

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14399

研究課題名（和文）2次元反強磁性体界面のスピン効果

研究課題名（英文）Spin effect in two-dimensional antiferromagnet interface

研究代表者

井土 宏（Idzuchi, Hiroshi）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・特任准教授

研究者番号：20784507

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では2次元物質における反強磁性相に着目し、その界面におけるスピン効果を対象としている。特に2次元反強磁性体のもつ高い結晶性と、そのヘテロ界面を利用することでその素励起（反強磁性マグノン）や秩序パラメータとどのように相関するかを追及している。電気的検出手法を駆使することで、界面にけるスピン効果を確実にとらえることに成功している。そして、予想された反強磁性相の効果を超えて、新しい現象を見つけ、新しい概念を導入することで理解することができた。さらにその枠組みを複数の物質に援用することで新奇な物性開拓を行うことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピントロニクス分野において従来基幹をなしていた強磁性体と比べて、本研究で対象とした反強磁性体では、その磁化ダイナミクスのスピードが2～3桁高く、高速動作が期待できる。このような反強磁性体において、その信号を電気的に検出し、反強磁性特有の性質を明らかにできたことは、将来のスピントロニクスデバイスの原理を考究するうえで重要なものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：We study antiferromagnetic phase in two dimensional material and focus on the spin effect at the interface. Particularly, high crystalinity in two-dimensional antiferromagnet and heterointerface were used to study how excitation (antiferromagnetic magnon) and order parameter should be correlated to the interfacial spin effect. By using electric detection method, we succeeded in detecting interfacial spin effect. Further, we found new phenomena over the expected effect in antiferromagnetic phase and understand it by introducing new concept. We succeeded in applying the framework to multiple materials.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス 二次元物質 反強磁性

1. 研究開始当初の背景

近年、強磁性体超格子の巨大磁気抵抗に始まり、スピン軌道相互作用やトポロジカル物性を用いた多彩なスピントロニクス現象が発見されている。スピントロニクス研究が、伝導電子のスピン依存伝導に始まり、スピン角運動量・スピン流一般の物性へと発展したことは記憶に新しい。一方、反強磁性体に特有のスピントロニクス研究は長らく下火であった。反強磁性体は高温超電導体や種類の量子物質の母相でもあり現代物理学の重要な物質群において広く見られるが、その磁場に対する反応性の低さから実験的な研究には大きな制約があった。

このようなスピントロニクス研究の歴史から、界面におけるスピン依存した現象(スピン依存伝導、スピン角運動量の変換、スピン依存した素励起の発現など)が全てを通じて底流をなす、核として機能していることに着目した。従って反強磁性におけるスピントロニクス効果において、界面におけるスピン効果を明らかにすることができれば、分野の発展に大きく貢献できることを考えた。言い換えると、反強磁性体の中心をなす現象である反強磁性素励起(反強磁性マグノン)及び秩序パラメーターが、界面におけるスピン効果とどのように相関するかが学理として重要であり、本研究課題ではその点に焦点をしばり追求することとした。

2. 研究の目的

本研究課題では2次元物質における反強磁性相に着目し、その界面におけるスピン効果を対象とした。特に2次元反強磁性体のもつ高い結晶性と、そのヘテロ界面を利用することでその素励起(反強磁性マグノン)や秩序パラメータとどのように相関するかを追及することを目的とした。

3. 研究の方法

試料は、2次元反強磁性体単結晶を劈開して作製した。劈開する元の単結晶は、共同研究者から提供のものと、市販のものを双方利用した。これらはChemical vapor transport法により用意された。この単結晶にスコッチテープ法を用いることで、シリコン基板上に薄片を準備した。この試料に異なる厚さをもつヘテロ接合、特にスピン軌道相互作用が大きな貴金属を用いた細線とのヘテロ構造を生成した。

