

研究領域「革新的な量子情報処理技術基盤の創出」 事後評価（課題評価）結果

1. 研究領域の概要

量子ビットの集積と制御技術によって量子コンピュータハードウェアを「作る」研究に対し、本研究領域では量子を「賢く使う」研究を行います。「賢く使う」とは、量子力学の与える制約や制限されたりソースを巧みに利用した情報処理技術、現実的な物理環境下での大規模量子計算など、何らかの制約の中でも実行可能である、あるいは逆に制約を活用する技術を創造することを意味します。

研究内容としては、フォールトトレラント量子コンピュータを実現するための量子アーキテクチャや量子ソフトウェアから、古典的手法よりも効率よく問題を解く量子アルゴリズム、量子センサと量子コンピュータを統合した高度な量子情報通信技術、量子技術と古典IT技術とを融合した情報処理システム、量子アルゴリズムを利用して社会的問題を解決するアプリケーションまで、ハードウェア開発以外の広範なテーマを対象とします。

さまざまな学術領域の融合・協働により、こうした革新的な情報処理手法の研究開発を進め、社会実装可能な量子コンピューティングを実現するための技術基盤を作り上げることを目指します。

2. 事後評価の概要

2-1. 評価の目的、方法、評価項目及び基準

「戦略的創造研究推進事業（先端的低炭素化技術開発及び先端的カーボンニュートラル技術開発（ALCA-Next）を除く。）の実施に関する規則」における「第4章 事業の評価」の規定内容に沿って実施した。

2-2. 評価対象個人研究者及び研究課題

2020年度採択研究課題

- (1) 品岡 寛（埼玉大学大学院理工学研究科 准教授）
スパースモデリングを用いた固体の革新的量子計算技術の開発
- (2) 曾田 繁利（理化学研究所計算科学研究センター 技師）
量子計算機による量子ダイナミクス研究に向けた技術基盤の創出
- (3) 田島 裕康（電気通信大学大学院情報理工学研究科 助教（テニユアトラック））
量子情報幾何に基づく、対称性・不可逆性・量子性の統一的理論の構築と応用
- (4) 谷本 輝夫（九州大学大学院システム情報科学研究院 准教授）
信頼性を持つ量子コンピュータ・アーキテクチャの研究
- (5) 土持 崇嗣（神戸大学大学院システム情報学研究科 准教授）
多様な電子状態計算を実現する包括的量子アルゴリズムの開発
- (6) 中島 峻（理化学研究所創発物性科学研究センター 上級研究員）
リアルタイム制御ソフトウェアによる量子ビット仮想化
- (7) 水野 雄太（北海道大学電子科学研究所 助教）
離散的化学反応論のための量子計算技術
- (8) 御手洗 光祐（大阪大学大学院基礎工学研究科 准教授）
量子計算における低レイヤータスク分割技術の構築
- (9) 山崎 隼汰（東京大学大学院理学系研究科 助教）
高速な量子機械学習の基盤構築

2-3. 事後評価の実施時期

2023年11月27日（月曜日）事後評価会開催

2-4. 評価者

研究総括

富田 章久 北海道大学大学院情報科学研究院 教授

領域アドバイザー

井上 弘士 九州大学大学院システム情報科学研究院 教授

門脇 正史 産業技術総合研究所 量子・AI融合技術ビジネス開発グローバル研究センター クロスアポイントメントフェロー／（株）デンソーAI研究部基盤技術研究室 担当次長

金本 理奈 明治大学理工学部 教授

小松崎 民樹 北海道大学電子科学研究所 教授

高柳 匡 京都大学基礎物理学研究所 教授

徳永 裕己 日本電信電話（株）コンピュータ&データサイエンス研究所 特別研究員

中島 研吾 東京大学情報基盤センター 教授／理化学研究所計算科学研究センター 副センター長

根来 誠 大阪大学量子情報・量子生命研究センター 准教授

藤井 啓祐 大阪大学大学院基礎工学研究科 教授

増原 英彦 東京工業大学情報理工学院 教授

山下 茂 立命館大学情報理工学部 教授

外部評価者

該当なし

3. 総括総評

当さがけ領域の第2期生として採択された研究者が研究期間を終了した。第2期生は量子コンピュータの社会実装への寄与だけでなく、将来の量子情報技術に貢献する可能性を重視して選考した。その結果、量子情報理論2名、量子コンピュータ理論1名、量子デバイス1名、コンピュータ・アーキテクチャ1名、物性理論2名、量子化学2名が採択された。基礎理論からハードウェア、量子計算応用まで幅広く優秀な研究者を集めることができた。特に、従来人数の少なかったコンピュータ・アーキテクチャや化学反応論という従来の量子化学計算とは異なる分野への応用もフォーカスに入れることができ、より包括的な研究領域となった。

