



2026 年 9 月 14 日

報道関係者各位

慶應義塾大学

少ない量子計算資源で現実的な開放量子系のシミュレーションを実現 ー散逸や粒子損失を含む量子材料・非平衡現象の解析に向けてー

慶應義塾大学 量子コンピューティングセンターの研究グループは、外界との相互作用を受ける量子系である「開放量子系」(※1)を、量子コンピュータを用いて高精度かつ省資源にシミュレーションするための新しい量子アルゴリズムを開発しました。

本研究は、加藤準平氏(慶應義塾大学大学院理工学研究科 後期博士課程学生 兼 株式会社 三菱 UFJ 銀行)、和田凱渡氏(研究当時 同大学大学院同研究科 後期博士課程学生)、伊藤康介氏(トヨタ自動車株式会社)、山本直樹氏(同大学理工学部物理情報工学科教授、慶應義塾大学量子コンピューティングセンター長)らによる産学連携の共同研究成果です。本手法は、新たなランダム量子回路を導入することで、計算に必要な量子ビット等の計算資源を従来よりも大幅に減らすことに成功しています。本成果は、量子材料や非平衡量子現象、輸送現象など、古典コンピュータでは解析が難しい現実的な量子多体系を、将来の初期誤り耐性量子コンピュータで調べるための基盤技術となり、量子多体系の解析を超えた多くの領域への応用が期待されます。

本研究の詳細は、2026 年 9 月 4 日(米国東部夏時間)に、米国科学雑誌『PRX Quantum』のオンライン版に掲載されました。

1. 本研究のポイント

- ・外界との相互作用、散逸、粒子損失などを含む開放量子系の時間発展シミュレーションを、量子コンピュータで高精度かつ効率的に計算する新しい量子アルゴリズムを開発した。
- ・新たなランダム量子回路の設計により、必要な補助量子ビット数を、外界との相互作用を表す単一種類の素過程を埋め込むのに必要な規模まで最小化し、さらに必要な量子ゲート数の削減に成功した。
- ・目標とする計算誤差を小さくした際の量子ゲート数の増加を対数的に抑え、高精度化を図っても計算資源が増加しにくい性質を実現した。
- ・二体粒子損失を伴うフェルミ・ハバード模型や境界駆動された散逸系など、物理的に重要な開放量子系に対して、必要な計算資源を見積もり、従来法と比べて補助量子ビット数を数百個規模からわずかに数個規模へ削減し、さらに量子ゲート(Tゲート)コスト(※2)も数桁削減できることを示した。

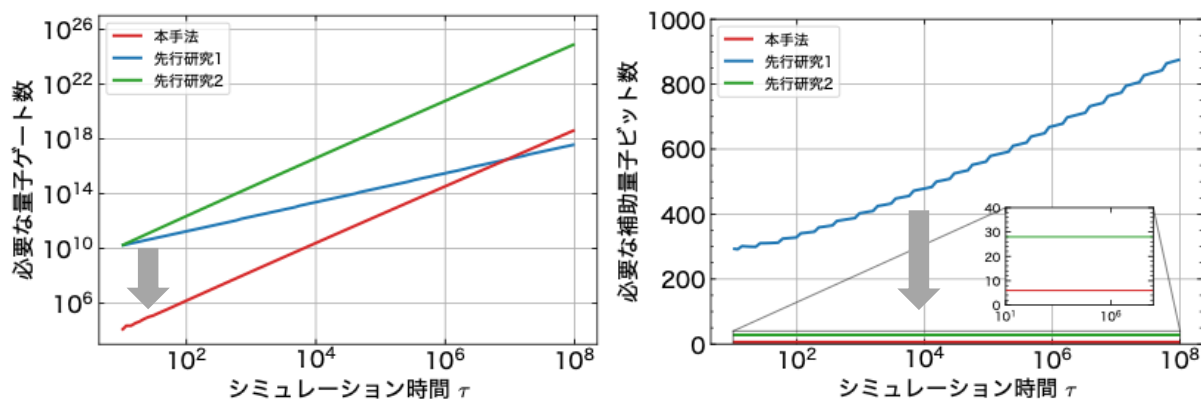


図1： 本研究成果の概要。左：シミュレーション時間と必要な量子ゲートの関係。右：シミュレーション時間と必要な量子ビットの関係。

2. 研究背景

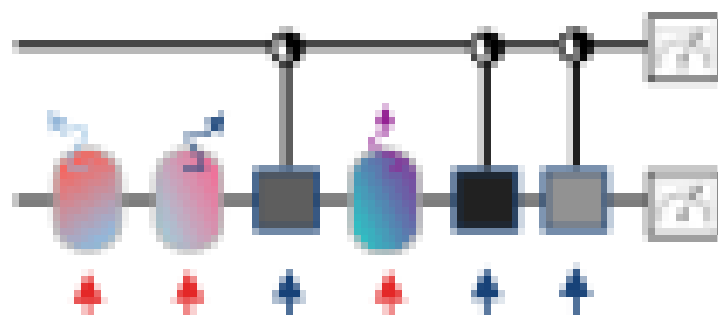
現実の量子多体系は完全に孤立しているわけではなく、周囲の環境と相互作用し、エネルギーの散逸、粒子の損失、非平衡駆動などの影響を受けてしまいます。このような開放量子系は、量子材料における輸送現象、熱化、非平衡相転移などに深く関わっています。開放量子系は典型的にリンドブラッド方程式（※3）によって記述されますが、多数の粒子が相互作用する高次元系では、物理量の期待値を求めるだけでも古典コンピュータによる計算が非常に困難です。このため、量子コンピュータによる開放量子系のシミュレーションが、それらの現象を解析する強力な手段として期待されています。また量子多体系の解析を超えて、当シミュレーション技術の産業応用が研究されています。しかし、既存の高精度な量子アルゴリズムでは、リンドブラッド方程式に含まれる多数のジャンプ過程（※4）を量子回路に同時に埋め込む必要があり、補助量子ビットや複雑な制御量子ゲートを大量に消費するため、初期の誤り耐性量子コンピュータで実行するには大きな課題がありました。本研究では、新たなランダム量子回路を設計することで、従来手法が直面していた課題を解決しました。

