



Title	Spin transport properties in van der Waals materials measured with lateral spin valves
Author(s)	中村, 瞭弥
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/105638
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 (中村 瞭弥)	
論文題名	Spin transport properties in van der Waals materials measured with lateral spin valves (横型スピバルブで評価するファンデルワールス物質のスピン輸送特性)
論文内容の要旨 スピントロニクス分野では、PtやTaといった重金属が長年利用されてきたが、近年、単結晶特有の性質を示すファンデルワールス (vdW) 物質が注目を集めている。将来的な応用には、スピン拡散長やスピンホール伝導度といったスピン輸送特性を定量的に評価することが不可欠である。しかし、vdW物質を用いた既存のスピン輸送特性評価手法には課題が存在する。第一に、vdW物質は面内方向と面直方向の間に大きな異方性を有するが、既存研究の多くは等方的な伝導度を仮定しており、異方性が無視されている。したがって、異方的なスピン流拡散プロセスを考慮した評価手法が必要である。第二に、スピン流の注入効率を左右するvdW物質と電極間の界面特性が挙げられる。従来の研究ではvdW物質を積層させたヘテロ構造が盛んに用いられてきたが、高い界面抵抗の存在により、物質固有のスピン輸送特性を抽出することは極めて困難であった。 そこで本研究では、これらの課題に対処するために、vdWディラック半金属PtTe₂とvdW強磁性体Fe₃GeTe₂ (FGT) に着目した。スピン輸送特性の定量的評価にあたっては、局所電流や磁気近接効果によるアーティファクトを排除可能な横型スピバルブを採用した。 まず、PtTe₂におけるスピン吸収量と逆スピンホール効果を測定した。解析にあたり、従来等方的な系で用いられてきたスピン拡散方程式を、異方的な系へと拡張した理論モデルを構築した。このモデルと3次元有限要素法を組み合わせることで、面内および面直方向のスピン拡散長、ならびにスピンホール伝導度を正確に抽出した。解析の結果、従来の等方性モデルを用いた場合、面直方向のスピン拡散長およびスピンホール伝導度を実際よりも過大評価する傾向があることが明らかになった。また、スピンホール伝導度の電気伝導度依存性を解析した結果、電気伝導度の増加に伴い、スピンホール効果の起源がバンド構造に由来する内因性機構から、不純物散乱が支配する外因性機構へとクロスオーバーする振る舞いが観測された。 次に、vdW強磁性体FGTのスピン輸送特性を測定した。FGTとCuの間に清浄な界面を実現するために、素子作製プロセスにおいてArイオンミリングを行った。界面抵抗およびスピンミキシングコンダクタンスの定量的評価により、清浄な界面が形成されていることを確認した。一方で、FGTのバルクのキュリー温度 (230 K) よりも高い室温において、予期せず面内スピン偏極信号が観測された。異常ホール効果測定により、室温において自発磁化は観測されなかったため、この信号はArイオンミリングによって変性した表面磁化に起因すると結論づけた。温度依存性から、この表面層は低温ではバルクFGTと磁氣的に結合しつつも、室温では外部磁場に応答する軟磁性的な振る舞いを示すことが明らかになった。これらの結果は、従来の表面処理プロセスがvdW物質の表面物性に対して重大な影響を与えることを示唆している。 本研究を通じて明らかになった異方性の寄与や表面処理のリスクは、今後のvdWスピントロニクスデバイスを設計、評価する上で重要な指針を与えるものである。	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (中 村 瞭 弥)		
論文審査担当者	(職)	氏 名
	主 査 教授	新見 康洋
	副 査 教授	松野 丈夫
	副 査 教授	越野 幹人
	副 査 准教授	越智 正之
	副 査 准教授	高田 真太郎

論文審査の結果の要旨

電子の電荷とスピンを積極的に用いるスピントロニクスの研究分野では、効率的にスピン流を生成、検出する手法として、スピン軌道相互作用の強い金属で生じるスピンホール効果が用いられてきた。近年、単結晶の特性を活用できるファンデルワールス物質が注目を集めている。ファンデルワールス物質の将来的な応用には、スピン拡散長やスピンホール伝導度といったスピン輸送特性を定量的に評価することが不可欠である。しかし、ファンデルワールス物質を用いた既存の研究には問題点がある。一つ目に、ファンデルワールス物質は面内方向と面直方向の間に大きな異方性を有するが、ファンデルワールス物質をスピントロニクス研究に用いた先行研究では、異方的なスピン流拡散プロセスが検討されていない。二つ目に、スピン流を注入する物質とファンデルワールス物質との界面にも問題がある。この界面抵抗が大きな場合は、内因的なスピン輸送特性の評価が極めて困難になる。そこで中村氏は上記の問題を解決するために、ファンデルワールス・ディラック半金属 PtTe_2 とファンデルワールス強磁性体 Fe_3GeTe_2 に着目した。これらのファンデルワールス物質を横型スピンバルブ素子に組み込み、スピン吸収量や逆スピンホール効果を測定することで、スピン輸送特性を定量的に評価した。

まず、 PtTe_2 におけるスピン吸収量と逆スピンホール効果を測定した。その解析にあたり、これまで等方的な系で用いられてきたスピン拡散方程式を、異方的な系へと拡張した理論モデルを構築した。このモデルと 3 次元有限要素法を組み合わせることにより、面内および面直方向のスピン拡散長、およびスピンホール伝導度を正確に抽出した。解析の結果、従来の等方性を仮定したモデルでは、面直方向のスピン拡散長およびスピンホール伝導度を過大評価する傾向があることが明らかになった。また、スピンホール伝導度の伝導率依存性を解析した結果、伝導率の増加に伴い、内因性機構から外因性機構へとクロスオーバーする振る舞いが観測された。特にスピンホール伝導度を、単純に面内の伝導率でプロットするのではなく、面内伝導率と面間伝導率の積でプロットすることで、内因的なスピンホール伝導度とスキュー散乱による外因的なスピンホール伝導度の切り分けにも成功した。

次に、ファンデルワールス強磁性体 Fe_3GeTe_2 のスピン輸送特性を測定した。アルゴンミリングを行うことで、 Fe_3GeTe_2 とスピン流伝播物質として用いられる Cu との間の清浄界面を実現した。その一方で、 Fe_3GeTe_2 のバルクのキュリー温度 (230 K) よりも高い室温において、面内スピン偏極が観測された。室温において自発磁化は観測されなかったため、この面内スピン偏極はアルゴンミリングによって変性した表面磁化に起因すると結論づけた。この結果は、従来の表面処理がファンデルワールス物質の表面に対して重大な影響を与えうることを示唆している。

本研究は、ファンデルワールス物質を用いたスピン輸送測定において、この物質群に特有な大きな異方性の問題や表面処理の影響を明瞭に示しただけでなく、今後のファンデルワールス・スピントロニクスデバイスを設計、評価する上で重要な指針を与えるものである。以上の理由から、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。