

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H05840・19K21030

研究課題名(和文) 2次元ファンデルワールス・トリカルコゲナイト磁性体のスピン検出

研究課題名(英文) Spin detection in two-dimensional van der Waals magnetic trichalcogenide

研究代表者

井土 宏 (Idzuchi, Hiroshi)

東北大学・材料科学高等研究所・助教

研究者番号：20784507

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：近年、ディラック電子系の新奇な物性や、物質のトポロジカルな側面と物性との関係性が注目を浴びている。しかしながら従来は、その磁性との関係は未解明であった。本研究ではDirac電子系の物理と、遷移金属元素のd電子に起因する磁性が共存する、原子層薄さの2次元ファンデルワールス・トリカルコゲナイト磁性物質群に着目し、そのスピン物性の研究を行った。本研究ではこのような物質群を舞台に特に反強磁性体のスピン物性に注目し、従来の手法では検出が難しかった微小薄片におけるスピン物性の検出をスピントロニクス手法により実現できた。また反強磁性界面を用いた2次元磁性体における転移温度上昇を観測した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2010年のノーベル物理学賞に象徴されるように、グラフェンに代表される2次元ファンデルワールス物質は、高い結晶性をもち且つ単原子層薄さの試料を容易に作製できる層状物質であるため、基礎応用両面から近年着目されている。反強磁性体のスピン物性の検出を捉えた本研究成果は、2次元磁性体の磁気物性に迫る学術的意義をもつ。また磁気転移温度の上昇を観測し、科学技術の側面からも意義のある成果と考えられる。

研究成果の概要(英文)：In recent years, the novel physical properties of Dirac electronic systems and the relationship between the topological aspects of materials and physical properties have attracted attention. However, conventionally, the relationship with the magnetism has not been clarified. In this study, we focus on the atomic layer thin two-dimensional van der Waals trichalcogenide magnetic substance group in which the physics of the Dirac electron system and the magnetism due to the d-electrons of transition metal elements coexist, and their spin properties are studied. In this research, we focused on the spin physical properties of antiferromagnetic materials in such a group of materials, and we were able to detect the spin physical properties of minute thin slices by spintronics method, which was difficult to detect by conventional methods. We also observed an increase in transition temperature in a two-dimensional magnetic material using an antiferromagnetic interface.

研究分野：2D material, spintronics

キーワード：2D material magnetism spintronics

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、ディラック電子系の新奇な物性や、物質のトポロジカルな側面と物性との関係性が注目を浴びている。しかしながら従来は、その磁性との関係は未解明であった。本研究では Dirac 電子系の物理と、遷移金属元素の  $d$  電子に起因する磁性が共存する、原子層薄さの 2 次元ファンデルワールス・トリカルコゲナイド磁性物質群 ( $\text{NiPS}_3$  等) に着目する。この物質群は、多くの場合絶縁反強磁性の基底状態を取る。磁性が最も重要な物性でありながら、旧来は、原子層薄さの絶縁体単結晶薄片のスピン状態の実験的検出が、試料サイズ(数マイクロ四方)の制約により極めて困難であるという、根本的ジレンマがあった。本研究では最新のスピントロニクス研究の知見を生かし、ナノ構造における反強磁性体のスピン物性の電気的検出を可能とする。これにより上記物質群のスピン物性を明らかにすると共に、将来的にはモット絶縁体等の幅広い反強磁性体に対する重要な物性開拓の手法の原型になることを期待する。

### 2. 研究の目的

2010 年のノーベル物理学賞に象徴されるように、グラフェンに代表される 2 次元ファンデルワールス物質は、高い結晶性をもち且つ単原子層薄さの試料を容易に作製できる層状物質であるため、近年着目されている。特にハチの巣状の格子においてはディラック電子をはじめとする新奇な物性が報告されている。本研究ではこのような物質群を舞台に特に反強磁性体のスピン物性に注目する。これらの原子層薄さの絶縁体薄片は試料サイズが数ミクロン程度となるため、中性子散乱などの従来手法では検出が難しかった。そこで本研究ではスピントロニクス手法によりスピン物性を検出する事を目的とする。

### 3. 研究の方法

2 次元ファンデルワールス物質のスピン物性を、界面を通じたスピンホール効果を用いて電気的に検出を行った。スピンホール効果を用いるために、反強磁性体ファンデルワールス物質と Pt の高品質な接合を作製した。特に、反強磁性体のスピンを検出するために、Pt へと損失の少ない伝達を実現するために、原子レベルで平坦な接合の作製を行った。反強磁性ファンデルワールス物質を機械的に Pt 薄膜上に配置、および反強磁性ファンデルワールス物質上に Pt を成膜した。ファンデルワールス物質薄片とヘテロ構造を原子間顕微鏡により評価した。また 2 次元ファンデルワールス反強磁性体物質で素子作製のために十分大きな面積の平坦なエリアをもつ結晶薄片を作製できることを確認した。金属層の成膜において異なる膜厚の試料を作製した。電気伝導測定を行い、スピン伝導測定の試料に用いるための条件を全て満たす膜厚が存在することを確認した。このような膜厚領域における製膜の再現性を確認した。

