

# 二次元有機無機ハイブリッドペロブスカイト材料における 電気分極誘導スピン選択現象の開拓

黄 柏 融\*

## The Development of Polarity-induced Spin Selectivity in 2D Organic-inorganic Hybrid Perovskite Materials

Po-Jung HUANG\*

The induction of strongly efficient spin polarization is widely known to be possible in nonmagnetic materials in the presence of chirality lately. The so-called chirality-induced spin selectivity (CISS) is promising for the development of nonmagnetic spintronic applications. Besides the pivotal chirality, CISS has been found to be enhanced by strong spin-orbit coupling (SOC). This implies the importance of spin splitting band structures induced by centrosymmetry breaking and SOC. With this in mind, the utilization of polar materials with SOC can possibly be another route to the CISS-like effect. This work successfully developed the analogue CISS effect called polarity-induced spin selectivity (PISS) with a tremendous spin polarization in polar organic-inorganic hybrid perovskite (OIHP) materials and compared it with the conventional CISS in chiral OIHPs. In the results, the spin-polarizing direction is parallel and vertical to the electrical current propagating directions in chiral and polar materials, respectively. This work paves a new avenue for spin manipulation in the field of nonmagnetic spintronics.

### 1. 序論

スピン自由度の運用と制御はスピントロニクス分野において重要であり、スピン軌道トルク<sup>(1)</sup>やテラヘルツ発生<sup>(2)</sup>など最先端のスピントロニクス機能につながる。今までスピン偏極電流の発生は磁性体を利用することが一般的だが、近年、キラリティー誘致スピン選択性(CISS)と言われる非磁性体においても高いスピン偏極率を誘致できる現象が注目を集めている<sup>(3)</sup>。磁性体の場合とは異なり、CISSは外場などに影響されず物質のキラリティーにのみ依存する性質を持っている。さらに、スピン軌道相互作用(SOC)によるスピン偏極率の増幅、電流の平行方向にスピン偏極の発生もCISSの特性として報道されてきた<sup>(4)</sup>。これらの結果により、反転中心対称性の破れにより発生する電子バンドのスピン分裂はCISSをもたらす可能性が考えられる。

これらに基づいて考慮すると、キラリティーではなくSOCの強い極性物質においても、反転中心対称性が同様に破れているため、CISSの類似効果であるポラリティー誘致スピン選択性(PISS)の発生が可能だと考えられる。キラル物質におけるスピン分裂バンドの場合では電子の運動量とスピン方向が平行になり<sup>(5)</sup>、スピン偏極は電流の方向に誘致されるが、極性物質におけるスピン分裂バンドでは、電子の運動量とスピン方向が垂直になるため、スピン偏極する方向は電流と直交すると予想できる。PISSを開拓するために、本研究では、極性とキラリティーの持つ・持たない二次元有機無機ハイブリッドペロブスカイト(2D-OIHP)を合成し、コンダクティブ原子力顕微鏡(c-AFM)によりスピン偏極輸送測定を行った。結果によると、キラルと極性2D-OIHPではスピン偏極率が90%を超えるCISSとPISSの観測にそれぞれ成功した。この研究は非磁性体におけるスピン自由度の制御に新しい道を提示した。

### 2. 実験結果

キラル非極性、アキラル極性、キラル極性、アキラル非極性の4種類の2D-OIHPは異なる有機分子、鉛原料、ヨウ化水素酸により合成され、対称性は単結晶X線構造解析により決定された。スピン偏極輸送現象のc-AFM測定はあらかじめ磁化させたカンチレバにより分子の修飾された単結晶表面において行った。

図1に示したように、c-AFM測定での電流方向はz方向になっており、カンチレバにおける磁化方向はx, y, z方向になる。各磁化方向での電流-電圧特性測定を50回積算した結果は図2に示す。キラル非極性2D-OIHPでは、z方向のみスピン偏極が発生することに対して、x方向に分極の持つアキラル極性2D-OIHPではy方向のみスピン偏極が観測された。さらに、x方向に分極の持つキラル極性2D-OIHPでは、zとy方向ともにスピン偏極現象が発生し、アキラル非極性2D-OIHPではどの方向にもスピン偏極は発生しない。スピン偏極率はスピン偏極が発生する場合に90%を超えている。

