

銅に色素を塗るだけでスピン変換機能を発現

東京大学物性研究所の一色弘成助教、三輪真嗣准教授、大谷義近教授、理化学研究所の近藤浩太上級研究員らの研究グループは、大阪大学および金沢大学のグループと共同で、青や緑の顔料で有名な色素分子フタロシアニンを金属銅の表面に塗るだけで、スピン流を電流に変換する機能が発現することを実証しました。さらにこの変換機能は、銅表面の膜厚がフタロシアニン分子1層の時に最大化することを見だし、白金やビスマスといった重金属を用いたスピンホール素子と同等の性能を有することを示しました。

スピン流-電流変換はスピントロニクス要素技術の一つであり、近年、異種物質接合界面で起こる電流とスピン流の相互変換現象が注目を集めています。

①研究の背景

電子の持つ電荷に加えて、スピン（原子スケールの磁石）の性質を積極的に利用するスピントロニクス研究が世界的に活発に進んでいます。特に、スピン流の生成・検出は、スピントロニクス応用において最も重要な要素技術の一つです。近年、固体無機材料の界面においてスピン流と電流が非常に効率的に相互変換されることが示され、注目を集めています。本研究では無機材料と比べて圧倒的に大きな設計自由度を有しながら、スピントロニクスの分野では未開拓な有機材料の分子に着目しました。有機分子を用いて高効率なスピン流-電流相互変換を実証すれば、スピントロニクス応用に新たな可能性が切り拓かれます。

②研究内容

今回、東京大学物性研究所を中心とする研究グループは、道路標識の青色顔料としても利用されている色素分子であるフタロシアニンと金属銅の接合面においてスピン流から電流への高効率な変換を実証しました。実験では、図 1a の配置でフタロシアニン分子の一種である鉛(II)フタロシアニン分子を銅表面に蒸着した界面に、スピンプンピング法によってスピン流を注入しました。注入されたスピン流は電流に変換され、結果として図 1b のような電圧信号が観察されました。変換係数は 0.4 ナノメートルと見積もられ、白金やビスマスといった重金属で報告されている変換係数の最大値に匹敵することが分かりました。

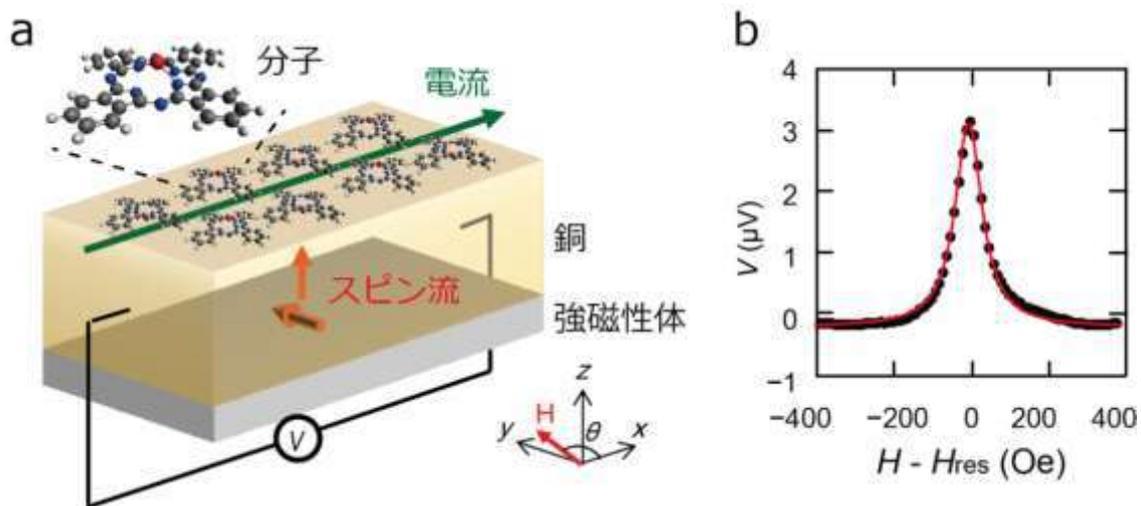
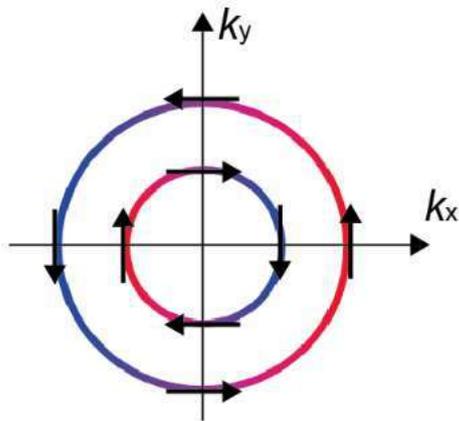


図1. 分子/金属界面のスピンの流-電流変換 a: 分子の模型と素子構造の概略図 b: スピンポンピングにより誘起された分子/金属界面のスピンの流-電流変換の信号

