

戦略的創造研究推進事業
－さががけ(個人型研究)－

研究領域「革新的な量子情報処理技術
基盤の創出」

研究領域事後評価用資料

研究総括：富田章久

2025 年 2 月

目 次

1. 研究領域の概要	1
(1) 戦略目標	1
(2) 研究領域	1
(3) 研究総括	1
(4) 採択研究課題・研究費.....	2
2. 研究総括のねらい	4
3. 研究課題の選考について	4
(1) 選考の方針について.....	4
(2) 選考概況	5
(3) 選考結果・総評	6
4. 領域アドバイザーについて	9
5. 研究領域のマネジメントについて.....	10
(1) 運営の方針について.....	10
(2) 研究課題の進捗状況の把握と評価、研究課題の指導.....	10
(3) 研究課題間、領域外、国内外の研究機関、異分野との融合・連携・協力の推進..	13
(4) 研究領域としての人材の輩出・成長の状況.....	15
(5) その他マネジメントに関する特記事項.....	21
6. 研究領域としての戦略目標の達成状況について.....	21
7. 総合所見	31

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

「量子コンピューティング基盤の創出」

(2) 研究領域

「革新的な量子情報処理技術基盤の創出」(2019 年度発足)

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」研究を行う。「賢く使う」とは、量子力学の与える制約や制限されたリ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する。

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する。

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す。

(研究領域 Web サイトより引用)

(3) 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)

上記詳細は、以下 URL をご参照ください。

JST 公開資料「新規研究領域の事前評価」

<https://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/index.html>

平成 31 年度新規研究領域の事前評価

https://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/hyouka_h31.pdf

(4) 採択研究課題・研究費

表 1 採択研究課題と研究費一覧

採択 年度	研究者	所属・役職 採択時 ²	研究課題	研究費 ¹ (百万円)
2019 年度	上田 宏	理化学研究所・研究員	テンソルネットワークによる量子 状態圧縮技術の高度化	28.8
		(大阪大学・准教授)		
	大久保 毅	東京大学・特任講師	テンソルネットワーク状態を活用 した量子多体系基底状態計算手法 の開発	12
		(東京大学・特任准教授)		
	倉重 佑輝	京都大学・特定准教授	量子ー古典空間分離法を用いた量 子多体系ソルバーの開発	30
		(京都大学・准教授)		
	杉崎 研司	大阪市立大学・特任講師	量子化学計算の高効率量子アルゴ リズムの開発	23.5
		(大阪公立大学・特任講師)		
	杉山 太香典	東京大学・特任助教	量子演算の高精度化基盤技術開発	17.3
		(富士通(株)・研究員)		
2020 年度	鈴木 泰成	日本電信電話(株)・研究員	ヘテロジニアスな設計と制御に基 づく誤り耐性量子計算	14.6
	Darmawan Andrew Sudiro	京都大学・特定助教	実世界における量子計算に向けた 数値的解析	6.6
	平石 秀史	東京大学・助教	量子ハイブリッド組合せ最適化ア ルゴリズム開発	16.6
		(日本大学・准教授)		
	松崎 雄一郎	産業技術総合研究所・主任 研究員	完全秘匿性を実現する量子 IoT ア ーキテクチャの構築	33
	水上 渉	大阪大学・特任准教授	計算化学のフロンティアを拓く革 新的複素数波動関数量子シミュレ ータの開発	29
		(大阪大学・准教授)		
	上西 慧理子	慶應義塾大学・特任講師	開放系における変分量子アルゴリ ズムの解析と開発	9.9
	品岡 寛	埼玉大学・助教	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	30
		(埼玉大学・准教授)		
2020 年度	曾田 繁利	理化学研究所・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	29.6
	田島 裕康	電気通信大学・助教	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	35
	谷本 輝夫	九州大学・助教	信頼性を持つ量子コンピュータ・ アーキテクチャの研究	30
		(九州大学・准教授)		
	土持 崇嗣	神戸大学・講師	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	35.8
		(神戸大学・准教授)		

	中島 峻	理化学研究所・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	38
		(理化学研究所・上級研究員)		
	水野 雄太	北海道大学・助教	離散的化学反応論のための量子計算技術	30.1
	御手洗 光祐	大阪大学・助教	量子計算における低レイヤータスク分割技術の構築	19
		(大阪大学・准教授)		
	山崎 隼汰	オーストリア科学アカデミー・研究員	高速な量子機械学習の基盤構築	21.8
		(東京大学・助教)		
2021 年度	秋笛 清石	日本電信電話(株)・研究主任	高機能量子通信プロトコルにおける量子操作の分散効率化と評価	10.6
	池田 達彦	東京大学・助教	多体波動関数物性の量子シミュレーション	23.9
		(理化学研究所・研究員)		
	伊藤 悦子	理化学研究所・協力研究員	符号問題が生じる場の理論の古典量子計算法の開発	30.7
		(京都大学・准教授)		
	遠藤 傑	日本電信電話(株)・研究員	量子エラー抑制の基礎理論の構築および実用的手法の提案	0.2
		(日本電信電話(株)・准特別研究員)		
	大戸 達彦	大阪大学・助教	第一原理計算と量子アルゴリズムをつなぐ多階層計算手法の開発	34.2
		(名古屋大学・准教授)		
	桑原 知剛	理化学研究所・研究員	量子多体理論を用いた量子計算機の高速アルゴリズムの開発	26.9
		(理化学研究所・理研白眉研究チームリーダー)		
	本多 正純	京都大学・助教	初期宇宙解明に向けた量子アルゴリズム開発基盤の創成	34.3
		(理化学研究所・上級研究員)		
	山本 大輔	日本大学・准教授	人工量子系における量子状態同定および量子もつれの定量化法の開発	25
吉岡 信行	東京大学・助教	量子並列回路を用いた計算基盤の構築	39	
	(東京大学・准教授)			
渡部 昌平	東京理科大学・講師	虚時間量子ツールボックスの開発	29.6	
	(芝浦工業大学・准教授)			
総研究費				745

¹各研究課題とも研究期間の総額、進行中の課題は予定を含む(2024年12月現在)

²変更/移動のあった場合、下段に括弧つきで記載

2. 研究総括のねらい

本戦略目標は、量子力学的な効果を用いて超並列・大規模情報処理を行う量子情報処理技術におけるハードウェア開発の急速な進展を受け、量子コンピュータのソフトウェア開発やハードとソフトを結ぶアーキテクチャの開発等を行い「量子コンピューティング基盤」の創出を目的とするものである。そのため、達成目標として、以下の3項目が設定されている。

- ① 量子計算アルゴリズムの開発・実装・実証
- ② 量子ソフトウェアの研究開発
- ③ 量子情報処理システムのアーキテクチャ研究開発

以上の目標をふまえ、本研究領域では、複素高次元空間で表される情報を量子力学の与える制約を利用して巧みに処理するという量子情報の本質的な特徴を用いた革新的な情報処理技術から、実現可能な制限されたリソースを活用して行うことができる意味あるタスク、現実的な物理的環境下での大規模量子計算など、制約があっても、あるいは制約を逆に活用する技術を創造するような研究を対象とした。それにより、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た。

分野の垣根を越え将来の量子コンピュータ実現・利用に向けた研究を牽引していく研究者を育成することを目指し、また、これまでに個別のコミュニティで量子コンピュータに興味を抱いている様々な分野の若手研究者が分野の垣根を越えて参画することで、異分野の知識を融合した新たな研究を生み出すネットワークが構築されることを期待した。

3. 研究課題の選考について

(1) 選考の方針について

本研究領域では、量子情報処理技術の将来を世界レベルでリードする新しい研究分野、研究課題を開拓し、これからの量子情報技術基盤の潮流を生み出すことを目指し、さきがけ研究の3年間にとどまらず、量子情報処理技術を活用する社会の実現を見据え、量子情報処理技術のあるべき姿を探求していくような提案を募集した。