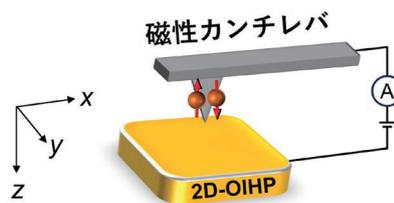


図1 c-AFMにおけるスピン偏極輸送現象の測定配置図。

### 3. ディスカッション

CISS との比較やPISS を開拓するためにSOCの強い極性物質が適するが、反転中心対称性の破れを合理的に誘致することは難しい。本研究では、極性とキラリティーを両方導入することのできる2D-OIHPをプラットフォームとして利用する。3DのOIHPではメチルアンモニウムなど小さな有機分子しか構造に存在できないことに対して、2D-OIHPでは比較的に大きな有機分子を導入できるため、キラル分子と極性分子を層間に挿入することにより、それぞれキラルと極性の2D-OIHPを構築できる。2D-OIHPは半導体的性質も持っており、電気伝導性は芳しくないため輸送現象の測定は難しい。本研究では、2D-OIHPの表面に酸化還元活性な分子を修飾することにより、反転中心対称性の破れた二次元電気伝導層を創出し、スピン偏極輸送測定を行った。

スピン偏極輸送の測定結果によると、キラリティーの持つ2D-OIHPでは電流のz方向に巨大なスピン偏極が発生することに対して、極性の持つ2D-OIHPでは電流と分極とも垂直の方向であるy方向に巨大スピン偏極が観測される。さらに、キラリティーと極性の持つ2D-OIHPではyとz二方向のスピン偏極電流を検出したことにより、CISSおよびPISSは特定方向のスピンをフィルタリングする現象だと推測できる。

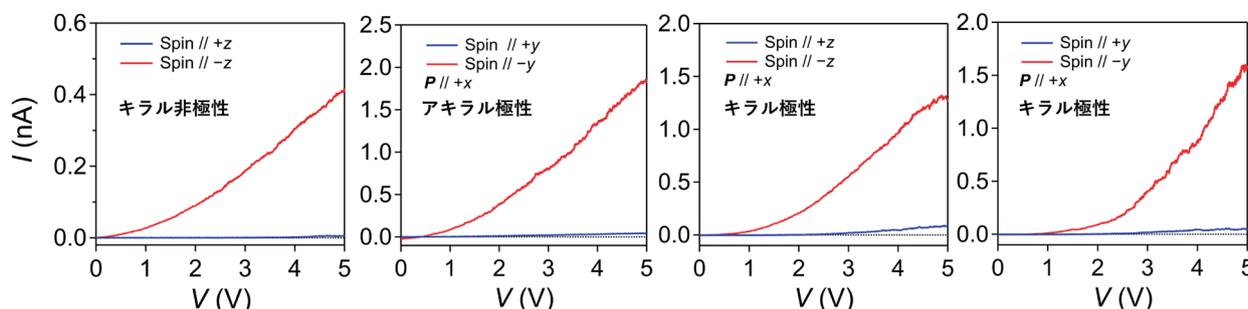


図2 c-AFMにおけるスピン偏極輸送測定結果。

### 4. 結論と展望

本研究では極性の導入された2D-OIHPにおいて、スピン偏極c-AFMでの電流-電圧特性評価により、巨大スピン偏極を誘致するCISSの類似効果であるPISSの観測に成功した。電流と平行するスピン偏極を誘致するCISSとは異なり、PISSによるスピン偏極は電流と垂直の方向に発生する。この結果は反転中心対称性の破れとSOCによる電子バンドのスピン分裂に由来する現象だと考えられる。SOCはスピン偏極率を増幅するが、CISSは軽元素のみ構成されるキラル有機分子でも観測されたため、今後は軽元素のみ有する極性物質においてPISSの検出を試みる。

### REFERENCES

- 1) A. Manchon, *et al.*, *Rev. Mod. Phys.*, **91** (2019) 035004.
- 2) E. Th. Papaioannou, *et al.*, *Nanophotonics*, **10** (2021) 1243-1257.
- 3) B. Göhler, *et al.*, *Science*, **331** (2011) 894-897.
- 4) T. K. Das, *et al.*, *Adv. Mater.*, **36** (2024) 2313708.
- 5) P.-J. Huang, *et al.*, *Adv. Mater.*, **33** (2021) 2008611.