

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K19014

研究課題名（和文）スピン輸送現象の実空間その場観察手法の開発

研究課題名（英文）Development of in situ Real Space Observation Method of Spin Transport

研究代表者

保原 麗（Hobara, Rei）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・特任研究員

研究者番号：30568176

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000円

研究成果の概要（和文）：スピン圧を「局所的」かつ「電氣的」に簡便に計測できるプローブの開発を目指し研究を行った。磁性体・非磁性体界面でのスピン蓄積を使うことを利用することで電氣的に検出できることを実証した。通常金属による接触では定量的な計測が困難であることが判明した。これはプローブ先端の実効的な接触面積の変動が大きく、スピン拡散が擾乱されるためであり、表面に保護層を作ることによって改善されるであろうことがわかった。保護層としては、丈夫で、大気中で参加されず、スピン拡散長が長く、キャリアが多い物質が必要であり、グラフェンや多層グラフェンでの実現可能性を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピンを使ったテクノロジーはスピントロニクスと呼ばれており、高速かつ低消費電力の電子デバイスへとつながる次世代の技術と期待されているが、その測定技術は通常電子技術に比べて拙い。スピン圧を検出するプローブ作成の端緒を得たことは、いまだほとんど手がついていないスピンの動的挙動やスピン輸送現象の解明に貢献し、新たなスピン物性やスピン材料科学への足掛かりとなり、スピントロニクスの発展に寄与すると考えている。

研究成果の概要（英文）：Our research is aiming to develop a special probe that can measure spin pressure "locally" and "electrically" with ease. We demonstrated that spin accumulation can be electrically detected at the interface between a ferro and a non-magnetic material. However, it became clear that quantitative measurement is difficult with conventional metal contacts. This difficulty came from the variations of the effective contact area of the probe apex, which cause spin diffusion amount change. We found that this issue could be improved by creating a protective layer on the probe. The protective layer needs to be durable, resistant to oxidation in the atmosphere, have a long spin diffusion length, and a high carrier density. We identified the feasibility of achieving these conditions with graphene or multilayer graphene.

研究分野：表面物理

キーワード：スピン SPM プローブ グラフェン

### 1. 研究開始当初の背景

スピン角運動量の流れやスピン偏極した電子の流れであるスピン流は、基礎物理・応用物理の両面で大きな関心を寄せられ、世界中で研究競争が行われており、現在でもそれは継続している。従来のスピン流計測は「微細加工で基板上に生成されたスピン流回路」により、「微細加工で基板上に生成されたデバイス」を測るものであり、大気暴露できない試料や物質表面におけるスピン流の注入、スピン圧のその場測定、空間分布測定など、微細加工技術に適さない条件でのスピン流計測は困難であった。トポロジカル絶縁体におけるエッジ伝導、ラシュバ系における表面のスピン偏極電流など、スピン流という物理の性質上、空間分布が重要となることが多い。また、スピン偏極 STM やスピン偏極光電子分光などでスピン偏極の空間分布は測定できるが、スピン偏極の平衡状態のからの乖離であるスピン圧の測定はできない。試料そのものに微細加工を施さず、「その場」で「空間分解」できるスピン圧計測手法が存在すればその価値は大きいと考えられた。本研究が実現すれば、スピndeバイス評価やスピン輸送特性計測において有用であるだけでなく、ナノスケールでの「スピン流マッピング」や「スピン圧マッピング」といった画期的な測定につながる可能性がある。スピン物性物理学だけでなく、スピndeバイス応用においても、非常に有用なツールになると考えられた。

### 2. 研究の目的

強磁性体と常磁性体に発生する電圧がスピン圧に比例する現象を利用し、強磁性体と非磁性体を組み合わせたプローブを製作することで、スピン圧を直接測定できる接触型のプローブを開発する。通常電気伝導測定用プローブや、申請者がすでに開発している純スピン流注入プローブやと組み合わせることで、電荷電流に対する電気伝導度測定と同様な手軽さでスピン輸送現象の「実空間」「その場」計測が行えるような新奇なスピン物性測定手法の確立を目指した。

### 3. 研究の方法

図 1 のように、スピン圧が存在している状態とは試料のフェルミ準位がスピン方向で異なる位置にある状態を指す。この状態の試料に非磁性体金属を接触させると、各スピン方向のフェルミ準位が揃うが、遠方で電位を測ればスピンに対して平均した通常の電荷電位を示す。一方、スピン偏極した状態密度を持つ強磁性体を接触させた場合、各スピン方向でフェルミ準位がそろった結果、遠方で測定した場合非磁性金属と異なる電位を示し、その差は試料のスピン圧と強磁性体の偏極度に比例する。本研究ではこの非磁性体と強磁性体の電位差をスピン圧測定に利用する。強磁性体と非磁性体の材質（偏極度）、接触位置や接触面積の差がスピン圧測定の誤差や精度と関連するので、その程度の見積もり、除去が重要となる。

