

島野 亮

東京大学低温科学研究センター  
教授

## トポロジカル非線形光学の新展開

### § 1. 研究成果の概要

本研究は、トポロジカル物質特有の光応答、特に非線形光学応答に焦点を当て、新たな動作原理、量子機構に基づく光エレクトロニクス素子への応用の可能性を拓くことを目標としている。さらに、その基礎概念をスピン流、超伝導体、さらに強相関電子系へと拡張し、トポロジカル物質を基盤とした革新的な新規非線形光機能の創出に向けた学理構築を行うことを目指している。

本年度は Bi 系半金属におけるスピンホール効果、円偏光起電流の発現機構について実験、理論両面から調べた。まず輸送現象測定から、ディラックバンドを有する BiSb 系半金属においてスピンホール角が 1 を超える大きなスピンホール効果が発現することを明らかにした。温度や積層構造、組成や膜厚依存性などから、観測された BiSb 系半金属におけるスピンホール効果が、トポロジカル表面状態よりもむしろバルクのディラック電子状態に主に起因するものであることを見出した。この結果は BiSb 系半金属におけるディラック電子系が巨大なスピン流移動度を持ち、スピン流源として大きなポテンシャルを有していることを示すものである。また、BiSb 系半金属において円偏光を照射すると、円偏光のヘリシティに依存した光電流が発生することを見出した。詳細なドーピング濃度依存性から円偏光起電流現象がディラック半金属特有の電子状態を反映していることを見出した。さらに、この Bi における円偏光起電流現象の高周波への拡張として、Bi 単膜からのフェムト秒円偏光レーザーパルスによるテラヘルツ波発生の観測に成功した。放射テラヘルツ波の励起光偏光依存性、強度依存性、膜厚依存性などの系統的な測定を行い、さらに直流輸送現象測定との比較により、テラヘルツ波放射の微視的機構として、円偏光照射によるスピン流生成および逆スピンホール効果によるスピン流から電流への変換過程が働いていることを明らかにした。これらの結果は、トポロジカル物質における非線形光学効果の新たな動作原理を与えるものと考えられる。超伝導体における非線形光学応答の研究では、反転対称性の破れた系で発現する非相反電磁応答を超伝導体に拡張する第一歩として、従来型 s 波超伝導体に対してテラヘルツ第二高調波発生の観測を行った。電流注入により系に反転対称性を導入すると、電流の向きによって位相が反転する非

相反第二高調波が高効率に発生することを見出した。実験で観測された円偏光・スピンの変換の機構について理論的研究を行った。その結果、円偏光レーザーは電子のスピンによって異なる幾何学的効果を及ぼし、この影響でスピンの生成されることが分かった(図1)。トポロジカル非線形応答理論の研究においては、ゼナー・トンネリングとよばれる絶縁破壊現象において、従来の研究では考慮されていなかった幾何学的位相の効果を導入することにより、非相反電流とよばれるダイオード機能が発現することを見出した。また、マルチフェロイック物質における非線形光学応答を調べ、エレクトロマグノンと呼ばれる磁気励起により dc 電流(シフト電流)が発生することを理論的に明らかにした。その他、反転対称性の破れた超伝導体やヘテロ接合系における光電流効果についての理論構築を行った。

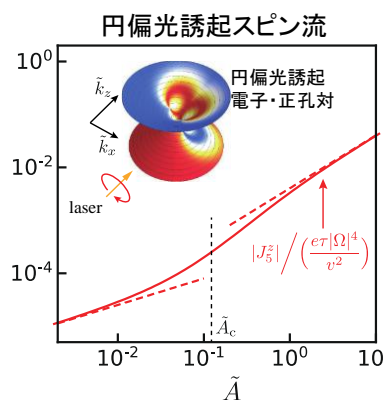


図1. 円偏光レーザーを照射した三次元ディラック物質の電子正孔励起とスピン流生成効率

**【代表的な原著論文】**

1. Tianrui Xu, Takahiro Morimoto, Joel E. Moore “Nonlinear optical effects in inversion-symmetry-breaking superconductors” Phys. Rev. B vol. 100, No.22, 220501(R)-1-5, 2019
2. Sota Kitamura, Naoto Nagaosa, Takahiro Morimoto “Nonreciprocal Landau-Zener tunneling” Communications in Physics, vol. 3, 63-1-8, 2020
3. Zhendong Chi, Yong-Chang Lau, Xiandong Xu, Tadakatsu Ohkubo, Kazuhiro Hono, Masamitsu Hayashi “The spin Hall effect of Bi-Sb alloys driven by thermally excited Dirac-like electrons” Science Advances vol. 6, eaay 2324-1-9, 2020

## § 2. 研究実施体制

### (1) 島野グループ

- ① 研究代表者: 島野 亮 (東京大学低温科学研究センター、教授)
- ② 研究項目
  - ・テラヘルツ光発生
  - ・超伝導体における非線形光学応答
  - ・フロッケ・トポロジカル転移

### (2) 林グループ

- ① 主たる共同研究者: 林 将光 (東京大学大学院理学研究科、准教授)
- ② 研究項目
  - ・ヘテロ構造光電変換
  - ・光誘起非線形スピン流

### (3) 岡グループ

- ① 研究代表者: 岡 隆史 (東京大学物性研究所、教授)
- ② 研究項目
  - ・フロッケ・エンジニアリング理論
  - ・トポロジカル非線形応答理論