第2期生もパンデミックの影響を強く受けた。対面での領域会議は最終年度のみとなってしまう、研究開始時のサイトビジットもオンラインで行うなど、領域内のコミュニケーションが難しい状況であった。その中で、オンラインによる領域会議でブレイクアウトルームを設置したり、研究者がまとまった時間で研究を紹介する領域セミナーを開催するなど、研究者間の交流促進を試みた。幸い、オンラインを活用した研究者間の交流も自主的に行われ、領域内の共同研究も活発に行われたことは評価したい。やはり、分野は異なるが共通した手法が適用できる場合もあり、通常出会わない研究者が集まることは有益である。また、対面でのサイトビジットは最終年度に実施できた。さがけ研究成果のまとめ方について議論することができ、こちらでも有効であった。

個々の研究では当初の計画通り順調に進んだものもあり、試行錯誤して方針を転換したものもあった。本研究期間に量子コンピュータ実機の利用が容易になったが、一方で近い将来の実用が期待されていた Noisy Intermediate Scale Quantum computer (NISQ) の限界が明確に意識されるようになり、誤り耐性量子計算 (FTQC) に向けて理論研究の流れが変わった時期でもあった。本さがけ研究の中でも NISQ 応用から FTQC に向けた研究へ舵を切ったものもいくつか現れた。本領域では、当初の目論見がうまくいかない場合でも、その理由をきちんと考察して研究計画を変更していくことは今後の発展のためになると考え、このような方針転換をむしろ奨励している。そのためもあって、当初計画していたよりも将来に残りそうな成果をあげることができている。もちろん、順調に進捗した場合でも、当初想定していなかった発見や展開が見られ、総じて優れた研究成果が得られている。

本さがけを通じて異分野の研究者同士が交流できたことは新たな研究領域の開拓に役立っている。例えば、量子コンピュータの研究者とコンピュータ・アーキテクチャ研究者との交流により、量子コンピュータ・アーキテクチャの研究が進展している。この研究は大型の研究プロジェクトに引き継がれるが、大規模 FTQC の実現に貢献することを期待したい。また、領域内の共同研究をきっかけにして学術変革領域研究など、より大きな研究プロジェクトのリーダーへ成長する事例も見られ、さがけの意義を感じている。

さがけ研究期間中に刊行された論文は 66 件あり、その他口頭発表も多数行われ、積極的な共同研究により成果が上がっている。また、受賞は 8 件、9 名中 6 名が期間中の昇任を果たしており、研究者個人の認知度や評価が高められた。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： スパースモデリングを用いた固体の革新的量子計算技術の開発

2. 個人研究者名

品岡 寛（埼玉大学大学院理工学研究科 准教授）

3. 事後評価結果

本研究の目的は量子多体計算理論「動的平均場理論」、データ科学的手法「スパースモデリング」と量子回路を組み合わせた量子-古典ハイブリッドアルゴリズムの開発とそれによる物性予測を行うソフトウェアの開発であった。研究を進めていく中で、必要な計算コストは近い将来実現可能な量子ハードウェアの能力を上回ることが明らかになった。そこで、研究方針を転換し、典型的な量子アルゴリズムである量子フーリエ変換の奥にある原理を用いた准量子計算手法である”Quantics tensor train”の着想に至った。そこでは、スケールの異なる時空依存性を持つ自由度を扱う手法を開発し、それとテンソル分解というこれまで本研究者が研究実績を持つ技法と組み合わせることで情報圧縮演算の道を拓いた。本研究は quantics 表現を利用することで相関関数の圧縮を可能にし、場の量子論の計算の高速化・高精度化を実現するものとして国内外から注目され、オーストリア・ドイツ・フランス・スイスとの国際共同研究に発展している。このように、現状のハードウェアの限界を見極めた上で新しい視点から研究を行い、注目すべき結果を得たことは高く評価できる。