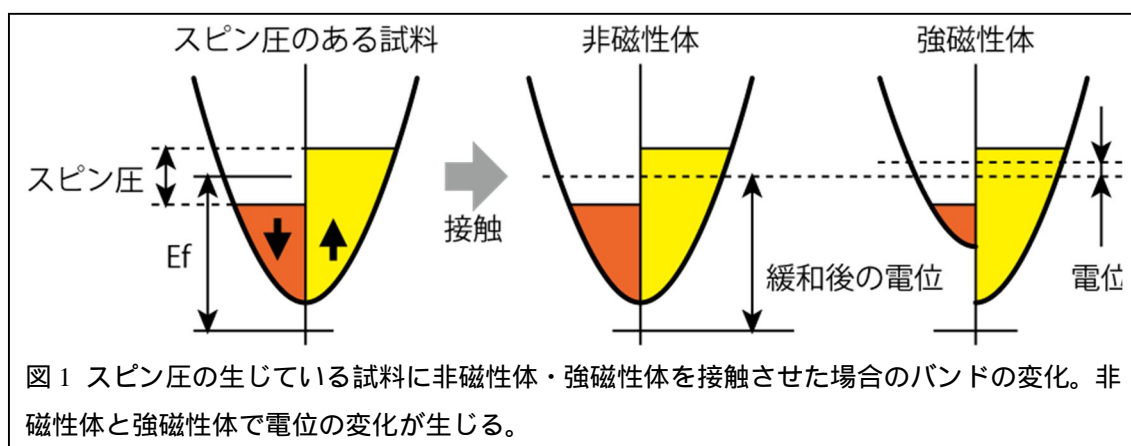


図 1 スピン圧の生じている試料に非磁性体・強磁性体を接触させた場合のバンドの変化。非磁性体と強磁性体で電位の変化が生じる。

研究段階 1 として、4 探針 STM を用いたスピン圧検出の実証を行った。4 探針 STM に強磁性探針、非磁性探針を搭載し強磁性探針と非磁性探針の距離と電位差を精密に測定することでスピン圧測定の実証(図 2b)を行い、電荷電圧とスピン圧の区別に必要なプローブ間距離、強磁性材料、常磁性材料の選考、スピン圧測定に必要な精度、距離や接触面積などジオメトリの検証等を行った。この段階で、スピン圧の測定には成功したが、プローブ先端の接触の精度によって測定値が大きくばらつき、定量的な測定の困難さが判明した。

研究段階 2 として、段階 1 で得られた知見をもとに、強磁性体と非磁性体を一つのプローブにまとめたスピン圧測定プローブを微細加工技術で作製(図 2c)した。モノリシック化することにより、手軽にスピンが測れるだけでなく、強磁性体と非磁性体の距離を小さく、且つ一定にすることができると、誤差の低減に寄与できると考えていたが、実際には段階 1 の結果にあるように、プローブ先端の微小な接触量によって定量性が失われ、定性的な測定しかできないことが判明した。さらに接触によるプローブの破壊、脆弱性も判明した。

研究段階 3 として、作成したプローブによる各種試料の測定を考えていたが、研究段階 2 , 3

において、定量性・再現性・堅牢性が足りないことが判明したため、本質的な問題点の抽出、向上させる手法の検討を行った。試料との接触部分の強度と安定性が足りないであろうことがわかったため、保護層で解決する可能性があった。保護層に必要な物性としては安定であること、特に大気で酸化などが無いこと、堅牢であることであることに加え、スピン圧を検出する必要があるため、スピン拡散長が長いこととキャリア密度がある程度存在することが必要であった。各種保護層とその特性、プローブ形成上の利点を考慮すると、グラフェンを用いるのが妥当であると考え、プローブ先端にグラフェンの層を形成する手法の検討・開発を行った。