3. 研究内容・成果

本研究では、リンドブラッド方程式で表される開放量子系の時間の経過に伴う状態変化のシミュレーションを行い、実験や物理解析で重要となる物理量の期待値を効率よく推定する量子アルゴリズムを構築しました。

最大のアイデアは、すべてのジャンプ過程を一つの量子回路にまとめて埋め込むのではなく、各回路で確率的に選ばれた単一種類のジャンプ過程を組み込み、複数回の実行結果を平均することで全体の開放量子系ダイナミクスを再現することです。これにより、補助量子ビット数を単一種類のジャンプ過程を扱うのに必要な規模まで削減しつつ、目標誤差に対する量子ゲート数の増加を対数的に抑えることに成功しました。また、このアルゴリズムは、対象となるリンドブラッド方程式が極めて多くのジャンプ過程から構成される場合であっても、必要な量子ゲート数が変化しないという特長も保持しています。

さらに、初期の誤り耐性量子コンピュータを想定した計算資源の見積もりを行い、100 サイト規模の二次元量子多体系のベンチマークにおいて、従来法に比べて補助量子ビット数を数百個規模からわずか数個規模へ削減できることを定量的に示しました。加えて、単一ジャンプ過程を扱うという回路構造の単純さを活かして最適化を行うことで、量子ゲートコスト（T ゲート深さ）をさらに数桁削減できる見込みを得ました。こうしたランダム化の恩恵は、さらに拡張が可能であり、より複雑なジャンプ過程にも対応しやすい量子アルゴリズムも提示しています。



ランダムに **単一ジャンプ過程** か **孤立量子系の時間発展** を作用させる

図 2：提案した量子アルゴリズムの概要。開放量子系を特徴づける環境からの影響（ジャンプ過程）をランダムに作用させることで、平均すると元の物理量の期待値が得られる。

4. 今後の展開

量子コンピュータを実用的な科学計算へ応用するうえで、現実の量子系に不可避な散逸や粒子の損失、非平衡駆動を含む開放量子系を効率よく扱うことは重要な課題です。本研究は、そのボトルネックであった多数のジャンプ過程の同時符号化を避け、確率的に選ばれた単一種類のジャンプ過程を用いることで、補助量子ビット数と量子ゲート数を大幅に削減する高精度な手法を提示しました。

この成果は、二体損失を伴う系の過渡ダイナミクスや、境界駆動系における輸送現象や金属絶縁体転移、散逸を利用した量子状態生成、量子材料の非平衡物性など、幅広い領域への応用が期待されます。特に、二次元以上の開放量子多体系は従来の古典コンピュータでは計算が一般には困難であるため、本成果は、将来の初期誤り耐性量子コンピュータによって未解明の量子現象を探索するための重要な一歩となります。また、開放量子系のシミュレーションは、量子現象の解明を超えて、微分方程式のシミュレーションや最適化など産業分野においても多くの応用が期待される技術であり、今後量子シミュレーションが新たな産業ユースケースの開拓を目指します。

<原論文情報>

タイトル : Exponentially Accurate Open Quantum Simulation via Randomized Dissipation with Minimal Ancilla

著者名 : Jumpei Kato*, Kaito Wada* (* Equal contribution), Kosuke Ito, and Naoki Yamamoto

雑誌名 : PRX Quantum 7, 033046 (2026)

DOI : <https://doi.org/10.1103/91yq-swlv>

<用語説明>

※1 開放量子系 : 外部の環境と相互作用し、散逸・粒子損失・ノイズなどの影響を受けながら時間発展する量子系のこと。

※2 量子ゲートと T ゲート : 量子ゲートは量子ビットに対する基本的な計算操作であり、T ゲートは誤り耐性量子計算で特に実装コストが高い非クリフォードゲートの代表例。

※3 リンドブラッド方程式 : 開放量子系の時間発展を、系自体の量子的な運動と環境による散逸過程を含めて記述する標準的な方程式。

※4 ジャンプ過程 : 環境との相互作用によって量子状態が変化する素過程であり、リンドブラッド方程式には通常複数のジャンプ過程が含まれている。

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学理工学部物理情報工学科 山本直樹教授 (やまもとなおき)

TEL : <tel:0455661830> FAX : <tel:0455661587> E-mail : yamamoto@appi.keio.ac.jp

・本リリースの配信元

慶應義塾広報室 TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640

E-mail : m-pr@adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>