一方、ソフトウェア開発においてもスパースモデリング Python/Julia ライブラリの国際共同開発とチュートリアルを整備や、変分量子アルゴリズムに基づく量子不純物ソルバーの開発を行い、ライブラリ公開などコミュニティの発展に貢献している。

研究補助者の雇用や国際共同研究そして当領域メンバーとのコラボレーションなど、研究の実施体制や研究費の執行も問題なく行われていた。本さがけ研究期間中に領域内部のメンバーとも積極的に共同研究を行うなどして、これが学術変革領域研究 B「量子古典融合アルゴリズムが拓く計算物質科学」採択（領域代表：品岡、2023～2025 年度）および JST 創発的研究支援事業「2 粒子レベルの量子埋め込み理論に基づく新規第一原理計算手法の開発と実証」の採択に結びついた。また、物理学分野の人材交流及び若手育成を目的とした計算物理春の学校を発起し、領域を超えたコミュニティ形成にも尽力していることも評価できる。

査読付き論文 7 報、国際会議における招待講演 4 件と成果が世界的にも注目されている。また、さがけ期間中に埼玉大学大学院理工学研究科 助教から准教授に昇任している。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 量子計算機による量子ダイナミクス研究に向けた技術基盤の創出

2. 個人研究者名

曾田 繁利（理化学研究所計算科学研究センター 技師）

3. 事後評価結果

本研究では Noisy Intermediate-Scale Quantum computer (NISQ) デバイス上での量子多体系のダイナミクスの研究、およびそのために必要な技術基盤の構築を目的とした。特に、NISQ デバイスを用いた量子多体系の解析に関して、実時間発展におけるノイズや鈴木 Trotter 展開の誤差などに起因する技術的な問題を解決するために、ランダム量子状態による完全系の挿入や直交多項式展開の導入、量子トモグラフィにおける情報圧縮など様々な検討を行った。

また、スーパーコンピュータ「富岳」を利用する大規模並列化した密度行列繰り込み群 (DMRG) 法による量子計算シミュレーションプログラムの開発を行った。このようなプログラムは量子コンピュータによる計算のベンチマークを提供するものであり、今後の量子計算の発展に寄与するものと評価できる。量子計算が DMRG に対してどのように優位性を発揮できるのか、これは近い将来の量子コンピュータによる物性計算にとって重要な課題であり、本研究者は富岳のような High Performance Computing と量子アルゴリズムの両方に精通している重要な人材であるため、今後の研究コミュニティの形成などに期待したい。

一方で、本さきがけ研究の内容がほとんど発表されていない。より多くの視点から本研究テーマが議論できるよう、成果の公表と共同研究の推進を今後期待したい。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 量子情報幾何に基づく、対称性・不可逆性・量子性の統一的理論の構築と応用

2. 個人研究者名

田島 裕康（電気通信大学大学院情報理工学研究科 助教（テニュアトラック））

3. 事後評価結果

本研究では、対称性・不可逆性・量子性の間にある普遍的なトレードオフ構造を予想し、実際にこの構造を明示する不等式を証明した。さらに、この方程式を誤り訂正符号、量子計算実装、測定過程、熱力学プロセス、ブラックホール物理をはじめとした多様な対象に適用し、新しい知見を得ている。この不等式は、任意の連続対称性を満たす全体系ダイナミクスで実現する任意の時間発展に適用でき、様々な不可逆性を包含しているため、普遍性が高い。研究の開始以前からある程度の見通しはあったが、不等式を確立し、適用範囲を拡張していくことで、当初の予想をはるかに超えた結果が得られたことを高く評価したい。

この不等式を具体的に適用することで、様々な過程における実現可能な限界の存在が明らかになっている。例えば量子熱力学機関において、コヒーレンスが熱流と散逸の効果を相殺し、古典熱機関に対してオーダーが異なる高い効率を示す可能性を明らかにしている。また、量子計算においても Eastin-Knill の定理の一般化などへの応用が示されている他、本不等式の導出に用いられる数理手法を応用することで、mitigation のサンプリングコストの下限値の導出も行われている。現在の不等式は連続的対称性と加算的な保存則について成立するが、今後これらの条件を外すことでより多くの現象へ適用を広げていくことを期待する。