研究内容としては、スケーラブルな量子コンピュータを実現するための量子演算の原理、量子アーキテクチャや量子ソフトウェア、量子アルゴリズム、量子情報通信、社会的問題を解決するアプリケーションまで、汎用的な量子コンピュータの実現を見据えた提案はもとより、量子アニーリングやそれをデジタル回路で模倣するシミュレーテッドアニーリング等の研究も対象とした。「量子を賢く使う」ことにより量子情報処理技術の足腰を強くし、大規模量子コンピュータや量子ネットワークの実現に資するような提案を募集した。

アプローチは、数理、シミュレーション、実験のいずれでも構わないものとし、特に、具体的な物に立脚した物理学と、情報の最適な取り扱いを与える計算科学との協働や、古典計

算科学と量子コンピューティングとの協働といった、従来の学術領域の枠組みにとらわれない提案を期待した。特定の量子物理系や実証システムを念頭に置いた研究提案についてはその方針や概念が他の系にも展開可能な一般性をもつことも示すよう要求した。

量子コンピューティングの社会実装には、社会的問題を解決するアプリケーションの研究も含め、分野を越境した研究開発が不可欠であるため、これまで量子コンピュータ等に関する研究に従事してこなかった研究者の参画も大いに歓迎することとした。

さきがけ研究期間の終了時の達成目標は明らかにしつつも、目先の成果にとらわれず、量子情報処理の本質を突くことを重要視し、研究の広がりや量子情報処理技術全体における位置づけを意識した提案をおこなうよう依頼した。既存の概念や提案にこだわることなく、量子情報処理技術の抱える制約を理解し、それを克服あるいは活用していく、独創的で挑戦的なアイデアに基づいた提案を期待した。

(2) 選考概況

2019 年度から 3 年間募集を行い、応募総数 73 件に対して面接対象 52 件、最終的に採択は 30 件となった。女性研究者は 2 名、外国籍研究者は 1 名である。年度別の詳細は以下の表 2 の通りである。

表 2 応募・採択一覧

募集年度	応募・採択研究課題数（件）				
	応募数	面接数	採択数		
				女性	外国籍
2019 年度	26	18	10	0	1
2020 年度	24	17	10	1	0
2021 年度	23	17	10	1	0
合計	73	52	30	2	1

募集をおこなった 3 年間いずれも倍率は 2～3 倍程度に留まった。本さきがけは 2019 年度に発足したが、日本における量子コンピュータ研究は 2005 年から 2011 年頃まで、国や企業からの大型投資が途絶えた「冬の時代」を経験し、この時期には「量子情報」を看板に掲げる研究室も、「量子情報」を専門とするポストも大きく減少したため、応募層となる若手研究者の数が少ないことは事前調査の段階から予見されていた。

そのため、公募においては量子情報未経験者や異分野からの参入を歓迎することを強調し、公募初年度である 2019 年には日本全国の大学に赴き広く応募を呼びかけた。実際、異分野からの参入者が多くを占めることとなり、学術分野の幅が広い研究領域となった。後述のとおり、このさきがけを起点に様々な研究者が異分野融合的な研究を実施し、重要な成果

を挙げている。本研究領域は、量子情報処理研究をリードする若手研究者を育成するという役割を担ったと自負している。

採択研究課題を整理し、学術分野と技術レイヤに分けて配置したポートフォリオとしてまとめた。

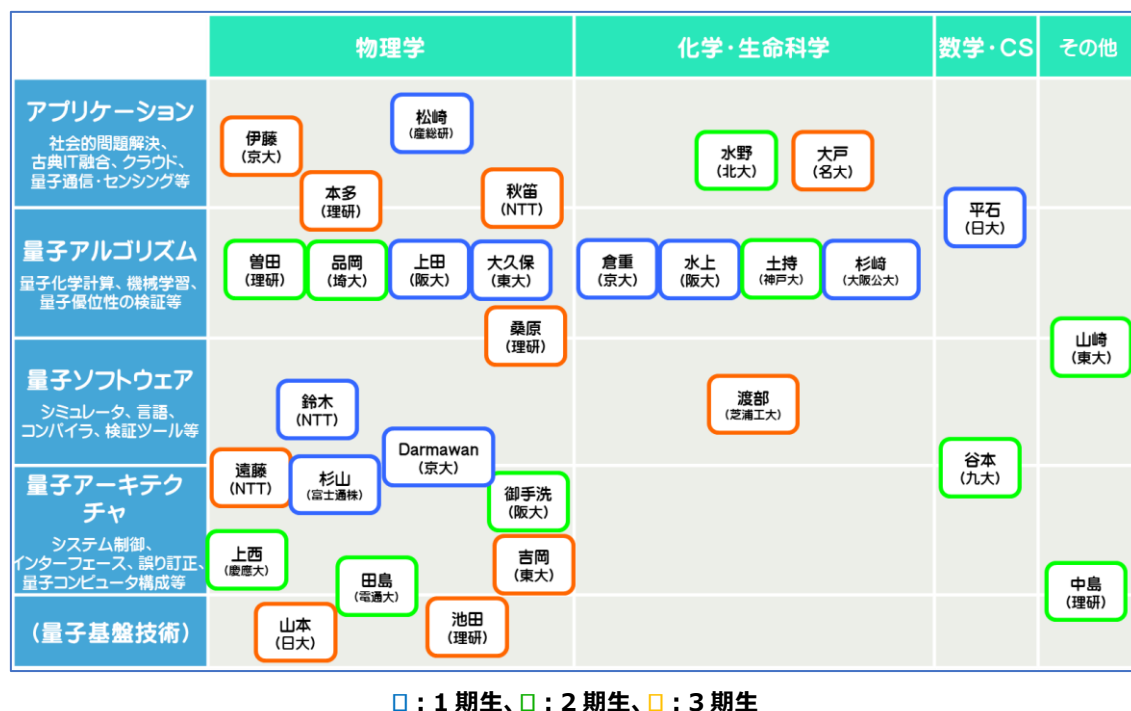


図 1 領域ポートフォリオ

(3) 選考結果・総評

1 期生(2019 年度)選考結果・総評

1 期生には、26 件の応募があった。量子情報以外の研究分野からの応募もあり、異分野融合を目指す本研究領域の趣旨に合うものとなった。12 名の多様な専門分野をもつ領域アドバイザーおよび 1 名の外部評価者による書類選考で選ばれた 18 件について面接を行い、10 件を採択した。利害関係にあるアドバイザーの関与を避け、厳正な選考を行った。また、すべての提案に対し量子情報とその他の分野の両専門家の視点を取り入れて評価した。

選考にあたっては、量子情報処理技術の将来を世界レベルでリードする研究分野、研究課題を開拓し、新たな技術基盤の潮流を生み出すことを目指し、具体的には

- 1) 量子計算アルゴリズム
- 2) 量子ソフトウェア
- 3) 量子情報処理システムアーキテクチャ

の研究の発展に資する提案を求めた。また、量子情報処理技術としての汎用性と発展性がみられるかどうかを重視し、選考をした。

初年度は、物性物理、量子化学、素粒子物理、生命科学といった他分野からの応募の中で、特に量子多体系の計算に関して、量子コンピューティング技術への寄与も期待できる新規性・独創性のある提案があった。一方で、課題解決の鍵としている手法が量子情報技術では既に使われている提案や、自身の課題に量子コンピュータでの最適化を適用するものの、量子計算を用いる必然性が明瞭ではない提案もみられた。最近の研究動向の中での位置づけを明確にしたり、半定量的にでも良いので説得力をもってその手法を用いる意義を示せるよう、練り直していただくことを望んだ。情報科学分野からの提案は少なかったので、2020年度以降の応募に期待した。

量子情報分野からは、手堅く優れた提案が多くあった。しかし、研究テーマ自体は興味深いものの、スケーラブルな量子コンピューティングの実現に向けた道筋が明確でない提案は、残念ながら不採択とした。

