

## 論文の内容の要旨

論文題目 超伝導量子演算回路の設計・制御・評価技術

氏名 部谷 謙太郎

量子計算機は量子力学の原理を積極的に活用した計算機であり、その理論模型は1985年に Deutschによって提唱された。1990年代にはShorらによって素因数分解をはじめとした幾つかの問題に対して量子計算機が古典計算機よりも指数的に高速であると証明され、その重要性が認識されるようになった。極低温環境で量子化した超伝導回路からなる超伝導量子ビットは1999年にNakamuraらによって開発され、その高い設計自由度から量子情報処理デバイスの一つとして有力視されている。その後、超伝導量子ビットの設計および制御技術は、回路量子電磁気学の発展と共に体系的に成熟し、2014年にはMartinisらによって5量子ビット回路上でのビット反転エラーに対する古典誤り訂正が実証されるに至った。以降、量子演算回路の集積化研究が本格化し、より多くの量子ビットが搭載された量子演算回路の開発が続々と報告されている。

量子演算回路の構成は、周波数可変型の超伝導量子ビットを用いるものと、周波数固定型の超伝導量子ビットを用いるものに大別される。前者は外部磁束を用いた制御自由度を導入することで高速なもつれ制御( $\sim 10$  ns)の実装を可能とする一方、磁束ノイズによって量子ビットの位相緩和時間が律速( $\sim 20$  us)されることが知られている。後者はシンプルな実装方式を保持するため、前者と比べてもつれ制御が遅い( $100 \sim 400$  ns)ものの、高い位相緩和時間( $\sim 1$  ms)が報告されている。本研究は、主に後者の固定型の方式に則った量子演算回路に立脚している。

固定型のシンプルな構成は集積化に有利であると考えられており、2021年には100量子ビットを超えるサイズの量子演算回路の開発が報告されるようになった。しかし一方で、大規模誤り耐性量子計算の実現にはまだ多くの障壁があると考えられている。特に課題とされているのが、集積化された量子演算回路における量子制御の品質安定化である。量子演算回路上での量子制御は、孤立系の量子制御とは質的に異なる。量子演算回路では、量子ビットが格子上に設置されており、2量子ビットゲートが実行できるよう、十分な強度と位相緩和時間を持って互いに結合している。従って、量子演算回路全体は孤立した量子多体系である一方、その中で制御対象となる部分系は「非マルコフな振る舞いをする周辺量子ビットに晒された開放量子系」と言える。

結合した量子ビットはもつれゲート非実行時であっても残留ZZ相互作用を持つことが知られており、これが量子演算回路の制御品質のボトルネックの一つとなることが2020年にJurcevicらによって報告された。また、2019年にはTripathniらによって周波数衝突と呼ばれる「制御部分系の制御品質を著しく下げようとするような周辺量子ビットの周波数構成」が存在することが報告された。2021年にはWeiらによって周波数衝突のない理想的な状況における2量子ビットゲート忠実度0.998が報告される一方、量子演算回路全体の平均的な2量子ビットゲート忠実度は0.99前後に留まっている。表面符号をはじめとした現状有望視されている量子誤り訂正符号の実用的な動作には0.999程度の制御忠実度が要求されることから、量子演算回路上での量子制御品質の安定化は必須の課題である。

量子演算回路の集積化研究は、古典計算機同様に階層化されており、サンプルの設計や作製、実装といった物理層から、マイクロ波や磁束による制御を司るミドルウェア層、量子誤り訂正層、量子シミュレーションや量子アルゴリズムといったアプリケーション層まで多岐にわたる。本研究では、量子演算回路上での量子制御にまつわる周辺量子ビットの存在に由来する擾乱にデバイス設計・マイクロ波制御・ゲートエラー特性評価といった多角的な視点から取り組んだ。より具体的には、「周辺量子ビット由来の擾乱が発生しにくい量子演算回路設計法（下記成果①）」や、「周辺量子ビット由来の擾乱を避けるためにスパースな結合格子を採用した量子演算回路の演算能力向上のための高忠実度SWAPゲートの実装法(下記成果②)」、「周辺量子ビット由来の擾乱に耐性のある量子制御較正法(下記成果③)」といった技術提案を行うことで、量子演算回路上での量子制御をより安定性の高いものとしていく。本研究ではさらに、上述した技術提案を踏まえた上で、量子演算回路上で動作する制御パルス列生成器と自動・並列制御較正フレームワークを開発した。またこれを用い、16量子ビット量子演算回路上で量子制御を実装することに成功し、1量子ビットゲート忠実度0.9994、2量子ビットゲート忠実度0.982、測定忠実度0.987、初期化忠実度0.997を記録した。さらに量子制御が実装された量子演算回路上で新たに提案した量子シミュレーションアルゴリズムを実装し、水素分子の時間発展シミュレーションに成功した(下記成果④)。

以下に本研究の成果をまとめる。

- (1) 周波数衝突に関してFloquet理論を用いた新たな解析手法を導入することで、より一般化された定義を与えることに成功した。また、同解析を用いることで、従来困難であった同時多モード制御をはじめとした複雑な状況における周波数衝突の予測を可能にした。
- (2) 周波数衝突を避けるために、スパースな結合格子を採用した量子演算回路の演算能力を底上げする高忠実度SWAPゲートの実装法を提案し、実験的に実証した。
- (3) 特定のパウリ回転エラーのみを増幅しつつ、他のパウリ回転エラーを抑制するエコーの設計法を提案し、制御較正の精度と周辺量子ビット由来の擾乱に対する堅牢性を両立させた。

(4) 浅い変分量子回路上で化学系時間発展を効率的に再現する手法を提案し、水素分子の時間発展シミュレーションの原理実証実験を行った。

以上の成果は、量子演算回路上での量子制御の品質安定化という大規模誤り耐性量子計算に向けた喫緊の課題に、物理層からミドルウェア層に渡る多角的なアプローチで、理論・実験の両面から取り組んだものである。量子ビットがコヒーレンスを保ったまま連結した量子演算回路は、極めて複雑な量子多体系であり、その制御は人類未踏のフロンティアである。本研究を通して、制御部分系と周辺量子ビットとの相互作用に関する理解を深めることで、量子演算回路の量子制御のコヒーレントな成分を、制御下におくことが達成された。結果として、量子誤り耐性を伴わないアナログ量子シミュレーションアルゴリズムの原理実証実験を行うに至った。今後はより量子演算回路に関する理解を深めていくことで、量子誤り訂正を実装し、量子制御のインコヒーレントな成分を抑制する研究を進展させることが期待される。

最後に、本論文の章構成を記す。第1章では、研究の背景と意義に関して述べる。ここでは上述した量子演算回路開発の潮流に加え、近年注目されている非誤り耐性量子アルゴリズムに関する研究の現状について述べる。第2章では、本研究の背景理論となる回路量子電磁気学についてまとめる。第3章では、集積化された量子演算回路のアーキテクチャについてまとめる。ここでは、量子演算回路に求められる設計要件や実装手法について、他グループの方式と比較しながら議論する。第4章では、本研究の背景理論となる量子制御の解析・評価技術についてまとめる。第5章では、本研究において用いた実験試料や制御系、制御較正の枠組みについてまとめる。第6章から第8章にかけては、上述した三つの技術提案についてそれぞれ詳述する。第9章では、技術提案を経て量子制御が実装された量子演算回路上での水素分子時間発展シミュレーションの原理実証実験について詳述する。最後に第10章では、本研究の全体を総括し、誤り耐性量子計算の実現へ向けた取り組みと展望について議論する。