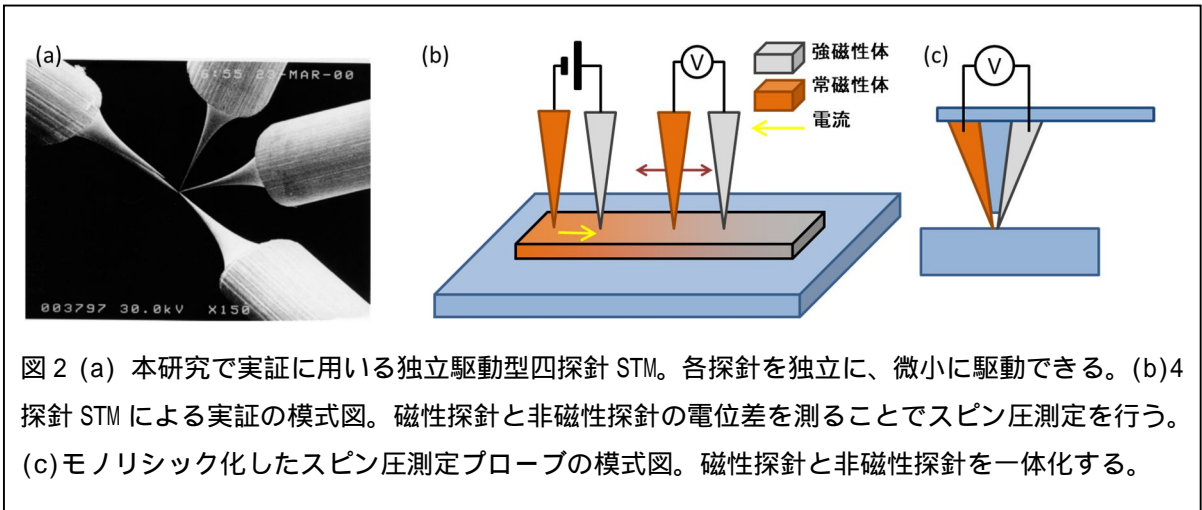


図 2 (a) 本研究で実証に用いる独立駆動型四探針 STM。各探針を独立に、微小に駆動できる。(b)4 探針 STM による実証の模式図。磁性探針と非磁性探針の電位差を測ることでスピン圧測定を行う。(c)モノリシック化したスピン圧測定プローブの模式図。磁性探針と非磁性探針を一体化する。

#### 4. 研究成果

**成果** 多探針 STM を用いたスピン圧測定の実証を行った。図 3 に示すように多探針 STM に磁性探針を用いたラテラル配置において、注入プローブへ印加する電圧におおよそ比例した電圧が測定プローブ二つの間に発生することを確認した。これは純スピン流によるスピン平行からの乱れ、スピン圧を測定したものと考えている。これにより、磁性体・非磁性体の 2 種のプローブを用いることでスピン圧を直接測定できることが確認された。

**成果** Ni および Cu を磁性体・非磁性体としたモノリシックなプローブを作成したが、接触面積や基板との固着が大きく、測定の度、アプローチの度に値がずれ、意味のあるデータが得られないことが分かった。

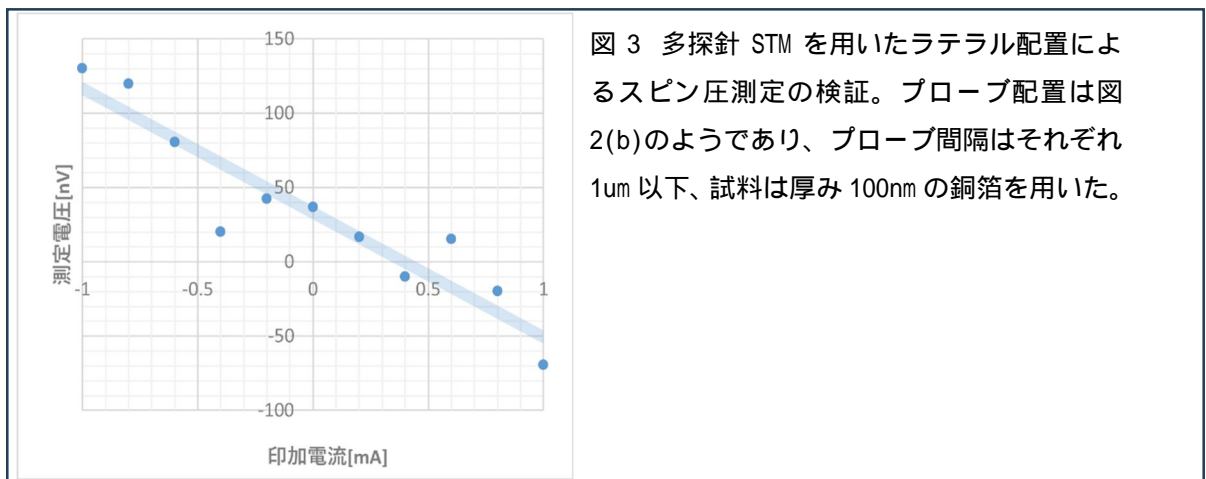


図 3 多探針 STM を用いたラテラル配置によるスピン圧測定の検証。プローブ配置は図 2(b) のようであり、プローブ間隔はそれぞれ 1 $\mu$ m 以下、試料は厚み 100nm の銅箔を用いた。

**成果** 上記結果は究極的にはプローブの接触面積の問題であり、不活性でチャージを通す保護層を形成することで解決できるであろうことを発見した。保護層は、大気中で安定であること、摩擦が少ないこと、堅牢であることであること、スピン拡散長が長いこと、キャリア密度がある程度存在することが条件となる。これと微細加工プロセスを検討すると、保護層としては SiC 上に熱分解で形成される単層あるいは多層のグラフェンが有望であることを見出した。グラフェンは保護層としてだけでなく、スピン圧検出の非磁性体にも使え、拡散長が長いために磁性体へのスピン拡散路としても使えるであろうことを発見した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
研究分担者	白木 一郎  (Shiraki Ichiro)  (10399389)	山梨大学・大学院総合研究部・准教授    (13501)	

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