全体として、Noisy Intermediate Scale Quantum computer (NISQ) や量子アニーリングなど、現在ホットなトピックを題材にした提案がほとんどで、もう少し遠い将来を見据えた提案がなかったことは残念に思う。若手研究者らしく突き抜けた、量子計算による新しい世界を作るための本質的な問いに答える研究構想を期待した。もちろん、その問いが実際に解けそうなことを、研究動向の調査や事前の解析によって示していただくことは言うまでもない。

2 期生(2020 年度)選考結果・総評

2 年目の応募は 24 件であった。引続き 12 名の多様な専門分野をもつ領域アドバイザーおよび 1 名の外部評価者による書類選考で選ばれた 17 件について面接を行い、10 件を採択した。選考にあたっては利害関係にあるアドバイザーの関与を避け、厳正に行った。また、すべての提案に対し量子情報分野とその他の分野の専門家の両方の視点を取り入れて評価した。

募集において、「量子情報処理技術を活用する社会」の実現を見据えた量子情報処理技術のあるべき姿を探求していくような提案を求めた。具体的には

- 1) 量子情報処理の計算原理・システムアーキテクチャ
- 2) 量子ソフトウェア
- 3) 量子コンピューティングアルゴリズム
- 4) アプリケーション

についての研究提案を募集した。ゲート型量子コンピュータに限らず、量子アニーラ、量子インスパイアの応用技術もスコープに含めた。選考にあたっては、提案の新規性・挑戦性・独創性はもちろんだが、量子情報技術としての汎用性・発展性を重視し、将来の大規模量子コンピュータ・量子ネットワークの実現に資することを重要な観点とした。

2 年目の提案では、生物、材料科学、素粒子物理学といった、初年度提案のなかった分野からも応募があり、量子情報処理技術の広がりを感じさせるものとなった。しかし、量子計

算を用いることの必然性が説得力を持って示されていない提案は残念ながら不採択とした。最適化問題を量子計算に置き換えれば性能が上がるだろうという推察だけでは不十分である。従来の計算手法を凌駕する可能性を示す予備的な解析、あるいは量子を使うことが本質的に必要であることについて根拠に基づく説明を求めた。提案内容によっては、提案する手法によってどのような系での計算が可能になるのか、具体的なキラーアプリケーションを示すことも重要である。

2021 年度も、量子計算や量子によって拓かれる新しい世界についての本質的な問いに答える研究構想を期待した。また、量子生命や量子セキュリティ、量子機械学習といった融合領域において、量子計算と古典的計算手法の有効な役割分担を示し両者を結合する提案も求めた。こうした提案においては、量子計算を使う意義を明確に示していただくことを求めた。

3 期生(2021 年度)選考結果・総評

最終年度の応募は 23 件であった。12 名の多様な専門分野をもつ領域アドバイザーおよび 1 名の外部評価者による書類選考で選ばれた 17 件について面接を行い、10 件を採択した。選考にあたっては利害関係にあるアドバイザーの関与を避け、厳正に行った。また、すべての提案に対し量子情報分野と異分野の専門家の両方の視点を取り入れて評価した。

募集において、「量子情報処理技術を活用する社会」の実現を見据えた量子情報処理技術のあるべき姿を探求していくような提案を求めた。具体的には

- 1) 量子情報処理の計算原理・システムアーキテクチャ
- 2) 量子ソフトウェア
- 3) 量子コンピューティングアルゴリズム
- 4) アプリケーション

についての研究提案を募集した。量子情報処理技術の足腰を強くし、大規模量子コンピュータ、量子ネットワークの実現に資することを重要な観点とした。選考にあたっては、提案の新規性・挑戦性・独創性はもちろんだが、量子情報技術としての汎用性、発展性を重視し、量子情報処理技術全体における位置づけや、直接的な応用に限らず研究の広がりが明確な提案を採択した。

最終年度は、量子情報の基盤や物理学の基礎に切り込む提案があった。量子シミュレーション技法や量子エラーの抑制など量子情報技術の主流となることが期待できる提案とも合わせて、量子情報処理技術に広がりを与える研究を採択することができた。一方、データベースや無線通信に量子アルゴリズムを適用するといった、これまでになかった分野からも応募があった。しかし、量子を用いることの必然性が説得力を持って示されていない提案は残念ながら不採択とした。また、テーマとしては興味深くとも、研究計画や目標、位置づけが明確に述べられなかった提案も採択できなかった。

これで本研究領域の研究者 30 名がそろった。量子情報技術の幅広い側面をカバーする、多様で優れた研究者を集めることができた。領域アドバイザーも交えて、異なるディシプリンをもつ研究者間での知識や経験の交流により新しい流れが生まれることを期待する。本研究領域は量子情報処理分野の発展のほんの始まりである。このさきがけ研究が、量子情報処理技術基盤を深化させ、広く浸透させていく契機になっていくことを望む。

4. 領域アドバイザーについて

本研究領域の領域アドバイザーには、量子情報を専門とする方に加え、アーキテクチャ、ハイパフォーマンスコンピューティング、数理科学、基礎物理学、量子工学等、周辺分野を専門とする方にも参画いただき、学際的な融合の推進を狙った。また、学术界のみならず、産業界からの参画も依頼し、さきがけ研究者が自身の研究の応用についても考えるきっかけとなる触媒の役割を担っていただいた。

また、本研究領域の特色としては、若い世代の方に領域アドバイザーとして参画いただいたことが挙げられる。さきがけ研究者と同世代の方がアドバイザーに加わることで、さきがけ研究者と同じ目線に立った領域運営の立案や、アドバイザー・さきがけ研究者間の議論活性化が叶った。

表 3 領域アドバイザー一覧

領域アドバイザー名 (専門分野)	着任時の所属 ¹	役職	任期
井上 弘士 (コンピュータアーキテクチャ)	九州大学	教授	2019 年 4 月～ 2025 年 3 月
門脇 正史 (量子化学、アニーリング)	(株)デンソー ((株)デンソー/産業 技術総合研究所)	課長 (担当次長/クロスアポ イントメントフェロー)	2019 年 4 月～ 2025 年 3 月
金本 理奈 (量子物理)	明治大学	准教授 (教授)	2019 年 4 月～ 2025 年 3 月
小松崎 民樹 (数理科学)	北海道大学	教授	2019 年 4 月～ 2025 年 3 月
高柳 匡 (素粒子物理、量子情報)	京都大学	教授	2019 年 4 月～ 2025 年 3 月
徳永 裕己 (量子情報、量子計算)	日本電信電話(株)	特別研究員	2019 年 4 月～ 2025 年 3 月
中島 研吾 (コンピュータサイエ ンス)	東京大学	教授	2019 年 4 月～ 2025 年 3 月
	理化学研究所	副センター長	
根来 誠 (量子情報、量子生命)	大阪大学	特任准教授 (准教授)	2019 年 4 月～ 2025 年 3 月

藤井 啓祐 (量子情報)	大阪大学	教授	2019 年 4 月～ 2025 年 3 月
増原 英彦 (コンピュータサイエンス)	東京工業大学 (東京科学大学)	教授	2019 年 4 月～ 2025 年 3 月
山下 茂 (コンピュータサイエンス、量子計算)	立命館大学	教授	2019 年 4 月～ 2025 年 3 月
湊 雄一郎 (量子情報)	MDR(株) (blueqat(株))	代表取締役	2019 年 4 月～ 2022 年 3 月

¹変更/移動のあった場合、下段に括弧つき記載

5. 研究領域のマネジメントについて

(1) 運営の方針について

本研究領域では、目先の成果にとらわれず、量子情報処理の本質を突く独創的な研究に挑戦できる場を提供することを重視し運営を行った。

本研究領域の研究者には、領域開始時から一貫して「量子情報処理技術の将来を世界レベルでリードする新しい研究分野、研究課題を開拓し、これからの量子情報処理技術基盤の潮流を生み出す」ことを要求した。新しい研究分野を開拓するときには、研究の途上で障壁にあたり、方針を再考・修正する必要があるため、本研究領域では、当初の研究計画通りに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た。

