

2024 年度年次報告書

量子・古典の異分野融合による共創型フロンティアの開拓

2023 年度採択研究代表者

山崎 隼汰

東京大学 大学院理学系研究科

助教

高速な定数空間オーバーヘッド誤り耐性量子計算の理論基盤

## 研究成果の概要

本研究提案では定数空間オーバーヘッド誤り耐性量子計算の時間オーバーヘッドの極限まで効率化しその実装方針まで明確化すること目的として研究を行う。特に本研究では、定数空間オーバーヘッド誤り耐性量子計算を polylogarithmic やそれ以下といった短い時間オーバーヘッドで高速に行う手順を解明する。さらにその将来的な実装可能性を解析するために、実装に必要なリソースの定量的評価と古典数値シミュレーションに関する理論基盤を確立する。2024 年度は定数空間オーバーヘッド誤り耐性量子計算の性能評価として、本研究提案に向けて開発してきた量子連接符号を用いた誤り耐性量子計算プロトコルの性能評価の論文の改訂・出版を行った。また並行して、量子 LDPC 符号を用いた誤り耐性量子計算プロトコルのオーバーヘッドの効率化を行い、プレプリントとして投稿した。またこうした誤り耐性量子計算プロトコルで重要なマジック状態蒸留プロトコルのオーバーヘッドを polylogarithmic から定数  $O(1)$  オーダーに改善するプロトコルを構成した。さらにこうした誤り耐性量子計算プロトコルの実装方法の定量的解析に向けて、連続量量子状態間の変換の古典数値シミュレーションを効率化する方法を構築するために、量子リソース理論の手法に基づく古典数値シミュレーションの方法の論文を書いて投稿した。また一般的な量子リソース理論の基礎理論を構築するために、この分野の重要な未解決課題であった「一般化量子 Stein の補題 (generalized quantum Stein's lemma)」を証明し、量子リソースの変換に関する一般理論を構築した。またこうした量子リソースの理論解析として、エネルギー消費量に関する量子計算の古典計算に関する優位性を証明した論文の改訂・出版を行った。これらの研究により、誤り耐性量子計算の効率化とその実装方法の定量的解析に向けた量子リソース理論の理論基盤の整備を進めた。

### 【代表的な原著論文情報】

- 1) Florian Meier, Hayata Yamasaki, “Energy-Consumption Advantage of Quantum Computation,” PRX Energy 4, 023008, May 2025. arXiv:2305.11212
- 2) Masahito Hayashi, Hayata Yamasaki, “Generalized Quantum Stein's Lemma and Second Law of Quantum Resource Theories,” arXiv:2408.02722, August 2024. Presented at a top conference QIP2025 as a long plenary talk.
- 3) Adam Wills, Min-Hsiu Hsieh, Hayata Yamasaki, “Constant-Overhead Magic State Distillation,” arXiv:2408.07764, August 2024. Accepted in principle in Nature Physics. Presented at a top conference QIP2025 as a long plenary talk.
- 4) Shiro Tamiya, Masato Koashi, Hayata Yamasaki, “Polylog-time- and constant-space-overhead fault-tolerant quantum computation with quantum low-density parity-check codes,” arXiv:2411.03683, November 2024. Selected as the best paper at a top conference TQC2025.