今回の成果は普遍的であるが、その分社会実装には距離があることは否めない。性急に応用を追求することは本研究の性質からみて有益とは思えないが、一方で現実の条件下で適用できる理論を構築していくことも有効であろう。実験家との協力によりこれまで得られた原理的な結果を具現化することも期待したい。

本研究の成果は Physical Review Letters 4 件を含む 8 件の査読付き論文誌に掲載もしくはアクセプトされている。また、量子情報関係のトップコンファレンスである Quantum Information Processing に口頭発表している他、4 件の国際会議で招待講演を行うなど、国際的にも認知され、量子情報基礎の若手研究者として日本を代表する存在となっている。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 信頼性を持つ量子コンピュータ・アーキテクチャの研究

2. 個人研究者名

谷本 輝夫（九州大学大学院システム情報科学研究院 准教授）

3. 事後評価結果

本研究では信頼性を有する量子コンピュータ・アーキテクチャの開発を目的とした。量子コンピュータの実現にはハードウェアとソフトウェアをつなぐアーキテクチャが重要となるが、従来の量子コンピュータ研究はハードウェア開発とアルゴリズム研究が主であり、本格的なアーキテクチャ研究は不十分である。この状況でコンピュータ・アーキテクチャを専門とする本研究者が参入してきたことは意義のあることと言える。当初は Noisy Intermediate-Scale Quantum computer (NISQ) でのショット数を必要十分な回数に限定する手法の確立を掲げて大規模シミュレーションを計画していたが、有効かつ一般的な議論が難しいことが明らかになり方針を転換した。自身の研究の進展と外部情勢の変化に対応して機動的に研究を進めたことを評価したい。

NISQ については、Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA) を対象としたシステム・アーキテクチャを提案し、20 mK、4K、300K (室温) の各温度ステージでの最適な計算の割り振りと温度ステージ間の通信バンド幅を削減する手法を提案した。

さきがけ領域内の研究者との交流もあり、誤り耐性量子計算 (FTQC) のアーキテクチャ上の課題について検討を進めた。将来の FTQC の実現に向けて潜在的な課題を明らかにし、対策を与えることは今後のハードウェア設計・開発の指針となり得るものである。大規模化の障害となる要素を抽出し、構成の改善により単一希釈冷凍機で 10 万以上の物理量子ビットを収容できる可能性を示した。また、宇宙線によるバースト的な誤りの増大は現実的な問題としても重要である。これに対して、誤りの検出と処理を行うことで論理誤り率を改善できることを示した。

本研究の成果は、コンピュータ・アーキテクチャにおけるトップコンファレンスである International Symposium on Computer Architecture (ISCA) や International Symposium on Microarchitecture (MICRO) に採択された。これは成果そのものに価値があるとともに、量子コンピュータがコンピュータ・アーキテクチャ分野でも認知されてきたことを示すものとして意義のあることだと考える。本研究者は、同時に国内外のコンピュータ・アーキテクチャ研究者ともネットワークを構築し、研究を進めている。また、ムーンショット型研究開発事業や CREST 量子フロンティア・徳永チームにも参画し、量子コンピュータ・アーキテクチャの専門家としての存在感を高めている。また、さきがけ期間中に九州大学情報基盤研究開発センター 助教から九州大学大学院システム情報科学研究院 准教授に昇任した。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 多様な電子状態計算を実現する包括的量子アルゴリズムの開発

2. 個人研究者名

土持 崇嗣 (神戸大学大学院システム情報学研究科 准教授)

3. 事後評価結果

本研究では、エラー耐性のない Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) コンピュータを量子化学計算に応用する際に現れる問題点を解決することを目的とした。特に、強電子相関、励起状態、小規模量子計算の結果から大規模計算の結果を抽出する量子-古典融合に着目した。

強相関系に対しては、変分量子回路 (VQE) において、ある状態に対してエネルギー寄与の大きい回路をアダプティブに選択し更新する手続きである ADAPT-VQE の改良を行った。特に、スピン対称性を満足するような射影演算子を導入することによって量子回路の大幅な短縮に成功している。このことは量子化学計算におけるスピン対称性の重要性を示すものとして重要な知見である。

