

日本物理学会学生優秀発表賞(領域 4)を受賞して

物性理論研究部門 助教 佐野 涼太郎

このたび、日本物理学会 2025 年春季大会にて学生優秀発表賞(領域 4)を受賞いたしました。本賞は、学生による優れた研究発表を奨励することを目的として設けられたものであり、このような荣誉ある賞をいただけたことを大変光栄に思います。受賞対象となった発表は、「DNA 二重らせんに沿った可変領域ホッピング伝導によるカイラリティ誘起スピン選択性」です。以下に、研究の概要をご紹介します。

「カイラリティ」とは、右手と左手のように鏡に映しても重ね合わせることができない性質を指します。このカイラリティは、DNA をはじめとする生体分子がもつ基本的な構造であり、近年では物質の電氣的・磁氣的な性質とも深く関わるようになってきました。なかでも注目されているのが、カイラリティ誘起スピン選択性(CISS)と呼ばれる現象です。これは、有機分子のようにスピン軌道相互作用が弱い材料であっても、左右のカイラリティに応じて電子スピンの向きを選び分けることができるという驚くべき性質を示します[1]。磁石や重金属を用いずに、カイラリティのみでスピンを制御できることから、新しいスピントロニクス技術の基盤としても世界的に関心が高まっています[2]。しかしながら、「なぜカイラルな構造が高いスピン選択性を生み出すのか」という根本的なメカニズムは、いまだ十分に解明されていません。

DNA のように強く乱れた分子鎖では、電子はバンドを形成せず、局在した状態間を熱的に跳び移るホッピング伝導によって電流が流れます。特に低温領域では、電子はエネルギー的に有利な経路を選びながら空間的に離れたサイト間を遷移する、いわゆる可変領域ホッピング(VRH)が支配的になります[3,4]。この過程で重要となるのがフォノンの存在です。ホッピング遷移では電子の移動前後でエネルギーが一致しないため、フォノンが電子の跳び移りに必要なエネルギーを吸収あるいは放出することでその差分を補償します。したがって、ここではフォノンは単なる散乱源ではなく、可変領域ホッピング伝導そのものを成立させるのに本質的な役割を果たしています。

本研究では、CISS の新しい起源として、電子スピンとカイラルフォノンとの相互作用[5]に着目しました。フォ

ノンは結晶や分子の振動の量子ですが、カイラルフォノンは回転を伴う特殊な振動モードであり、角運動量を有しています[6,7]。特に DNA のようならせん構造を持つ分子では、このカイラルフォノンが自然に現れます。そこで我々は、VRH 伝導過程に不可欠なフォノンが角運動量を持つ場合、その回転運動が電子スピンと結びつくことでホッピング遷移確率にスピンの非対称性が生じ、結果としてスピン選択性が誘起されると考えました[8]。この枠組みにより、CISS 現象を「フォノンの角運動量」という動的な観点から説明する手掛かりを得ました。さらに、DNA 二重らせんを強く乱れた 1 次元電子系としてモデル化した理論解析の結果、温度の低下に伴ってスピン選択性が増強されることを明らかにしました。これは、温度が下がるほどホッピング距離が伸び、フォノンを介したエネルギー補償が支配的になる VRH の特性と整合しています。加えて、近年実験的にも報告されている反平行スピン対[9]が DNA 両端に形成されることを数値的に確認し、対称性の議論を通じて、これがオンサーガーの相反定理を破りうることを示しました。これらの成果は、DNA 二重らせんに沿ったスピン伝導における乱れとカイラルフォノンの協奏を浮き彫りにし、CISS の理解を静的カイラリティから動的カイラリティへと拡張するものであると期待されます。

本研究の遂行および講演を行うにあたり、加藤岳生准教授をはじめ、お世話になった多くの方々に、この場を借りて心より感謝申し上げます。

- [1] B. Göhler *et al.*, *Science* **331**, 894 (2011).
- [2] B. P. Bloom *et al.*, *Chem. Rev.* **124**, 1950 (2024).
- [3] P. Tran *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 1564 (2000).
- [4] Z. G. Yu and Xueyu Song, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 6018 (2001).
- [5] T. Funato *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **132**, 236201 (2024).
- [6] J. Kishine *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **125**, 245302 (2020)
- [7] H. Tsunetsugu and H. Kusunose, *J. Phys. Soc. Jpn.* **92**, 023601 (2023).
- [8] R. Sano and T. Kato, arXiv:2404.19000 (2024).
- [9] R. Nakajima *et al.*, *Nature* **613**, 479 (2023).