### 4. 研究成果

原子間力顕微鏡を用いた評価は測定に時間がかかるため、光学顕微鏡像におけるコントラストの微細な変化に着目して、良好な試料を効率的に選択することができた。2 次元反強磁性体ファンデルワールス物質の薄片を Raman 顕微鏡により評価した。明瞭な Raman ピークから結晶性を確認した。原子間力顕微鏡を用いて膜厚を測定し、光学コントラスト・膜厚・Raman スペクトルの関係を確認できた。原子レベルで薄い領域においては膜厚により Raman スペクトルが堅調に変化することが確認された。Raman 顕微鏡を用いて Raman ピークを測定し、作製試料の結晶性を確認するとともに、酸化プロセスや空気中水分との反応に関する知見も収集した。素子作製に必要な、試料の経時変化・薬品中でのダメージ・熱によるダメージについて評価を行ったが特に問題となる大きなダメージは検出されなかった。これらにより、平坦性の高い反強磁性ファンデルワールス物質と金属界面の作製手法を確立した。

リソグラフィーとリフトオフ法により電極を作製し、磁気抵抗を測定した。当課題で着目している 2 次元反強磁性体はスピンを変調するために必要とする磁場強度は大きい。そこで全国共同利用施設の強磁場装置を利用するために課題の申請を行い、採択された。強磁場での磁気抵抗測定を行った。反強磁性転移温度付近で異常を測定することに成功した。温度、磁場、磁場角度などを制御し、当該現象発現の機構を実験的に調べ

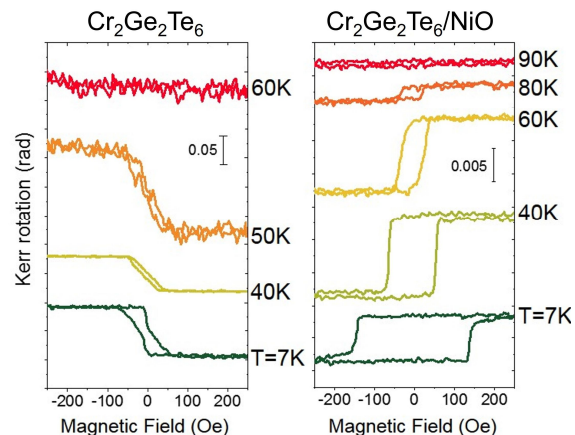


Fig. 1. Hysteresis curves in magneto optical Kerr effect (Kerr rotation) for  $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$  flake with and without NiO at various temperature.

た。複数の試料を測定することで、再現性を確かめた。

また、本研究課題の 2 次元反強磁性トリカルコゲナイトの界面スピン効果を拡張した発想として、反強磁性界面を用いた 2 次元磁性体の研究も追加して行った。2 次元強磁性体  $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$  の強磁性転移温度を低温磁気光学効果を用いて調べ、反強磁性体とのヘテロ構造を用いる事で転移温度の上昇を実現した(図 1)。当初予期していなかった方向性ではあるが、2 次元強磁性体の転移温度の上昇は、分野の中心的課題であり、重要な成果と考えられる。

これらの研究成果を国内外の学会で発表・議論を行い(ただし国際学会はコロナウイルスの影響で中止)、原著論文での発表を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

|   |                          |
|---|--------------------------|
| 1. 著者名<br>H. Idzuchi, A. E. Llacsahuanga Allcca, X. C. Pan, K. Tanigaki, and Y. P. Chen   | 4. 巻<br>115              |
| 2. 論文標題<br>Increased Curie temperature and enhanced perpendicular magneto anisotropy of Cr <sub>2</sub> Ge <sub>2</sub> Te <sub>6</sub> /NiO heterostructures | 5. 発行年<br>2019年          |
| 3. 雑誌名<br>Applied Physics Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>232403-1-5 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1063/1.5130930  | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する             |

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>H. Idzuchi, A. E. Llacsahuanga Allcca, X. C. Pan, K. Tanigaki, and Y. P. Chen |
| 2. 発表標題<br>2次元磁性体Cr <sub>2</sub> Ge <sub>2</sub> Te <sub>6</sub> 界面の誘起する強磁性転移温度上昇        |
| 3. 学会等名<br>応用物理学会春季学術講演会   |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>H. Idzuchi, A. E. Llacsahuanga Allcca, X. C. Pan, K. Tanigaki, and Y. P. Chen |
| 2. 発表標題<br>2次元磁性体Cr <sub>2</sub> Ge <sub>2</sub> Te <sub>6</sub> /酸化物2層膜の磁気特性            |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 2019年秋季大会  |
| 4. 発表年<br>2019年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

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