励起状態の解析においては、主に虚時間発展を用いた計算アルゴリズムの開発を行った。特に、従来標準的に用いられてきた Motta らによる線形方程式の導出に誤りがあることを独自の考察から見出し、修正を行ったことは重要な成果である。さらにこの知見を利用した励起状態の計算アルゴリズムを複数提案し、古典コンピュータでは難しい励起状態の計算の改良に寄与した。

また、多体展開法などの技法によりポストプロセッシングを用いた量子科学計算の補正についても検討し、アルゴリズム実装を自動化するプログラムを開発した。

さらに、本研究で考案した種々のアルゴリズムを包括的に取り扱うシミュレータ「Quket」を開発し、オープンソースとして公開している。このことは NISQ 及び early FTQC (Fault-Tolerant Quantum Computer) における量子化学計算の普及発展に貢献するものとして評価する。今後、原理的な考察を行いながら量子化学計算アルゴリズムのさらなる改良を行い、将来の FTQC につながる成果を得ることを期待したい。

研究成果は 4 件の原著論文、国際会議の招待講演 4 件と国際的にも認知されている。また、さきがけ期間中に神戸大学大学院システム情報学研究科 講師から同准教授に昇任している。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： リアルタイム制御ソフトウェアによる量子ビット仮想化

2. 個人研究者名

中島 峻（理化学研究所創発物性科学研究センター 上級研究員）

3. 事後評価結果

本研究ではシリコン量子ドットを対象に物理量子ビットのリアルタイム制御アルゴリズム、ソフトウェアの開発を行った。研究内容は、(1)量子ビット読み出しセンサの自動制御（読み出しエラーの改善）、(2)量子ビット共鳴周波数キャリブレータ（量子コヒーレンスの改善）、(3)量子ビットのフィードバック初期化（初期化エラーの改善）、(4)量子コンピュータハードウェアの制御 API、の4点である。

量子ビットの読み出しには単一電子センサを用いるが、動作点がドリフトする問題があり、ダイナミックレンジが小さいという問題があった。これに対して、PID 制御を導入し、FPGA による高速な動作点の自動補償を実装しており、当初の計画通りの効果を得ることができている。さらにこのフィードバック制御を量子演算の実行にオーバーヘッドを与えずに行うことを実証し、物理量子ビットの自動制御の端緒となる結果を得たことは評価できる。

固体量子ビットの位相緩和は量子ビットの周波数ドリフトであるとされている。周波数ドリフトに対しても自動フィードバック制御を行うことにより 10Hz 以下の遅いドリフトの低減に成功した。また、複数量子ビット間に起きる電気ノイズの特有な周波数における相関を見出した。さらに、バイス中の核スピン集団を偏極させることによって量子ビット周波数を変化させることを見出し、測定無しで量子フィードバック機構によって量子ビット周波数の安定化を実現する可能性を見出した。この原理を詳しく調べることにより大規模なシステムにも適用することが期待できる重要な成果である。

量子ビットの初期化についても、量子ビットの状態を非破壊測定し、励起状態にある場合にのみビット反転パルスを照射するアクティブリセットを実装した。

リアルタイム制御を伴う高度な量子ビット制御実験を実施するための共通ソフトウェア基盤として、制御 API の整備を行っている。このような API はシリコン量子ビット以外にも活用できる可能性があり、現在研究者になじみ深いものとなっている、Qiskit との結合も予定しているので今後の量子コンピュータの物理量子ビット制御プラットフォームとして期待できる。

本研究は測定とフィードバックを基礎としているので量子演算時の量子ビット制御には適用できないが、測定を行わないで他自由度（この場合は核スピン）とのコヒーレント相互作用を用いた制御を行えばダイナミックな制御が行える可能性もあり、今後に期待したい。

以上のように、本研究は物理量子ビットをリアルタイム制御するアルゴリズム・ソフトウェアの開発により、実効的性能を向上させた仮想量子ビットの実現・検証を行うという目的を達成するとともに、当初想定しなかった知見も得られている。今後ムーンショット型研究開発事業への参加、国内外の半導体関連企業との連携も決まっており、産業応用へ展開する成果が得られている。本研究の成果は Nature や Nature Communication のようなトップジャーナルを含む 10 件の論文で発表されている。また、令和 3 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞なども受賞している。なお、さきがけ期間中に理化学研究所創発物性科学研究センター 研究員から同上級研究員に昇任している。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 離散的化学反応論のための量子計算技術