このようなスピンの流-電流変換が起こるのは、図2に示すような電子のスピンの向きと運動量が直交する電子状態（スピンの運動量ロックンク）が界面に実現しているためと考えられます。スピンの運動量ロックンクのある界面にスピンの流を注入すると、図2bのように、電子は運動量を獲得して電流が流れます。分子修飾のない銅表面ではスピンの運動量ロックンクの効果は非常に小さいことが知られています。したがって、今回の結果は、金属銅が分子で修飾されたことにより銅表面の電子状態が大きく変調され、新たなスピンの機能が発現したことを強く示唆しています。このような鉛(II)フタロシアニン分子と銅界面のスピンの運動量ロックンク状態は、第一原理計算による電子スピンの状態の解析においても再現されました。

a スピン-運動量 ロッキング



b スピン流-電流変換

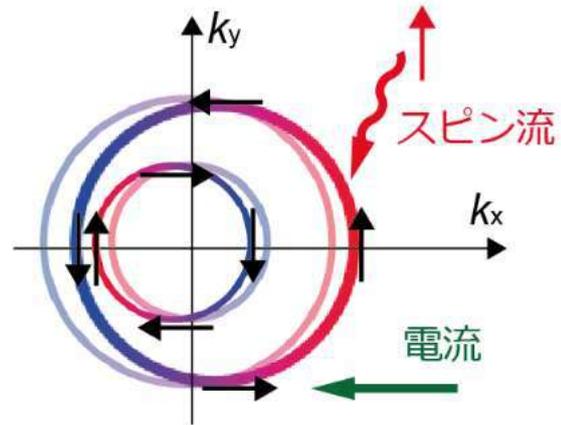


図 2. 界面のスピン流-電流変換

a: 界面の電子状態のフェルミ準位等高線 b: スピン流注入による電流の生成の模式図

次に、変換効率の最大化に必要な条件を明らかにするため、分子層の厚み（膜厚）を系統的に変化させた試料を作製し、スピン流-電流変換由来の電圧信号の変化を計測しました（図 3a）。この結果、単一分子層（1 ML）が形成されたときに電圧信号は最大になることが分かりました。分子膜厚が約 5 層（5 ML）以上で、信号は完全に消失しました。この分子膜厚依存性の起源を明らかにするため、鉛(II)フタロシアニン分子を銅表面上に蒸着して、走査型プローブ顕微鏡法（注 6）による観察で分子の吸着構造を調べました（図 3b, c, d）。それにより単一分子膜は、表面に平坦に吸着した鉛(II)フタロシアニン分子が周期的に配列した構造であることが判明しました。この周期的な格子は分子膜厚が 1 層のときに支配的になり、分子の量がそれより多くても少なくとも配列が乱れることが分かりました。これらの実験結果から、分子修飾によって金属表面に新たなスピン変換機能を発現させるためには、分子膜の吸着構造が重要であることを明らかにしました。

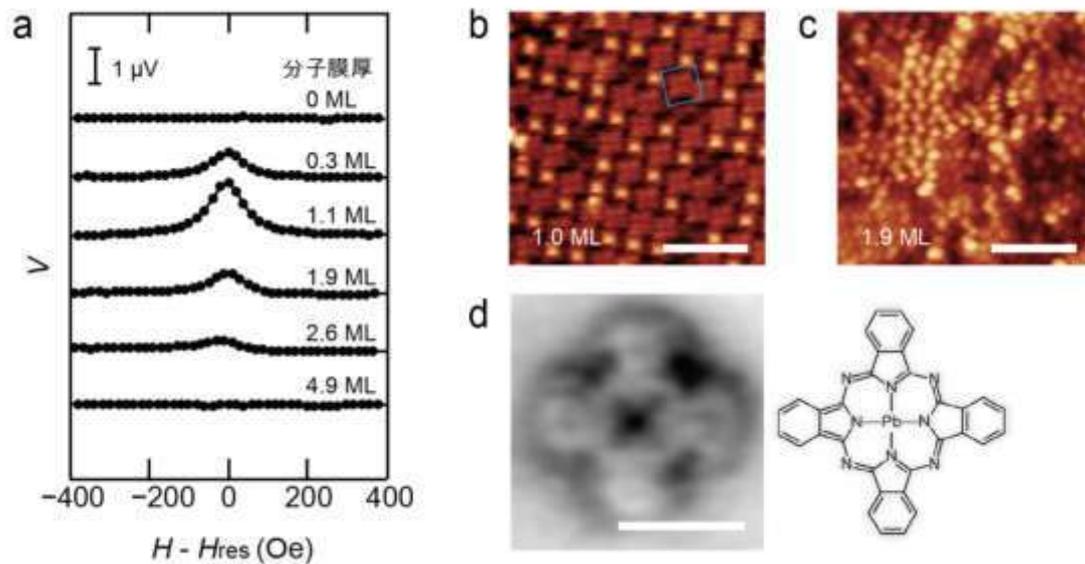


図 3. 分子層の構造と膜厚依存性

- a: スピン流-電流変換信号の分子膜厚依存性 (ML は分子層を表す)
- b: 単一分子層で覆われた Cu(111)界面の走査型プローブ顕微鏡像 (水色の枠は 1 つの分子を表す. 白線は 5 ナノメートルを表す) c: 1.9 ML の場合
- d: 1 つの分子を拡大した高分解能像 (左. 白線は 1 ナノメートルを表す) と、鉛(II)フタロシアニン分子の構造式 (右)

本成果は、これまでになく有機分子と金属の接合界面を用いて、スピントロニクス応用の要となるスピン変換機能を発現しました。今後は、分子の持つ高い設計自由度を使った新規電子デバイスの実現が期待されます。研究成果は、2019年9月12日に Nano Letters 誌に掲載されました。

日文新聞发布全文 <http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/news2.html?pid=8616>

文: JST 客观日本编辑部翻译整理