また、学術領域の融合・協働を推進するため、本研究領域では、研究者間の交流促進に注力した。具体的な取組みについては後述するが、本研究領域では領域内共同研究が活発に進み、現在までに 20 報の共著論文が出版されている。

(2) 研究課題の進捗状況の把握と評価、研究課題の指導

研究課題の進捗を把握するために、領域会議を年に 2 回と研究室訪問（サイトビジット）を一人あたり 1～2 回実施した。

領域会議は計 11 回開催した。領域の発足後まもなくパンデミックが発生し、対面での会合は 1 期生については第 1 回の領域会議と事後評価会のみ、2 期生については最終年度のみとなり、採択者同士の対面での交流機会が限定されてしまった。そのような中でも、オンラインによる領域会議でブレイクアウトルームの設置、オンラインコミュニケーションツールの活用等により、研究者同士の自由な交流を試みた。パンデミックの状況が改善した後の領域会議は、泊まり込み形式での開催とし、朝から晩まで研究者同士で意見交換ができる環境を用意した。その他、研究者がまとまった時間自身の研究を紹介するオンライン領域セミナーを開催するなど、パンデミック禍においても領域内の共同を生むための仕掛けを積極的に用意した。また、若手研究者を領域アドバイザーとすることでさきがけ研究者同士だけでなく、アドバイザーと研究者の共同研究を促すよう配慮した。採択時のサイトビジットが

オンライン開催となった研究者に対しては、研究後期に追加でオンサイト形式でのサイトビジットを行い、研究環境、進捗状況の確認を行った。

また、オンサイト形式での会議が解禁された直後の領域会議（第 8 回、2023 年 5 月）では、SF プロトタイピング（サイエンスフィクションの技術や手法を用いて、未来社会や科学技術の問題点等を想像する手法および思考法）のワークショップを開催し、研究者同士のコミュニケーション活性化を図った。

また、量子コンピュータ等の実機を利用する環境を整備することを目的に量子コンピュータ等のサービス提供者を招いた講習会を実施した。

表 4 領域会議一覧

	年度		開催形式	場所	参加者	特記事項
第 1 回	2019	11/14-15	オンサイト	東京	1 期生	
第 2 回	2020	4/15-16	オンライン	-	1 期生	
第 3 回	2020	12/17-18	オンライン	-	1 期生 2 期生	ブレイクアウトルームを活用した意見交換会を開催
第 4 回	2021	5/27-28	オンライン	-	1 期生 2 期生	ブレイクアウトルームを活用した意見交換会を開催
第 5 回	2021	11/18-19, 26	オンライン	-	1 期生 2 期生 3 期生	質問セッション、意見交換会（Spatial Chat）を開催
第 6 回	2022	5/25-27	オンライン	-	1 期生 2 期生 3 期生	質問セッション、意見交換会（zoom ブレイクアウトルーム）を開催
第 7 回	2022	12/12, 20-21	ハイブリッド	東京	1 期生 2 期生 3 期生	1 期生課題事後評価会 徳永 AD 特別講演
第 8 回	2023	5/22-24	ハイブリッド	和歌山	(1 期生) 2 期生 3 期生	SF プロトタイピングワークショップ 1 期生研究状況報告（4 名）
第 9 回	2023	11/27-29	ハイブリッド	東京	(1 期生) 2 期生 3 期生	2 期生課題事後評価 井上 AD 特別講演
第 10 回	2024	5/16-17	ハイブリッド	鹿児島	(1 期生) (2 期生) 3 期生	2 期生研究状況報告（2 名）
第 11 回	2024	11/26	ハイブリッド	東京	(1 期生) (2 期生) 3 期生	3 期生課題事後評価

表5 サイトビジット一覧

年度		開催形式	さがけ研究者
2019	1 期生 10 名	オンサイト	上田、大久保、倉重、杉崎、杉山、鈴木、Darmawan、平石、松崎、水上
2020	2 期生 10 名	オンライン	上西、品岡、曾田、田島、谷本、土持、中島、水野、御手洗、山崎
2021	3 期生 10 名	オンサイト	秋笛、池田、伊藤、遠藤、桑原、山本、吉岡、渡部
		オンライン	大戸、本多
2022	2 期生 1 名、3 期生 2 名	オンサイト	山崎、池田、渡部
2023	2 期生 8 名	オンサイト	品岡、曾田、田島、谷本、土持、中島、水野、御手洗
2024	2 期生 1 名、3 期生 8 名	オンサイト	上西、秋笛、伊藤、遠藤、大戸、桑原、本多、山本、吉岡

表6 領域セミナー一覧

開催年月日		イベント名	形式・場所	概要
2019	7/3	総括、AD 向け実機説明会	オンサイト・東京	日立 CMOS アニールマシン、富士通デジタルアニール、D-wave を紹介
	10/15	1 期生向け実機説明会	オンサイト・東京	日立 CMOS アニールマシン、富士通デジタルアニール、D-wave を紹介
2021	10/29	領域セミナー	オンライン	講師：門脇 AD、御手洗
	12/15	AWS 社講習会	オンライン	Amazon Bracket 講習会
2022	4/11	領域セミナー	オンライン	講師：上田、大久保
	6/17	領域セミナー	オンライン	講師：倉重、水上
	7/22	領域セミナー	オンライン	講師：鈴木
	8/24	領域セミナー	オンライン	講師：Darmawan、平石
	10/5	領域セミナー	オンライン	講師：杉崎、松崎
	11/4	領域セミナー	オンライン	講師：森前先生（京大）、米澤様（Quantinuum K.K.）（外部招待）
2023	8/16	AWS 社講習会	オンライン	Amazon Bracket 講習会
	8/28	領域セミナー	ハイブリッド・東京	講師：田島、中島
	11/1	領域セミナー	ハイブリッド・東京	講師：品岡、曾田

(3) 研究課題間、領域外、国内外の研究機関、異分野との融合・連携・協力の推進

領域間/領域外連携イベントとして、ワークショップ・合同セミナー・学会ジョイントポスターセッションおよびシンポジウム（公開）を実施し、領域研究成果の共有を図った。

表 7 領域間/領域外連携イベント一覧

開催年月日		イベント名	形式・場所	概要
2023	8/1	ICReDD・情報科学研究所・さがけ量子情報処理領域共催ワークショップ～量子情報処理技術の化学応用に向けて～	ハイブリッド・北海道	・講師：水野、土持、北海道大学 宮原、原渕 ・ポスター発表 ・株式会社 QunaSys によるハンズオン
2023	9/13	JST ささがけ「革新的コンピューティング」×「量子情報処理」合同セミナー	ハイブリッド・福岡	講師：谷本、御手洗、山崎、さがけ革新的コンピューティング領域研究者 5 名
2024	8/26, 27, 29	AQIS24Sapporo におけるポスター発表	オンサイト・北海道	発表者：田島、水野、御手洗、大戸、吉岡、渡部
2025	2/5	JST ささがけ 3 領域合同セミナー	オンサイト・東京	発表者：秋笛、山本、量子協奏領域研究者 2 名、量子フロンティア領域研究者 1 名

表 8 シンポジウム一覧

開催年月日		場所	形式	発表者
2020	9/23	さがけ「量子情報処理」領域×SGinnovate(シンガポール)オンラインセミナー	オンライン	杉山、松崎
2020	10/13	さがけ「量子情報処理」領域×SGinnovate(シンガポール)オンラインセミナー	オンライン	平石、水上
2023	2/2	2022 年度公開シンポジウム - 1 期生成果報告 -	オンライン	1 期生 10 名 門脇 AD 基調講演
2024	3/7	2023 年度公開シンポジウム - 2 期生成果報告 -	オンライン	2 期生 10 名 山下 AD 基調講演
2025	2/6	2024 年度公開シンポジウム - 3 期生成果報告 -	オンライン	2 期生 1 名 3 期生 9 名 根来 AD 基調講演