2. 個人研究者名

水野 雄太（北海道大学電子科学研究所 助教）

3. 事後評価結果

本研究では化学反応論への量子コンピュータ応用を目指した。化学分野への量子コンピュータ応用では量子化学計算が盛んに研究されているが、本研究はそれとは異なった応用に着目した点で評価できる。

研究項目は (A) 化学反応ネットワーク上の経路探索や (B) 化学反応における原子マッピング、(C) 化学反応システムの確率論的速度論解析であり、(A) と (B) は量子アニーリングを、(C) はゲート型量子コンピュータによる線形微分方程式の高速な解法を利用する。量子計算機で化学反応探索の方法が確立すれば、新物質合成や製薬などの発展につながる可能性がある。

このうち経路探索については、量子アニーリングが用いるイジングモデルによる最適化は従来の最適化手法に対して優位性が見い出せていない。この原因が最適化におけるペナルティ項のサイズ依存性にあると考え、領域の他の研究者と共同で制約量子アニーリングを適用することでこの問題を打開しようとしている。

原子マッピングは、与えられた化学反応式において反応物（左辺）と生成物（右辺）の原子間の対応関係を同定する NP 困難な組合せ最適化問題である。この問題はイジングモデルで定式化できるが、最適解の全列挙が必要となり、そのためのプログラムを開発した。大きな問題サイズでは既存アルゴリズムよりも問題を速く解けることを確認している。このように、量子アニーラ（イジングモデル）で効率的に解ける問題と解けない問題を明らかにし、その原因を考察していることは将来の量子アニーラの応用にとって有用であると考えられる。

化学反応システムの確率論的速度論解析の基礎方程式は化学マスター方程式であり、疎な係数行列を持つ高次元線形微分方程式である。次元 N は化学種の数に対して指数的に増大するが、このような方程式は誤り耐性量子コンピュータで効率的に解けることが知られている。しかし、計算結果を効率的に解析する手法は未開拓である。本研究では力学系のシミュレーション結果を効率的に解析する量子動的モード分解アルゴリズムを開発した。提案アルゴリズムは動的モード分解を $O(\text{poly log } N)$ の計算量で実行可能であり $O(N)$ の計算量が必要な古典計算機に対して指数加速を達成している。この動的モード分解アルゴリズムは、汎用的であり流体・力学系などの幅広い適用が期待できる。微分方程式の数値解法についてさきがけ領域内外の研究者と共同研究が始まっている。また、Noisy Intermediate-Scale Quantum computer (NISQ) デバイスを用いて化学マスター方程式の定常状態を計算する変分量子アルゴリズムの検討も行われ、実機（国産 3 号機）を用いることも計画されており、今後の発展に期待したい。

一方で、論文が査読付き論文 1 件と arXiv 2 件のみであることはやや物足りない。成果を拡充してより多くの査読付き論文誌へ掲載されることを望む。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 量子計算における低レイヤータスク分割技術の構築

2. 個人研究者名

御手洗 光祐（大阪大学大学院基礎工学研究科 准教授）

3. 事後評価結果

本研究は当初、大きな量子回路を量子ゲート/量子ビット線切断手法で小さい量子回路へ低オーバーヘッドで分割できるプログラムを開発し、様々な量子回路に適用することを予定していた。この方向でも回路分割手法の改良や擬確率分布サンプリングを応用した量子ゲート切断手法の発展など一定の成果はあったが、汎用的な分割法では大きなオーバーヘッドが生じることが明らかになった。また、この手法を適用する対象として考えてきた VQE の限界が世界的にも認識されるようになり、大きなブレークスルーを与えることが難しい状況になった。そのため、研究方針を転換して誤り耐性量子計算のアプリケーションに特化した研究を進めた。このように、自身の研究の進展と外部情勢の変化に対応して機動的に研究計画を変えていったことを高く評価したい。

