

キラル分子スピントロニクスの研究

研究代表者	東京大学・物性研究所・准教授	研究者番号：20609698
	三輪 真嗣 (みわ しんじ)	
研究課題情報	課題番号：25H00414	研究期間：2025年度～2029年度
	キーワード：スピントロニクス、キラル分子、磁気抵抗効果、生体分子	

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

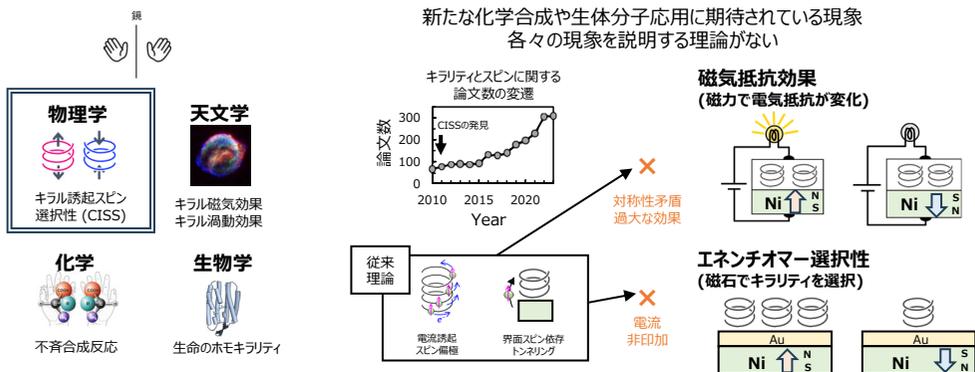
●研究の全体像

本研究はナノスピントロニクスのテクノロジーをキラル誘起スピン選択性（Chirality-induced spin selectivity: CISS）と呼ばれる現象に対して適用し、現象を物理的に理解して応用に供することである。

●研究の背景

キラリティとは、右手と左手のように鏡で映した像と重ね合わせることができない性質のことである。この性質は物理学、化学、生物学、天文学等の様々な分野で重要とされている。物理学では、キラリティが電流と結びついて軌道の角運動量を生じることがわかっている。さらに、スピンと軌道の間の相互作用が加わると、電流によってスピンが偏る現象が予想される。これに関連する現象は「キラル誘起スピン選択性（CISS）」と呼ばれ、約10年前から活発に研究されている。一方で、金属磁石を使った磁気抵抗効果や、エナンチオマー選択性等が注目されているものの、その根本的な原因についてはまだ一致した意見が得られていない。（図1）

様々な分野における「キラリティ」 キラル誘起スピン選択性 (Chirality-induced spin selectivity: CISS)



研究課題の核心をなす学術的「問い」： CISS関連現象を物理的に理解し、応用に供することができるか？

図1 キラル誘起スピン選択性と本研究課題における問い

最近のキラル分子を利用した接合の研究で、有効磁場の発生を通じて、電流を使わなくてもCISS現象が観測できることが示された（図2）。さらに、この新しいCISS現象が起こる理由は、電流ではなく熱によるキラル分子中のスピンの偏りであることが示された（図3）。この研究成果は、電流を使わないCISS現象を理解することがCISS現象全体の理解につながることを示唆している。従って、この新しい概念に基づいてCISSの理論を再構築すれば、CISSを統一的に理解し、応用研究の新しい方向を切り開く可能性がある。

●研究の目的

本研究ではナノスピントロニクスの専門家を中心とした研究チームが、精密な素子作製及測定技術を使い、磁気抵抗効果をはじめとするCISS現象の仕組みを理解し、新たな理論を構築する。また、CISSの効果を大きくする方法を確立する。さらに、生体分子がホモキラリティを有する点に着目し、この研究を生体分子にも応用することを目指す。本研究は、物理学だけでなく、化学、生物学、医学におけるスピンの科学の重要性を再評価するきっかけとなり、スピントロニクス研究に新たな動きをもたらすだけでなく、異なる分野が交流する新しい学際的な研究を生み出すことにつながるはずである。

キラル分子とスピンの関係を理解することで、CISS関連研究だけでなく、化学合成、分子生物学、創薬等の分野で新しい設計や解析の手法の提案へとつなげたい。

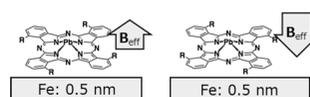


図2 キラル分子による有効磁場
Appl. Phys. Express **13**, 113001 (2020)

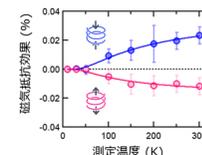


図3 熱励起によるスピン偏極
J. Am. Chem. Soc. **144**, 7302 (2022)

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●(I) 熱励起スピン偏極によるCISSの学理構築

本研究では第一原理計算を用いて、熱励起によるスピン偏極を理論的に導き出す。これにより、CISSの増強や実験設計に必要な物理パラメータを明確にする。実験的には、分子線エビタキシー法を利用して精密に制御された強磁性電極を準備し、キラル分子との相互作用を同定する。さらに、この熱励起スピン偏極の本質を捉えるために、スピン流の減衰やスピン流電流変換効率に及ぼす格子振動の影響を考察し、これらの相互作用の詳細を解明する。

●(II) 構築した学理に基づくCISSの増強方法確立

本研究では、本研究チームが開発した電気化学セルを用いる手法を採用する。この手法は再現性が高く、明瞭なCISS効果が確認されている。さらに分子の配置を最適化することで、CISSの効果を増強する。また、従来のCISS研究でよく用いられてきた強磁性金属のニッケル（Ni）に代わる新しい材料の開発も行う。

●(III) ホモキラリティを有する生体分子ダイナミクスへのCISS応用

CISSの応用の中で、特に分子特有とされるものが生体分子への応用である。そこで光エネルギーに反応して様々な機能を持つタンパク質、ロドプシンに焦点を当てる。ロドプシンがどのようにして多くの機能を持つか、その構造がどのように変化するかをCISS効果を利用して電氣的に調べることを目指す。

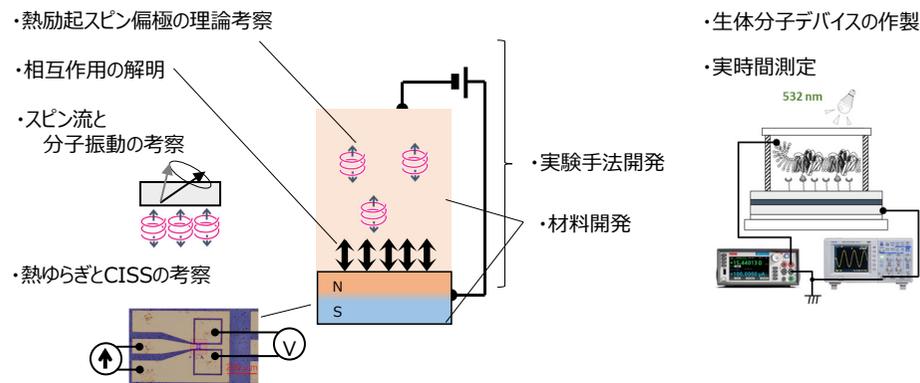


図4 実施概要