表9 領域内共著論文一覧

#	論文表題	領域内共著者	掲載誌名	発行年月日
1	Direct estimation of the energy gap between the ground state and excited state with quantum annealing	杉崎 研司 松崎 雄一郎	Japanese Journal of Applied Physics	2021/02/10
2	Qulacs: a fast and versatile quantum circuit simulator for research purpose	鈴木 泰成 御手洗 光祐	Quantum	2021/10/06
3	Quantum algorithm for the calculation of transition amplitudes in hybrid tensor networks	鈴木 泰成 遠藤 傑	Physical Review A	2021/10/27
4	Quantum Error Mitigation as a Universal Error Reduction Technique: Applications from the NISQ to the Fault-Tolerant Quantum Computing Eras	鈴木 泰成 遠藤 傑	PRX Quantum	2022/03/18
5	Deep Variational Quantum Eigensolver: A Divide-And-Conquer Method for Solving a Larger Problem with Smaller Size Quantum Computers	上田 宏 水上 渉 御手洗 光祐	PRX Quantum	2022/03/21
6	Hybrid quantum-classical algorithm for computing imaginary-time correlation functions	水上 渉 品岡 寛	Physical Review Research	2022/06/16
7	Generalized Quantum Subspace Expansion	松崎 雄一郎 鈴木 泰成 吉岡 信行 遠藤 傑	Physical Review Letters	2022/07/06
8	Quadratic Clifford expansion for efficient benchmarking and initialization of variational quantum algorithms	水上 渉 鈴木 泰成 御手洗 光祐	Physical Review Research	2022/07/06
9	Quantum expectation-value estimation by computational basis sampling	水上 渉 御手洗 光祐	Physical Review Research	2022/09/02
10	Q3DE: A fault-tolerant quantum computer architecture for multi-bit burst errors by cosmic rays	鈴木 泰成 谷本 輝夫	2022 55th IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture	2022/10/01
11	Quantifying fermionic nonlinearity of quantum circuits	水上 渉 御手洗 光祐	Physical Review Research	2022/11/14
12	DMRG study of the higher-charge Schwinger model and its 't Hooft anomaly	伊藤 悦子 本多 正純	Journal of High Energy Physics	2022/11/24

13	Constructing Local Bases for a Deep Variational Quantum Eigensolver for Molecular Systems	水上 渉 御手洗 光祐	Physical Review Applied	2022/12/16
14	WIT-Greedy: Hardware System Design of Weighted Iterative Greedy Decoder for Surface Code	鈴木 泰成 谷本 輝夫	Proceedings of the 28th Asia and South Pacific Design Automation Conference	2023/1/31
15	Subspace variational quantum simulator	鈴木 泰成 御手洗 光祐	Physical Review Research	2023/05/01
16	Perturbation theory with quantum signal processing	水上 渉 御手洗 光祐	Quantum	2023/05/12
17	Circuit Designs for Practical-Scale Fault-Tolerant Quantum Computing	鈴木 泰成 谷本 輝夫	2023 IEEE Symposium on VLSI Technology and Circuits	2023/06/11
18	Virtual Quantum Error Detection	吉岡 信行 遠藤 傑	Physical Review A	2023/10/25
19	Hunting for quantum-classical crossover in condensed matter problems	水上 渉 吉岡 信行 大久保 毅 鈴木 泰成	npj Quantum Information	2024/04/29
20	Localized Virtual Purification	吉岡 信行 遠藤 傑	Physical Review Letters	2024/08/22

(4) 研究領域としての人材の輩出・成長の状況

(キャリアアップ、国内外の顕彰・受賞や、国際会議での招待講演の状況)

- 研究者の昇任・異動状況：昇任・異動した研究者は研究期間終了直後も含めると 23 名と総数 (30 名) の 8 割程となっており、本研究領域への採択および研究期間中の成果が、多くの研究者のキャリアアップを実現した。

表 10 採択時から現在までのキャリアアップ・異動状況 (所属・役職)

	研究者名	採択時	終了時	2024 年 12 月現在
1 期生	上田 宏	理化学研究所・研究員	大阪大学・准教授	同左
	大久保 毅	東京大学・特任講師	東京大学・特任准教授	同左
	倉重 佑輝	京都大学・特定准教授	京都大学・准教授	同左
	杉崎 研司	大阪市立大学・特任講師	大阪公立大学・特任講師	慶應義塾大学・特任准教授
	杉山 太香典	東京大学・特任助教	富士通(株)・研究員	同左
	鈴木 泰成	日本電信電話(株)・研究員	日本電信電話(株)・研究員	同左
	Darmawan Andrew Sudiro	京都大学・特定助教	同左	京都大学・特定講師

	平石 秀史	東京大学・助教	日本大学・准教授	日本大学・教授
	松崎 雄一郎	産業技術総合研究所・主任研究員	産業技術総合研究所・主任研究員	中央大学・准教授
	水上 渉	大阪大学・特任准教授(常勤)	大阪大学・准教授	大阪大学・教授
2 期 生	上西 慧理子	慶應義塾大学・特任講師	同左	
	品岡 寛	埼玉大学・助教	埼玉大学・准教授	同左
	曾田 繁利	理化学研究所・技師	同左	同左
	田島 裕康	電気通信大学・助教	同左	同左
	谷本 輝夫	九州大学・助教	九州大学・准教授	同左
	土持 崇嗣	神戸大学・講師	神戸大学・准教授	芝浦工業大学・教授
	中島 峻	理化学研究所・研究員	理化学研究所・上級研究員	同左
	水野 雄太	北海道大学・助教	同左	同左
	御手洗 光祐	大阪大学・助教	大阪大学・准教授	同左
	山崎 隼汰	オーストリア科学アカデミー・研究員	東京大学・助教	同左
3 期 生	秋笛 清石	日本電信電話(株)・研究主任	—	同左
	池田 達彦	東京大学・助教	—	理化学研究所・研究員
	伊藤 悦子	理化学研究所・協力研究員	—	京都大学・准教授
	遠藤 傑	日本電信電話(株)・研究員	—	日本電信電話(株)・准特別研究員
	大戸 達彦	大阪大学・助教	—	名古屋大学・准教授
	桑原 知剛	理化学研究所・研究員	—	理化学研究所・理研白眉研究チームリーダー
	本多 正純	京都大学・助教	—	理化学研究所・上級研究員
	山本 大輔	日本大学・准教授	—	同左
	吉岡 信行	東京大学・助教	—	東京大学・准教授
	渡部 昌平	東京理科大学・講師	—	芝浦工業大学・准教授

- 顕彰状況：文部科学大臣表彰若手科学者賞や MIT Technology Review Innovators Under 35 など、本研究領域の研究者が国内外の第三者からも高く評価されている。

表 11 研究者の主な受賞履歴

	研究者名	賞の名称	授与者名	受賞時期
1 期 生	杉崎 研司	電子スピンスイセンス学会 奨励賞	電子スピンスイセンス学会	2019/11/08
	鈴木 泰成	優秀発表賞	情報処理学会 量子ソフト ウェア研究会	2022/10/27
	鈴木 泰成	MIT Technology Review Innovators Under 35	MIT テクノロジーレビュー [日本版]	2022/12/15
2 期 生	御手洗 光祐	Innovators Under 35 Japan	MIT Technology Review	2021/02/19
	御手洗 光祐	Forbes 30 Under 30 Asia List 2022	Forbes	2022/05/26
	御手洗 光祐	大阪大学賞（若手教員部 門）	大阪大学	2023/11/22
	田島 裕康	第 18 回（2024 年）日本物 理学会若手奨励賞	日本物理学会	2024/03
	土持 崇嗣	前之園記念若手優秀論文賞	神戸大学	2022/07/07
	土持 崇嗣	優秀若手研究者賞	神戸大学	2022/11/10
	中島 峻	理研梅峰賞	理化学研究所	2022/03/23
	中島 峻	文部科学大臣表彰若手科学 者賞	文部科学省	2021/04/14
3 期 生	中島 峻	第 14 回（2022 年度）応用 物理学会 シリコンテクノ ロジー分科会 論文賞	応用物理学会 シリコンテク ノロジー分科会	2023/03
	吉岡 信行	優秀発表賞	情報処理学会 量子ソフト ウェア研究会	2022/03/24
	吉岡 信行	優秀発表賞	情報処理学会 量子ソフト ウェア研究会	2023/03/13
	吉岡 信行	科学技術への顕著な貢献 （ナイスステップな研究者 2023）	文部科学省	2023/12/15
	吉岡 信行	山下記念研究賞	情報処理学会	2023/07/28
	吉岡 信行	Innovators Under 35 Japan	MIT Technology Review	2024/11/01
	本多 正純、 伊藤 悦子ら	Editor' s Choice in Progress of Theoretical and Experimental Physics	日本物理学会	2022/03
	遠藤 傑	Innovators Under 35 Japan	MIT Technology Review	2021/12/16