この研究方針の見直しによって、想定していなかった重要な成果が得られている。大きな量子回路の局所的な相互作用による時間発展を、相互作用が重要となる部分を表現する小さな量子回路の時間発展で近似的に求める方法が提案された。この方法は、大きさに制限のある量子回路や古典コンピュータによる大規模系のシミュレーションを実現する可能性がある。また、大きな量子系のエネルギーを摂動的に求めるアルゴリズムを開発した。具体的な分子系をテストとして必要なリソースの見積もりも行った。これも大きな系を小さな量子系に分割して計算するために重要な手法となる。この他、摂動論的にパラメータ付き量子回路の最適化や計算基底でのサンプリングによる測定に必要なコストの削減など、計算の効率化に寄与する手法を開発した。以上の成果は early FTQC (Fault Tolerant Quantum Computer) においては特に有効な手法となる可能性がある。

20 件に上る発表論文が示すように、所属先だけでなく外部との共同研究も活発に行っている。特に、共同研究のマネジメントでは中心的な役割を果たしており、研究リーダーとして成長したことが見受けられる。Innovators Under 35 Japan (MIT Technology Review) や Forbes 30 Under 30 Asia List 2022 に選ばれるなど、日本を代表する若手研究者として認知されてきている。また、このさきがけ期間中に大阪大学大学院基礎工学研究科 助教から同准教授に昇任している。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 高速な量子機械学習の基盤構築

2. 個人研究者名

山崎 隼汰（東京大学大学院理学系研究科 助教）

3. 事後評価結果

本研究は量子機械学習と誤り耐性量子計算の実装という 2 つの内容で行われた。当初提案にあった QRAM の実装には触れられなかったが、両方の研究テーマについて極めて優れた成果を得ている。

機械学習の効率化に有用な量子アルゴリズムの研究については、ニューラルネットワーク学習で有効な量子リッジレット変換を開発した。古典コンピュータでは指数時間必要なリッジレット変換がデータ次元に対して線型時間でできることを示した。ニューラルネットワークにおける量子リッジレット変換の応用例も提示し、その有用性を明らかにしている。また、従来量子機械学習に必要であった疎行列・低ランク行列の仮定がなくても大幅な高速化を達成できる量子機械学習アルゴリズムを構築した。具体的には、学習データに合わせて最適化されたランダム特徴量をサンプリングして探す量子アルゴリズムを開発し、既存の古典アルゴリズムに比べてサンプリングタスクを指数的に高速に実行できることを示し、回帰・分類といった機械学習の代表的なタスクを広く効率化できることを示した。また、量子機械学習アルゴリズムがいかなる古典学習手法よりも優位性をもつ教師あり学習タスクを具体的に構築した。これは、古典アルゴリズムに対して優位性のある量子アルゴリズムについて構成可能であり、様々な種類の量子高速化を用いることで量子機械学習の優位性を実験的にデモンストレーションできる道が開かれた。この他に、量子計算や古典計算のエネルギー消費量の上界・下界を定量的に解析できる一般的な理論的枠組みを構築し、量子計算に対する古典計算への優位性をエネルギー消費量の観点から解析を行える理論的枠組みを構築した。

量子アルゴリズムを少ないリソースで効率的に実現するための方法として、実行時間のオーバーヘッドが短く、かつ量子ビット数のオーバーヘッドが定数 $O(1)$ に抑えられた誤り耐性量子計算 (FTQC) の実行手順を、長い量子 LDPC 符号ではなく複数の短い量子符号を接続させることによって具体的に構築した。これは世界で誰も予想しなかった研究成果と言える。

量子情報処理の可能性や原理的限界を解析する理論的道具として量子リソース理論があるが、様々な量子リソースを解析できる一般的な理論的枠組みを確立し、その変換可能性・定量化に関して普遍的な性質を解明した。これは量子計算ばかりでなく広く応用が可能と思われ、基礎的な観点からも興味深い。

以上の成果は新たな量子計算への方向性を示したものであり、今後の実用的な量子コンピュータ実現に向けた指針となるものである。同時に、今後実際のシステムに具現化されていくことを期待したい。これは NeurIPS・ICML といった機械学習のトップコンファレンスや、Nature Physics、Physical Review Letters といった物理学のトップジャーナルで発表された。特に、量子接続符号による FTQC は量子情報分野のトップ会議 QIP2023 でも plenary talk に選ばれるなど世界的にも注目されている。また、本さがけ期間中にオーストリア科学アカデミー量子光学量子情報学研究所 研究員から東京大学大学院理学系研究科 助教に採用された。