

# 実施項目7: 量子・HPC連携プログラム最適化技術 の研究開発

(1)観測結果に対するエラー緩和技術、(2)量子ゲート数および量子ビット数を実効的に減らす量子回路最適化技術、および(3)量子状態に対するエラー訂正技術に関する研究開発を行う。

# 研究開発成果【事業項目⑦】

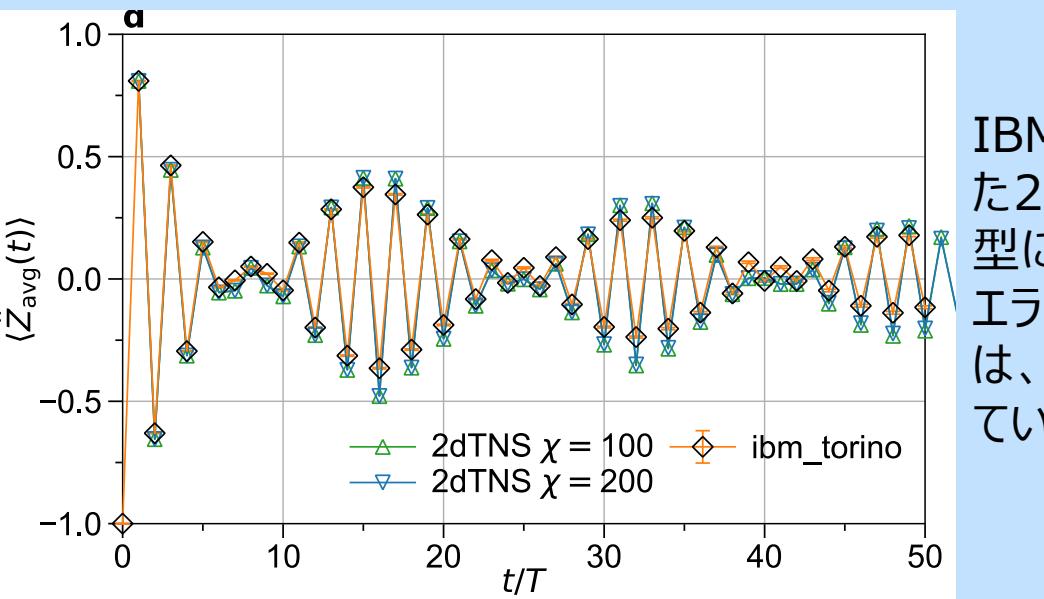
研究開発目標に対する  
達成状況

## 【量子・HPC連携プログラム最適化技術の研究開発】

研究開発状況：予定通りに進行中

### 【1】エラー緩和技術の研究開発

- 量子ダイナミクスに対する簡約エラー緩和法の提案とIBM実機及び富岳による2次元テンソルネットワーク状態(2dTNS)計算による実証 [事業項目⑥、⑧と共同, arXiv:2403.16718]

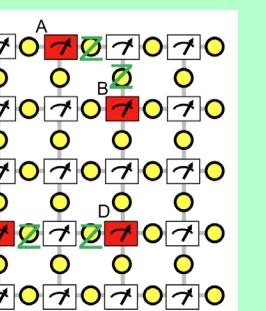


IBM実機133量子ビットを用いた2次元縦横磁場イジング模型に対する量子ダイナミクス。エラー緩和を行なった実験結果は、2dTNS計算と良く一致していることがわかる。

- Tensor-network error mitigation (TEM)法のシリアル版を実装しIBM実機による検証を実施。並列版を今年度中に実装予定。

### 【3】エラー訂正技術の研究開発

- 表面符号とPauli(非局在)チャネル近似に基づいた量子エラーのモデル化+テンソル形式による問題空間の抽出
- 表面符号の復号により効率的な手法を探索中



表面符号

$$\mathcal{D}_p(\rho) = (1-p)\rho + \frac{p}{3}X\rho X^\dagger + \frac{p}{3}Y\rho Y^\dagger + \frac{p}{3}Z\rho Z^\dagger.$$

パウリチャネルモデルにより全量子エラーを単純エラーに近似し、確率により調整する。

### 【2】量子回路最適化技術の研究開発

- テンソルネットワーク技法を応用した量子回路最適化法を提案[事業項目④と共同、Phys. Rev. Research 6, 043008 (2024)]。本手法は、古典データを量子データに変換する場合にも有効。

24 ゲート      48 ゲート      480 ゲート

- 出力
- 本手法で生成された量子回路
- 
- 進化計算による量子回路最適化法を提案し富岳に実装した。テンソルネットワーク法の一つであるMPS法を活用することで、100量子ビットを超えるスケーラブルな実装が可能となった。[論文投稿準備中]

進化計算

Matrix Product State (MPS) に相当する量子回路のテンソルを進化計算で2量子ビットゲートに分解する方法で、スケーラブルな量子回路生成に成功

### 【deliverables】

FY2025 : TEMのβ版リリース

FY2026 : HPC量子回路最適化法のβ版リリース

FY2028 : 最適化技術を利用したアプリケーションのリリース

# Outcomes 【事業項目⑦】

## 【原著論文（投稿中含む）】

1. K. Shinjo, K. Seki, T. Shirakawa, R.-Y. Sun, S. Yunoki, "Unveiling clean two-dimensional discrete time quasicrystals on a digital quantum computer", arXiv:2403.16718 (2024). [事業項目⑥、⑧と共同]
2. T. Shirakwa, H. Ueda, S. Yunoki, "Automatic quantum circuit encoding of a given arbitrary quantum state" Phys. Rev. Research **6**, 043008 (2024). [事業項目④と共同]
3. S. Miyakoshi, T. Sugimoto, T. Shirakawa, S. Yunoki, H. Ueda, "Diamond-shaped quantum circuit for real-time quantum dynamics in one dimension", Phys. Rev. Research **6**, 043318 (2024). [事業項目④と共同]