	遠藤 傑	Project Management Institute, Future 50	Project Management Institute	2022/07/12
	山本 大輔	強磁場フォーラムフロンティア奨励賞	強磁場フォーラム	2024/12/18
	池田 達彦	東京大学物性研究所所長賞 ISSP 学術奨励賞	東京大学物性研究所	2023/03
	池田 達彦	文部科学大臣表彰若手科学者賞	文部科学省	2023/04

※1 期生／2 期生は研究終了時まで、3 期生は 2024 年 12 月時点まで

- 招待講演：国内会議での招待講演は 111 件、国際会議での招待講演は 111 件に上る。著名な会議での招待講演の実績について以下に示す。量子情報理論から量子化学、量子色力学まで、幅広い分野で本さきがけの成果が評価されていることが見受けられる。

i) 1 期生

倉重 佑輝 研究者

- “Hybrid with classical quantum chemistry algorithms for real-world chemistry,” Q2B2022 2022 年 7 月

鈴木 泰成 研究者

- “Simulation of quantum circuits and beyond,” IEEE Quantum Week 2022 2022 年 9 月

ii) 2 期生

田島 裕康 研究者

- “Universal trade-off structure between symmetry, irreversibility and quantum coherence” APS March meeting 2023 年 3 月

中島 峻 研究者

- “Simulation of quantum circuits and beyond Coherence improvement of semiconductor spin qubits via active noise cancelling,” The 20th International Symposium on the Physics of Semiconductors and Applications 2022 年 7 月

iii) 3 期生

吉岡 信行 研究者

- “What is optimal way to mitigate, suppress quantum errors?” APS March meeting 2024 年 3 月

伊藤 悦子 研究者

- “Speed of sound exceeding the conformal bound in dense 2-color QCD” The 40th International Conference on Lattice field theory (LATTICE 2023) 2023 年 8 月

- 競争的資金獲得状況：

本研究領域の成果を元にさらに多くの競争的資金獲得に成功している。本研究領域で出会った研究者が共同して CREST や学術変革などの大型のプロジェクトに発展させる事例が複数あることを特筆したい。

- JST 関連
 - CREST「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」
研究代表者：上田 宏
主たる共同研究者：倉重 佑輝、松崎 雄一郎、谷本 輝夫、伊藤 悦子、本多 正純、吉岡 信行
 - さきがけ「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」
個人研究者：山崎 隼汰
 - さきがけ「物質と情報の量子協奏」
個人研究者：松崎 雄一郎、山本 大輔
 - さきがけ「未来を予測し制御するための数理を活用した新しい科学の探索」
個人研究者：水野 雄太
 - 創発的研究支援事業「伊丹/福島パネル」、創発研究者：倉重 佑輝
 - 創発的研究支援事業「北川パネル」、創発研究者：土持 崇嗣
 - 創発的研究支援事業「川村パネル」、創発研究者：品岡 寛
 - 創発的研究支援事業「酒見パネル」、創発研究者：田島 裕康
- 科学研究費補助金
 - 学術変革領域研究(B)：「量子古典融合」
代表：品岡 寛、分担：大久保 毅、水上 渉、御手洗 光祐

● プレスリリース

研究成果の積極的な外部発表を推奨し、さきがけの成果として認められ、国際的にトップクラスの成果であり社会に向けて発信する意義があると判断できるものについては、JSTとの共同プレスリリースを実施した。JSTとの共同プレスリリースは現時点で21件である。

表 12 共同プレスリリース一覧

発表者	プレス件名	計算論文誌	プレス 発表日
杉崎 研司	量子化学計算の常識を覆す新手法スピン状態間のエネルギー差を直接求めることができる新規量子アルゴリズムの開発に成功	Chemical Science	2020. 12. 24
杉崎 研司	原子・分子のイオン化エネルギーを量子コンピューターで直接計算する手法を開発 ～化学研究に役に立つ量子アルゴリズム～	The Journal of Physical Chemistry Letters	2021. 03. 17
杉崎 研司	量子化学計算のための汎用量子アルゴリズム量子コンピューターで原子・分子の任意のエネルギー差を直接計算できる新規量子アルゴリズムを開発	Physical Chemistry Chemical Physics	2021. 09. 02

田島 裕康	熱の流れに量子効果が与える影響の解明 ～エネルギーロスのない熱流の発見と、 量子熱機関への応用～	Physical Review Letters	2021. 11. 05
鈴木 泰成 遠藤 傑	実用化に必要な誤り耐性量子コンピュー ターの規模を飛躍的に小さくする技術を 開発～世界初の量子誤り訂正／抑制のハ イブリッド方式を提案～	PRX Quantum	2022. 03. 18
桑原 知剛	有限温度状態での量子もつれに関する普 遍的性質の発見～有限温度では標準的な 長距離量子もつれは存在しない～	Physical Review X	2022. 04. 26
吉岡 信行 鈴木 泰成 松崎 雄一郎 遠藤 傑	量子計算機のハードウェアとアルゴリ ズムのエラーを抑制できる手法を開発～演 算を高精度化する一般的な枠組みを提唱 ～	Physical Review Letters	2022. 07. 06
杉崎 研司	量子コンピューター上での量子化学計算 の効率向上へ～分子の波動関数を生成す る ASP 法の実用化に大きな一歩～	Communications Chemistry	2022. 07. 25
鈴木 泰成 谷本 輝夫	バーストエラーに耐性のある量子コンピ ューターのアーキテクチャーを世界で初 めて提案～量子コンピューターの動作状 況に合わせ機能する誤り訂正機構を実現 ～	The 55th IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture (MICRO -55)	2022. 09. 30
杉崎 研司	エネルギー微分を直接計算し分子構造最 適化を実現～量子コンピューターによる 化学計算の社会応用へ大きな一歩～	The Journal of Physical Chemistry Letters	2022. 11. 29
松崎 雄一郎 遠藤 傑	世界初、未知ノイズの影響を削減可能な 量子センシングアルゴリズムを考案～高 精度な量子センシングをハードウェアの 改善なしに実現～	Physical Review Letters	2022. 12. 16
品岡 寛	量子力学世界を「スケール分離」する～ 計算機シミュレーションの大幅な効率化 に期待～	Physical Review X	2023. 04. 27
中島 峻	シリコン量子ビットのフィードバック型 初期化技術を開発～量子コンピューター デバイスの不完全性に処方箋～	npj Quantum Information	2023. 06. 01
田島 裕康	量子系から取り出せる量子コヒーレンス の最大量を理論的に解明	Physical Review Letters	2023. 11. 20
吉岡 信行	量子コンピューターのエラー抑制技術の 理論限界を解明～最適な量子エラー抑制 手法の設計に向けて～	Physical Review Letters	2023. 11. 23
田島 裕康	量子コンピューターのノイズ効果を抑制 する量子誤り抑制法の原理的性能限界を 解明	Physical Review Letters	2023. 11. 23
吉岡 信行	対称性の下での量子擬似ランダム性の振 る舞いを解明 ―より効率的な量子情報 処理手法の開発に向けて―	PRX Quantum	2023. 11. 28
山崎 隼汰	入れ子構造による量子コンピューターの 新しい仕組みを提案～高効率性と高速性 を両立する誤り耐性手法～	Nature Physics	2024. 01. 16

