



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	単原子層間スピン流の対称性操作による制御の理論的研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	北川, 雄真
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15832号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/92138
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yuma_Kitagawa_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 北川 雄真

審査担当者 主 査 教 授 明楽 浩史
副 査 教 授 市村 晃一
副 査 准教授 小布施 秀明

学位論文題名

単原子層間スピン流の対称性操作による制御の理論的研究

(Theoretical study on the control of inter-atomic-monolayer spin current by symmetry manipulation)

グラフェンを代表とする原子層は、今世紀に作製可能となった原子スケールの厚さを持つ 2 次元電子系である。グラフェンが規則的に積層した 3 次元結晶がグラファイトであるが、様々な原子層を任意の角度で積層することが可能である。このような多様な積層構造を作製できるのは原子層と原子層の間の相互作用が比較的弱いファンデルワールス結合であるためである。このような自在な積層によりこれまでになく物質が作製され、系の対称性を変えることも自在にできるようになった。系の対称性は輸送特性に大きい影響を与えることが知られており、対称性を操作することで輸送特性の質的な制御、すなわち特定の輸送係数の ON/OFF を切り替えることが可能である。

最近注目されている積層方法としてツイスト積層がある。たとえばグラフェンを積む場合、グラファイトのように結晶軸を揃えて積むのではなくグラフェンを 2 次元面内で回転 (ツイスト) して積むのがツイスト積層である。原子層グラフェンと、それを積層した構造であるグラファイトはともに面に垂直な鏡映面をもつが、ツイスト操作によりこの鏡映対称性を破ることができる。また、グラフェンとグラファイトはともに面に垂直な軸のまわりに 3 回回転対称性をもつ。この回転対称性はグラフェン 2 層をツイストしても破れないが、グラフェンをリボンあるいはチューブ形状にする操作により破ることができる。

本研究では、このように自在に対称性を操作できる原子層積層構造について、スピントロニクスにおいて重要な役割を担うスピン流に着目し、原子層間を流れるスピン流を対称性操作により制御することを提案している。スピン流は流れの向きに加えてスピンの向きをもつため、流れの向きを層間に決めてもスピンの向きに関して 3 つの成分をもつ。本論文では、まず第一の研究としてツイストした 2 層構造を取り上げ、一方の原子層における電流誘起スピン偏極 (CISP) がもう一方の原子層に拡散することにより生じる層間スピン流を考え、ツイスト操作により鏡映対称性を破ることで新たにスピンが面内で CISP と直交する方向を向くスピン流が発現することを示している。さらに第二の研究として、3 回回転対称性を破る操作としてツイスト 2 層構造の片方の層をチューブ形状にする方法を採用し、チューブ形成による結晶波数の離散化が波数空間の 3 回回転対称性を破ることによって新たにスピンが面直方向の成分が発現することを示している。以下に 2 つの研究に分けて記述する。

第一の研究では、副格子 A と B が相対的に面直方向にずれた IV 属原子層をツイストして積層した 2 層構造の層間スピン流の表式を導出し、原子層がシリセンの場合の層間スピン流をツイスト角度の関数として計算している。原子層が空間反転対称性をもつか否か、すなわちスピン分裂がある

か否かによって、層間スピン流の表式が異なり、スピン分裂がない場合にのみスピン演算子のサブバンド間行列要素が層間スピン流の表式に現れることを明らかにしている。さらに、このサブバンド間行列要素の寄与がサブバンド内行列要素の寄与と同程度であることを計算により示している。また、ツイストによって鏡映対称性を破ると、層間スピン流のスピンが CISP に垂直な面内成分が出現することを明らかにしている。ツイストした場合でも 3 回回転対称性があるため、スピンが面直方向のスピン流は生じない。

第二の研究では、この 3 回回転対称性を破ることでスピンが面直方向のスピン流が現れるか否かを解明するために、第一の研究で扱った 2 層のうち一方の層をチューブに置き換えて、原子層(シート)とチューブの間のスピン流をシリセンシートとシリセンチューブの組合せで計算している。この計算で必要になるシート・チューブ接合のトンネル行列要素の計算方法として、シート・シート接合のトンネル行列要素に帰着できる近似的方法を本研究で開発している。この方法による計算から、シート・チューブ接合のスピン流は、接合幅を固定してチューブ周長を変えると準周期的に振動することを明らかにしている。スピンが面直方向の成分も準周期的振動として現れ、3 回回転対称性の破れが新たなスピンの成分をもたらすことを明らかにしている。

これを要するに本論文は、原子層積層構造においてツイストおよびチューブ形成による対称性操作がスピン流の特定の成分を ON/OFF することを理論的に示しており、原子層物理学およびスピントロニクスひいては応用物理学に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。