## 【知財（出願手続き中も含む）】

1. なし

## 【対外発表】

1. S. Yunoki, "Quantum many-body simulations using digital quantum computers", SQAI-NCTS Workshop on Quantum Technologies and Machine Learning, Taipei, Taiwan, August 25-29 (2025) [Invited]. [事業項目⑥、⑧と共同]
2. 柚木清司, "物性物理学における量子コンピュータ応用", 大阪大学 固体物理セミナー, 大阪, 2025年7月16日. [事業項目⑥、⑧と共同]
3. S. Yunoki, "Pushing the frontier of quantum-centric supercomputing for electronic structure calculations", RIKEN Fugaku – IBM System Two 連携稼働記念式典「富岳と量子で開拓する計算可能領域シンポジウム」, Kobe, Hyogo, June 24 (2025). [事業項目⑧と共同]
4. S. Yunoki, "Quantum many-body simulations using digital quantum computers", Joint International Workshop on Quantum Computing, Tainan, Taiwan, June 23-25 (2025) [Invited]. [事業項目⑧と共同]
5. S. Yunoki, "Quantum many-body simulations using trapped-ion digital quantum computers", The 2<sup>nd</sup> Workshop on Quantum Computation meets Quantum Many-body Computation, Shanghai, China, June 17-20 (2025) [Invited]. [事業項目⑧と共同]
6. S. Yunoki, "Pushing the frontier of quantum-centric supercomputing for electronic structure calculations", IBM Quantum Partner Forum 2025, London, UK, June 6/4-6 (2025). [事業項目⑧と共同]
7. S. Yunoki, "Quantum many-body simulations using Quantinuum H1 & H2 systems", Quantinuum May 2025 training session, Osaka, May 19-20 (2025) [Invited]. [事業項目⑧と共同]
8. 柚木清司, "Utility scale 量子計算で探る量子多体系の基底状態と量子ダイナミクス", 第2回QIIシンポジウム, 東京, 2025年5月16日. [事業項目⑥、⑧と共同]

# Outcomes 【事業項目⑦】

## 【対外発表（つづき）】

9. N. Lindner, S. Yunoki, "Quantum-enhanced HPC simulations with error mitigation", Q2B Tokyo, Tokyo, May 15-16 (2025).
10. S. Yunoki, "Utility scale quantum computing: From qualitative to quantitative computing", Workshop on Quantum Computing Towards Utility Era with Quantum + HPC, Tokyo, March 10 (2025) [Invited]. [事業項目⑧と共同]
11. 柚木清司, "Utility scale 量子コンピューティング –定性的計算から定量的計算へ–", 2024年度量子・スパコン連携プラットフォームプロジェクトシンポジウム, 東京, 2025年2月12日 [Invited]. [事業項目⑧と共同]
12. 白川知功, "ノイズの大きな量子コンピュータを用いた量子多体系のシミュレーション", 第13回兵庫県マテリアルズ・インフォマティクス講演、オンライン, 2025年1月29日 [Invited]
13. N. Lindner, S. Yunoki, "Pushing forward for quantum advantage with error mitigation and HPC", Q2B Silicon Valley, Santa Clara, USA, December 10-12 (2024). [事業項目⑧と共同]
14. S. Yunoki, "Quantum computational science for quantum many-body systems in condensed matter physics", High Energy Physics in the Quantum Era, Tsukuba, December 2-4 (2024) [Invited]. [事業項目⑥、⑧と共同]
15. S. Yunoki, "RIKEN Quantum: Advancing quantum computational science for scientific research applications", RIKEN-BNL Workshop on Fundamental Quantum Science, Wako, October 4 (2024). [事業項目⑥、⑧と共同]
16. S. Yunoki, "Quantum many-body simulations in digital quantum computers", Recent Progress in Many-Body Theories (RPMBT22), Tsukuba, September 23-27 (2024) [Invited]. [事業項目⑥、⑧と共同]
17. S. Yunoki, "Quantum many-body dynamics in digital quantum computers", RIKEN-LBNL Workshop on Quantum Information Science, Berkley, September 3-6 (2024) [Invited]. [事業項目⑥、⑧と共同]
18. 柚木清司, "量子コンピュータを用いた量子ダイナミックスシミュレーション", 第3回学術変革領域「学習物理」物性関係討論会, 東京, 2024年7月31日-8月1日 [Invited]. [事業項目⑥、⑧と共同]
19. N. Lindner, S. Yunoki, "Pushing forward for quantum advantage with error mitigation and HPC", Q2B Tokyo, Tokyo, July 24-25 (2024). [事業項目⑧と共同]
20. S. Yunoki, "Quantum many-body dynamics in digital quantum computers", 第26回極限宇宙オンラインコロキウム, 2024年7月10日 [Invited]. [事業項目⑥、⑧と共同]
21. S. Yunoki, "Recent advances in utility research: Unveiling clean two-dimensional discrete time quasicrystals on a digital quantum computer", IBM Quantum Partner Forum 2024, Milan, Italy, May 13-15 (2024). [事業項目⑥、⑧と共同]