大戸 達彦	最高の熱起電力を持つ分子熱電変換デバイスを開発～光量子アルゴリズムにより電流が誘起する分子振動も予測～	Journal of the American Chemical Society	2024. 02. 13
吉岡 信行	非線形トポロジカル物質の基本原則を解明～頑健性と柔軟性を併せ持つデバイスの設計原理に向けて～	Nature Physics	2024. 04. 01
山本 大輔	エントロピー制御による量子シミュレーターの極低温冷却法を確立～高温超伝導や量子磁性などの仕組みの解明に期待～	Physical Review Letters	2024. 05. 21

(5) その他マネジメントに関する特記事項

その他のマネジメントに関しては、ライフイベントへの対応や JST 知的財産マネジメント推進部からの支援を実施した。

- ライフイベントへの対応（研究期間中断）：

研究者 2 名がライフイベントによる研究機関の中断・延長制度を利用した。研究復帰後には状況確認としてサイトビジットを実施した。2 名とも再開後に優れた成果が得られており、ワークライフバランスを適切にとっていく研究者としてのロールモデルとなることも期待する。

- JST 知的財産マネジメント推進部からの支援活動：

領域会議には JST の知的財産マネジメント推進部の知財サポーターに参加してもらい、特許出願の可能性を検討した。その結果、知財サポーターが発掘した発明 1 件について、JST による権利化に至った。

6. 研究領域としての戦略目標の達成状況について

本研究領域の戦略目標

【概要】

量子力学的な効果を用いて超並列・大規模情報処理を行う量子情報処理技術は、近年、ハードウェア開発が急速に進展している。その動きに伴い、ハードウェアを使いこなすためのソフトウェア開発の重要性が急激に高まり、世界的な開発競争が開始された。そのため、我が国においても、計算機科学、物理学、数理工学等の分野が結集し、「量子コンピュータサイエンス」分野を新たに立ち上げ、量子コンピュータのソフトウェア開発やハードとソフトを結ぶアーキテクチャの開発を進める。これにより、量子情報処理分野での長期的な国際競争力を確保するとともに、Society5.0 時代に対応した超高速情報処理基盤の構築を目指す。加えて、観測・制御できる量子領域を拡大することで、新しい視点を生み、未解決問題の解決、未踏分野の開拓につなげる。

【達成目標】

- ① 量子計算アルゴリズムの開発・実装・実証

将来の量子コンピュータで実行可能な量子・古典アルゴリズムの探索・開発を行う。特に、近似最適化、機械学習、検索、量子化学計算など、エンドユーザにとって重要な問題のアルゴリズムを設計する。また、スパコン等を用いたシミュレーションとの比較によって量子優位性を検証できるプロトコルやアルゴリズムを開発する。

② 量子ソフトウェアの研究開発

量子・古典プログラムを実機・シミュレータ上で実行するために必要となるソフトウェア開発プラットフォームを構築する。特に、シミュレータ、プログラミング言語、コンパイラ、API、ライブラリ、検証ツールなど様々なツールを開発する。

③ 量子情報処理システムのアーキテクチャ研究開発

量子コンピュータの構成要素の特定と抽象化レベルの決定、および各要素間のインターフェースを設計する。小規模・近似型についてはドメイン志向アーキテクチャに、大規模・誤り耐性型については誤り訂正符号に基づいて、アーキテクチャの設計・最適化を行う。

【研究開発成果】

量子コンピュータの研究開発の動向が大きく変化する中で、上記の達成目標は研究の潮流に合わなくなっているものもある。本研究領域では、研究の進展や外部情勢の変化により当初の目論見がうまくいかない場合には柔軟に方針転換することを奨励してきた。その結果として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。大規模量子コンピュータの実現と社会実装に向けた研究開発の新しい流れを作り出しており、戦略目標の意図は十分達成できたものと考えている。

以下、各到達目標に対応する主な研究成果を述べる。

① 量子計算アルゴリズムの開発・実装・実証

量子計算アルゴリズムについては、NISQ を想定してその制約の中で効率的な計算方法を開発する方向と誤り耐性量子計算 (FTQC) で量子優位性を発揮できるアルゴリズム開発のふたつが考えられる。量子計算の応用先としては量子化学計算や関連の強い多体系が考えられている。また、本研究領域の研究者がパイオニアとなって相対論的な場の量子論への適用も考えられている。さらに量子アルゴリズムは計測や通信への応用も考えられる。これらの計算アルゴリズムの開発をモチベーションとして、その根底にある量子情報理論にも新たな知見をもたらしている。また、量子コンピュータを制御可能な量子多体系のモデルとみなして新たな物理を発展させることも試みられた。

NISQ 応用

1 期生の大久保は、物性物理の問題では一般に成立する並進対称性を仮定して古典コンピュータ上のテンソルネットワークと NISQ を組み合わせる新しい量子-古典ハイブリッドアルゴリズムを提案し、それが機能するための条件を明確にした。本手法は長距離相関

を古典的に計算可能な量子状態に担わせ、短距離相関による補正をNISQで行うもので一般的な量子 - 古典ハイブリッド計算アルゴリズムの設計指針として有効であると思われる。

量子化学へのNISQ応用について、1期生の倉重は量子変分固有値解法（VQE）に準粒子変換を導入することで量子系を表現する量子回路（Ansatz）を新たに考案し、実装と検証を行った結果、短い量子回路を用いても十分な近似精度が得られることが示された。さらに、初期状態に古典計算機で準備可能なエンタングルメント状態を用意することによってVQEに必要な量子計算の反復を削減できることを示した。

また、2期生の土持は、変分量子回路（VQE）において、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の改良を行い、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。また、土持は、虚時間発展を用いた励起状態の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。

3期生の大戸は従来の第一原理計算では精度が不足する量子化学の問題に対して、系の重要な部分を量子・古典混合アルゴリズムで解き、埋め込みポテンシャルとして密度汎関数法を用いる計算パッケージを開発している。このための第一原理計算（CP2K）と量子アルゴリズム（Qulacs）を橋渡しするインターフェースの開発はCP2K開発者・大阪大学・米国スタートアップQSimulateの共同で行うこととなり、大きなプロジェクトとなった。

2期生の水野は従来の量子化学計算の枠を超えて、化学反応論への量子コンピュータ応用を目指した。具体的には化学反応ネットワーク上の経路探索や化学反応における原子マッピングであり、量子アニーリングを利用する。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。経路探索では量子アニーラによる優位性は見られなかったが、原子マッピングでは大きな問題サイズで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、その原因をも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。

同じく2期生の上西は変分量子アルゴリズムにおけるノイズの積極的な利用を検討した。Fraxis法という新しいアプローチを導入することで局所解問題に取り組み、浅い回路での高精度な時間発展の記述法を見出した。また、測定ノイズにより局所解を抜けられることを示し、その影響を詳細に解析した。その結果、ノイズ強度と測定回数や学習率の関係性を明らかにしたことで、変分量子アルゴリズムの実用的な設計指針に向けた知見を得た。

3期生の渡部は組み合わせ最適化問題を量子アニーラではなくNISQを用いた虚時間時間発展で解くことを構想し、そのための虚時間量子ツールボックスのプロトタイプを開

発した。拘束付き量子アニーリングのノイズ環境下での性能評価や最短ベクトル問題への新解法の提案、電波伝播解析などの成果をあげた。様々な問題に対し、最適化手法の包括的な性能比較を行った。このようなベンチマークの知見をまとめてカタログ化することは手法選択の指針を与えるため、量子コンピュータの社会実装に貢献することが期待できる。

