

トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出
2019 年度採択研究代表者

2021 年度 年次報告書

河東 泰之

東京大学 大学院数理科学研究科
教授

物質のトポロジカル相の理論的探究

§ 1. 研究成果の概要

有限群対称性を持つ 2 次元量子スピン系の SPT 相の分類について、その群の $U(1)$ 値 3 次コホモロジー群に値を持つ不変量を数学的に構成した。この結果は多くの研究者によって予想されていたものであるが、初めて証明に成功したものであり、数学の最高峰ジャーナルの一つに掲載された。

トポロジカル超伝導体に関して、超伝導ノードの理論的検出方法の研究を行った。また、非エルミートトポロジカル相の研究に関しては、非エルミート表皮効果を記述するトポロジカル有効作用、量子多体系における非エルミート表皮効果の特徴づけ、非エルミート・ハミルトニアンにおける対称性指標、非エルミート系における量子異常などの研究を行った。また、量子コンピュータ系やボソン系への非エルミートトポロジーの応用に関する研究を行った。量子ウォークにおいて外的トポロジカル相という新しいトポロジカル相の存在を明らかにした。さらに、解析的、数値的手法を駆使して、2 次元の $SU(N)$ 多体交換スピン模型において、カイラルなスピン液体が実現することを示した。また、実験グループと共同で、2 次元磁性体のトポロジカルホール効果について調べた。

トポロジカル材料の設計理論に関して、バンド数を増やすと不安定化する脆いトポロジカル絶縁体の模型、トポロジカル超伝導体のジョセフソン効果、時間反転対称なトポロジカル超伝導体表面のマヨラナ粒子対の電磁応答、対称性とトポロジーの観点からの超伝導ギャップのノードの分類、についての理論研究を行った。量子多体系のトポロジカル相に関して、離散対称性のもとでギャップレス励起あるいは対称性の破れを保証する Lieb-Schultz-Mattis 定理を導いた。

§ 2. 研究実施体制

(1) 河東グループ

- ① 研究代表者: 河東 泰之 (東京大学 大学院数理科学研究科 教授)
- ② 研究項目
 - ・トポロジカル秩序、テンソル圏の作用素環による解析
 - ・量子スピン系のギャップト・ハミルトニアン分類
 - ・非可換幾何学による指数定理の発展

(2) 佐藤グループ

- ① 主たる共同研究者: 佐藤 昌利 (京都大学 基礎物理学研究所 教授)
- ② 研究項目
 - ・トポロジカル結晶絶縁体・超伝導体の分類
 - ・対称性によって守られたトポロジカル相の研究
 - ・非エルミート・トポロジカル相の解析
 - ・幾何学的手法による可解モデルの解析
 - ・量子ウォークによるトポロジカル相の提案

(3) 古崎グループ

- ① 主たる共同研究者: 古崎 昭 (理化学研究所 開拓研究本部 主任研究員)
- ② 研究項目
 - ・トポロジカル材料の設計理論
 - ・量子多体系のトポロジカル相の理論

【代表的な原著論文情報】

- [1] Y. Ogata, Y. Tachikawa, H. Tasaki, General Lieb–Schultz–Mattis type theorems for quantum spin chains. *Comm. Math. Phys.* 385 (2021), no. 1, 79–99.
- [2] Y. Ogata, An $H^3(G, T)$ -valued index of symmetry-protected topological phases with on-site finite group symmetry for two-dimensional quantum spin systems. *Forum Math. Pi* 9 (2021), Paper No. e13, 62 pp.
- [3] Y. Kawahigashi, A characterization of a finite-dimensional commuting square producing a subfactor of finite depth, *Internat. Math. Res. Notices* (in press).
- [4] S. Ono and K. Shiozaki, "Symmetry-Based Approach to Superconducting Nodes: Unification of Compatibility Conditions and Gapless Point Classifications" *Phys. Rev. X* 12, 011021 (2022).
- [5] T. Bessho and M. Sato, "Nielsen–Ninomiya Theorem with Bulk Topology: Duality in Floquet and Non-Hermitian Systems" *Phys. Rev. Lett.* 127, 196404 (2021).
- [6] K. Kawabata, K. Shiozaki, and Shinsei Ryu, "Topological Field Theory of Non-Hermitian

Systems” Phys. Rev. Lett. 126, 216405 (2021). (Editors’ Suggestion)

[7] S. Kobayashi and A. Furusaki, Fragile topological insulators protected by rotation symmetry without spin-orbit coupling, Phys. Rev. B 104, 195114 (2021)

[8] S. Kobayashi, Y. Yamazaki, A. Yamakage, and M. Sato, Majorana multipole response: General theory and application to wallpaper groups, Phys. Rev. B 103, 224504 (2021)

[9] Y. Yao and M. Oshikawa, Twisted boundary condition and Lieb–Schultz–Mattis ingappability for discrete symmetries, Phys. Rev. Lett. 126, 217201 (2021)