Raman顕微測定により結晶性の評価を行い、試料作製の途中での劣化を検証した。高い結晶性を有する2次元反強磁性体ヘテロ構造を様々な膜厚で測定できることが分った。

4. 研究成果

2次元反強磁性体相を持つ物質を、プラチナと接合し、その界面の輸送現象を通じてスピン物性を検出する実験を行った。まず、この系において、面内磁場下の伝導度の角度依存性が、特徴的な振動を示すことを明らかにした(図1)。特に、その振動位相から、強磁性相ではなく、反強磁性相において期待される信号と合致することを明らかにした。2次元物質のない(プラチナ層のみの)試料を参照試料として行った同様の実験(図2)とは、特徴的な信号は有意に異なることを明らかにした。温度依存性と磁場依存性から、さらに反強磁性相に特徴的な信号を検出出来ていることが分った。複数の試料について行った実験から再現性を確かめた。

一方で、温度依存性と磁場依存性を詳細にみると、反強磁性では解釈しきれない特徴を有することが、複数の試料から明らかになった。スピン秩序が壊れたと相においても一定の信号を得ることができ、反強磁性秩序を一般化し、磁場印可方向に直行する量子化軸を有する、という概念(図3)により、磁気秩序も磁気超格子も存在しない場合を理解できることを明らかにした。

またこの概念は、振動信号を生じさせうることを明らかにした。これは、スピン秩序が壊れた相においても一定の信号を得ることができる、重要なプローブを同定したことを意味している。これにより、一般化したスピン異方性をもとに、反強磁性スピン秩序が壊れた相とのクロスオーバーや、従来捉えがたかった転移温度の測定などへと発展できることを明らかにした。

スピン秩序が壊れた相に関して、共同研究者との議論を精力的にすすめた。この概念をさらに進めて、別の物質系において、従来電氣的に検出することが難しかった磁気状態の検出についても進めた(図4)。また、新たな共同研究者と、そのような試料の光学的な評価も行い、結晶軸と異方性の関係を議論したが、明快な関連は得られなく、別の原因があると結論づけた。

本研究においては、2次元反強磁性体を舞台として、電気的検出手法を駆使することで、界面にけるスピン効果を確実にとらえることに成功している。予想された反強磁性相の効果を超えて、新しい現象を見つけ、加えて新しい概念を導入することで理解することができた。さらにその枠組みを複数の物質に援用することで新奇な物性開拓を行うことができた。

