電子スピン間に作用する非常に強い結合のことです。強磁性体の場合、交換結合は隣り合う磁気モーメントを平行に揃えます。反強磁性体の場合は隣り合う磁気モーメントを反平行に揃えるように働いています。この結合エネルギーを仮想的に磁場に変換したものを交換磁場と呼びます。反強磁性体 NiO の場合 1000 テスラにも達します。

注5 スピントロニクス：電子のスピン自由度を利用することで、従来のエレクトロニクスに無い新機能・高性能素子の実現を目指す研究分野です。

注6 スピン軌道相互作用：電子の軌道角運動量と電子のスピンとの相互作用。電子スピンの流れであるスピン流が散逸される要因となります。

注7 ダンピング定数：磁化ダイナミクスの減衰を表わす定数。スピンプンピング効果により磁性体からのスピン流が散逸されると、それに応じて磁化ダイナミクスの減衰が大きくなります (=ダンピング定数が大きくなります)。

注8 反強磁性スピントロニクス：反強磁性体の外部磁場耐性や超高速ダイナミクス、材料群の豊富さを積極的に生かして、超高密度・超高速スピントロニクス素子等の新規デバイスを目指した研究分野。近年、反強磁性

体スピントロニクスの研究が国内外問わず盛んにおこなわれています。

<参考文献>

V. Baltz, A. Manchon, M. Tsoi, T. Moriyama, T. Ono, and Y. Tserkovnyak, "Antiferromagnetic spintronics" Review of Modern Physics 90, 015005 (2018).

<論文タイトルと著者>

タイトル：Enhanced antiferromagnetic resonance linewidth in NiO/Pt and NiO/Pd

著者：Takahiro Moriyama, Kensuke Hayashi, Keisuke Yamada, Mitsuhiro Shima, Yutaka Ohya, Yaroslav Tserkovnyak, and Teruo Ono

掲載誌：Physical Review B 101, 060402(R) DOI : 10.1103/PhysRevB.101.060402