

2023 年度年次報告書

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

2020 年度採択研究代表者

江澤 雅彦

東京大学 大学院工学系研究科
講師

電気回路によるトポロジカル量子計算方法の創生

主たる共同研究者：

川村 稔（理化学研究所 創発物性科学研究センター 専任研究員）

齊藤 英治（東京大学 大学院工学系研究科 教授）

三田 吉郎（東京大学 大学院工学系研究科(工学部) 教授）

研究成果の概要

- ① Kitaev トポロジカル超伝導体模型を集積回路により実装し、マヨラナ・エッジ状態をインピーダンス共鳴により観測した[論文1]。13GHz で駆動されるトポロジカル・エッジ状態を観測した。また、電気回路にトランジスタを用いたスイッチを導入する事により、マヨラナ状態を任意に平行移動できる事を示した。この理論と実験結果に基づき、5G 技術にトポロジカル安定性を付与する Topological 5G という概念を提唱した。
- ② 非線形系におけるトポロジカル相はバンド構造が定義できない事などから理論的な解析が困難である。Bloch 仮説を用いる事により非線形トポロジカル系における厳密解を求め、チャーン数を非線形系に拡張し、非線形誘起トポロジカル相転移が起きる事を明らかにした。また、クエンチダイナミクスを数値計算する事により、非線形トポロジカル・エッジ状態を実現できる事を提案した[論文2]。
- ③ 非エルミート・トポロジカル系に特有のスキン状態を高次トポロジカル系へ拡張した高次スキン状態をトポロジカル電気回路で実機を作製しインピーダンス共鳴によって観測した[論文3]。
- ④ 2023 年になり、量子ドットを用いて2サイトの Kitaev トポロジカル超伝導体模型が実現し、poor man's Majorana states として着目を浴びている。従来のトポロジカル保護は無限に長い Kitaev 鎖に対するものであったが、この実験を期に、短い Kitaev 鎖でのマヨラナ状態のトポロジカル安定性に関して着目が集まっている。この観点から、短い Kitaev 鎖での二バンド有効模型を isospectral matrix reduction 法を用いて解析的に導出し、マヨラナ状態の安定性が鎖の長さの偶奇によって変化する事を発見した[論文4]。
- ⑤ マヨラナ粒子のブレイディングに基づく量子計算はトポロジカル量子計算の最も基本的なものである。しかし、マヨラナ粒子のブレイディングのみでは Clifford ゲートのみしか生成できないためにユニバーサル量子計算は実行不可能である。従来の研究では Solovay-Kitaev の定理により T ゲートのみを追加すれば良いと信じられてきたが、これは1量子ビットや2量子ビットが任意の大きな量子ビットに埋め込めることを前提にしていた。しかし、実際には、マヨラナ粒子のブレイディングではパリティが保存するために、物理量子ビットと論理量子ビットの関係が非局所的になり、量子ビットの埋め込みが不可能である事を示した。具体的に CZ ゲートや CNOT ゲートが3量子ビット以上には埋め込めない事を示した。この解決方法としてブレイディングをマヨラナ粒子の多体相互作用に拡張する事で、Solovay-Kitaev の定理に基づくユニバーサル量子ゲートの全てのセットを構築し埋め込みが可能である事を示し、マヨラナ粒子に基づくユニバーサル量子計算に必要な十分な条件を明らかにした[論文5]。

【代表的な原著論文情報】

- 1) Tetsuya Iizuka, Haochen Yuan, Yoshio Mita, Akio Higo, Shun Yasunaga, Motohiko Ezawa, Experimental demonstration of position-controllable topological interface states in high-frequency topological integrated circuits, Communications Physics 6, 279 (2023)
- 2) Kazuki Sone, Motohiko Ezawa, Yuto Ashida, Nobuyuki Yoshioka, Takahiro Sagawa, Nonlinearity-induced topological phase transition characterized by the nonlinear Chern number,

Nature Physics (2024) [https:// doi.org/10.1038/s41567-024-02451-x](https://doi.org/10.1038/s41567-024-02451-x)

- 3) Bin Liu, Yang Li, Bin Yang, Xiaopeng Shen, Yuting Yang, Zhi Hong Hang, Motohiko Ezawa, Experimental observation of non-Hermitian higher-order skin interface states in topological electric circuits, Phys. Rev. Research 5, 043034 (2023)
- 4) M. Ezawa, Even-odd effect on robustness of Majorana edge states in short Kitaev chains, Phys. Rev. B 109, L161404 (2024)
- 5) M. Ezawa, Systematic construction of topological-nontopological hybrid universal quantum gates based on many-body Majorana fermion interactions, arXiv:2304.06260