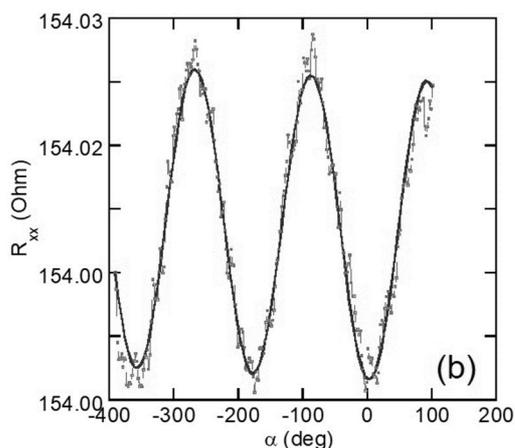


図1 2次元反強磁性相における電導度の角度依存性。明瞭な振動信号を観測している。

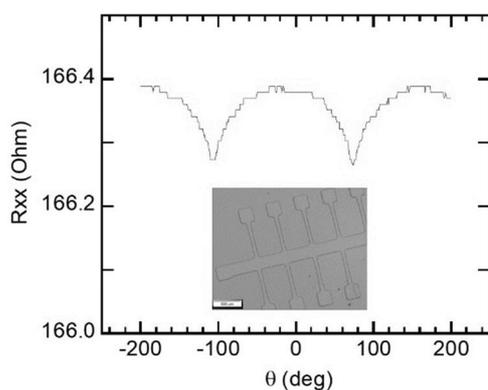


図2 参照信号における電導度の角度依存性。図1とは異なる。内挿図は試料の光学顕微鏡像でスケールバーは500umを表している。

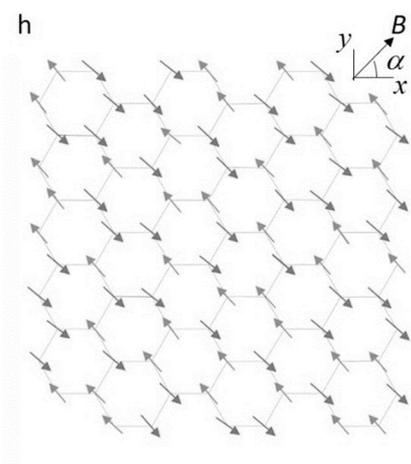


図3 反強磁性秩序を一般化した、磁場印可方向に直行する量子化軸を有する状態の1例。

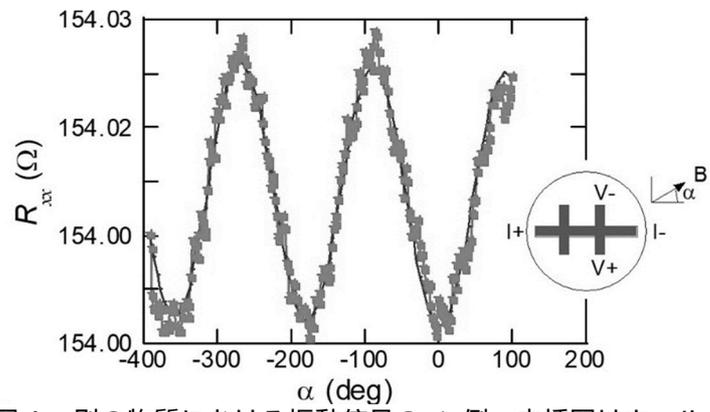


図4 別の物質における振動信号の1例。内挿図はホールバーの測定端子配置と磁場印可方向を示している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

| | |
|---|--------------------------|
| 1. 著者名 A. E. Llacsahuanga Allcca, H. Idzuchi, X. C. Pan, K. Tanigaki, Y. P. Chen | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 Modified magnetism in heterostructures of Cr ₂ Ge ₂ Te ₆ and oxides | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 AIP Advances | 6. 最初と最後の頁 015031-1-5 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/9.0000413 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |

| | |
|---|--------------------------|
| 1. 著者名 H. Idzuchi, S. Iihama, M. Shimura, A. Kumatani, S. Mizukami, Y. P. Chen | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Spin injection characteristics of Py/graphene/Pt by gigahertz and terahertz magnetization dynamics driven by femtosecond laser pulse | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 AIP Advances | 6. 最初と最後の頁 015321-1-5 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/9.0000114 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 井土宏, 木俣基, S. Okamoto, P. Laurell, N. Mohanta, A. Banerjee, Y. P. Chen |
| 2. 発表標題 -RuCl ₃ ヘテロ構造におけるスピン依存伝導：強いスピン異方性の観測 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 H. Idzuchi, A. E. Llacsahuanga Allcca, X. C. Pan, K. Tanigaki and Y. P. Chen |
| 2. 発表標題 Increased Curie temperature and enhanced perpendicular magneto anisotropy of Cr ₂ Ge ₂ Te ₆ /NiO heterostructures |
| 3. 学会等名 MMM 2020 Virtual Conference（国際学会） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 H. Idzuchi, S. Iihama, M. Shimura, A. Kumatani, S. Mizukami, Y. P. Chen |
| 2. 発表標題 Spin injection characteristics of Py/Graphene/Pt by means of THz measurement and spin pumping |
| 3. 学会等名 MMM 2020 Virtual Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 井土宏, 木俣基, S.Okamoto, Y. P. Chen |
| 2. 発表標題 -RuCl3ヘテロ構造におけるスピン依存輸送 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 A. E. Llacahuanga Alilcca, H. Idzuchi, X. C. Pan, K. Tanigaki and Y. P. Chen |
| 2. 発表標題 Wrinkle formation and its effect on the magnetic properties of Cr ₂ Ge ₂ Te ₆ /NiO heterostructures |
| 3. 学会等名 APS March meeting 2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|