FTQC アルゴリズム

一方、1 期生の杉崎は FTQC を用いた量子化学計算手法を開発している。特に、擬縮退系に対する近似波動関数の生成とエネルギー固有値を読み出す量子位相推定アルゴリズムの改良を行った。また、量子化学において重要となる、量子位相推定アルゴリズムを応用して基底状態と励起状態間のエネルギーの差を直接求める量子アルゴリズムを開発した。

水野は化学反応システムの確率論的速度論解析による線形微分方程式の高速な解法を利用することを提案した。ここで用いられる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。このような方程式は FTQC 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。水野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、古典アルゴリズムに対して指数加速を達成することを示した。

2 期生の御手洗は、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を提案した。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、具体的な分子系を対象にして必要なリソースの見積もりも行った。この他、摂動論的にパラメータ付き量子回路を最適化する手法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。

同じく 2 期生の山崎は量子機械学習の効率化に有用な子リッジレット変換を開発し、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行えることを示した。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。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。

場の量子論への応用

3 期生の伊藤は、格子量子色力学 (QCD) による第一原理計算で問題となる符号問題を解決するため、ゲージ理論をハミルトニアン形式で定式化し、量子計算で問題を解くこと

を着想した。従来計算が困難であった課題に対して新しい計算手法を確立し、当該分野の重要課題の一つである質量スペクトルの精密決定など顕著な成果をあげた。また、多数フレイバー理論のハミルトニアン形式の定式化に取り組んだ。

同じく3期生の本多は、量子計算機の初期宇宙解明への応用を見据えて、低次元場の量子論に量子計算を応用することで、場の量子論の数値シミュレーションに有効な量子アルゴリズムや必要な計算資源を検討することを目指した。シュウィンガー模型と呼ばれる1次元量子電磁気学に対して、量子アルゴリズムを適用した数値シミュレーションを行い、基底状態の下での物理量の計算、荷電粒子間のポテンシャルの計算を行った。これは量子アルゴリズムによる場の量子論の数値シミュレーションにおいて世界で初めて連続極限を達成したものとして注目された。またポテンシャルの計算により、閉じ込め現象や、特殊な状況では電荷が反対の粒子間に斥力が働く現象を第一原理から確認した。また、量子アルゴリズムにより場の量子論のエネルギースペクトルを効率的に計算する Coherent Imaging Spectroscopy 法を提案し、シュウィンガー模型においてシミュレータを実装することで、エネルギースペクトルの計算を行い、期待される振る舞いと整合性を確認した。さらに、古典アルゴリズムによる符号問題のある場の量子論の数値シミュレーションの有効性と限界を調べるために、テンソルネットワークをシュウィンガー模型、モンテカルロ法を3次元SU(2)ヤン・ミルズ理論に適用した。さらに、1次元の量子重力理論を量子計算機に適した形で定式化を行った。

様々な量子アルゴリズム

量子アルゴリズムは計算にとどまらず、計測や通信においても古典に対する優位性が示されることが期待され。1期生の松崎は量子IoTという概念を提唱し、様々なアルゴリズムを提案した。量子センサ、量子通信、量子コンピュータのそれぞれについて特性の改善手法や新しいアルゴリズムを提案した。量子センサと量子通信の複合化として、位相緩和が及ぼす遠隔量子秘匿センサへの影響の評価、磁場の発生源を秘匿する量子センサの提案、遠隔地における量子化軸の補正法の提案を行った。また、量子コンピュータと量子通信の複合化として、サーバーに入力・出力を秘匿したままユーザーが計算を実行できるクラウド型NISQの提案を行った。

3期生の秋笛は分散量子計算における量子もつれ必要性を低減することを検討した。確率最適化の高速解法を発見し、量子状態検証ではノード間量子もつれが全く無い状況でも、量子もつれを自由に使える場合と比べて遜色ない検証効率を達成できるプロトコルを発見した。量子もつれの最小化問題については成功確率の上界を求めるアルゴリズムを見出し、代数幾何を専門とする数学者と共同研究を行っている。

大戸は、光量子コンピュータを用いたガウシアンボソンサンプリングを用いて、高い熱電変換効率を持つ有機分子の候補であるRu錯体の電子伝導機構解明のために分子振動の

解析を行った。実用的な応用が期待される分子へのガウシアンボソンサンプリングの適用は初めてである。

量子計算にインスパイアされたアルゴリズム

2 期生の品岡は量子フーリエ変換の奥にある原理を用いた Quantics tensor train を着想した。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、テンソル分解を組み合わせることで情報圧縮演算の道を拓いた。本研究は相関関数の圧縮を可能にし、古典計算機上で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ている。

量子優位性

1 期生の水上は、量子化学計算において古典計算に対する量子優位性を与える問題を検討した。その結果、Dirac 方程式によって相対論効果を考慮した系ではより小さな系で量子と古典の逆転が起きることを明らかにした。量子コンピュータに有利な系は「量子状態が複雑」かつ「ハミルトニアンが単純」な場合であるという洞察を得ている。

また、大久保、水上と 3 期生の吉岡は、物性物理において基本的な格子模型で量子優位性が現れる問題のサイズを検討した。従来議論されていた量子化学の問題よりも小さい 100 スピン程度で量子優位性が現れることを示した。この研究は異なるバックグラウンドを持つ研究者の共同研究によって得られたものであり、当さがけ領域における異分野協働の有効性を示している。

山崎は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、エネルギー消費量の観点から量子優位性を解析することを可能にした。

量子情報理論・物性基礎論への貢献

2 期生の田島は対称性・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明示する不等式を証明し、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。この不等式を用いることにより、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オーダーが異なる高い効率を示す可能性を明らかにした。また、量子計算においても Eastin-Knill の定理の一般化が示された。山崎は様々な量子リソースを解析できる一般的な量子リソース理論の枠組みを確立し、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。

吉岡は量子ランダムネスにおける対称性の活用や量子リソース指標の定量評価といった、量子計算の今後の展開の基盤となるとともに量子情報処理におけるランダムネスの役割を明らかにするという基礎的にも興味深い結果を得た。

3 期生の桑原は量子多体系のシミュレーションにおける計算量複雑性を決めるハミルトニアン複雑性に関する重要な未解決問題の解決に挑んだ。量子マルコフ予想の 1 次元での証明を完了し、高次元でも部分系が小さい場合に成立することを示した。また、量子多体系における情報の伝搬の速度の普遍的な限界を与える Lieb-Robinson 限界の一般的な理論の導出に成功し、ボソン系においては多次元において情報伝搬の加速が存在することが示されたほか、ボソン系を精度保証付きでシミュレートするアルゴリズムを開発した。量子もつれの境界則は計算可能性を決める性質であり、1 次元の場合の一般的な境界則の証明に成功し、無限次元でも証明が進展した。

3 期生の池田は多体波動関数物性の理論研究に取り組んだ。物性に関する発見の一つはフロケ加熱に対して頑健な基底状態があることを示したことである。このことは長寿命のフロケ相を実現し、動的な物性制御を行う可能性を示している。本研究の過程で有意に大きな量子ビット数にアクセスできる手法を導入して新たに物理的に意味のある現象を見出した。また、量子回路におけるカオスについてランダム行列統計を示す単一粒子系の多体スペクトルの解析を行い、多体量子カオスとは異なるふるまいを示すことを見出した。量子多体系のカオスの理解のために今後の発展が期待できる。

3 期生の山本はホログラフィー原理に代表される重力理論と量子多体系の関係性を探求する分野横断的な研究も新たに立ち上げ、量子シミュレーションの基礎物理への貢献の可能性を拓いた。特に、AdS/CFT 対応から予測できる臨界スピン系の新たな応答現象を発見し、高温超電導や量子磁性の理解や新規物性の設計につながることも期待される。

② 量子ソフトウェアの研究開発

NISQ のみならず、初期の FTQC においても回路規模を小さくすることは重要である。このために、量子回路の近似的な表現、問題の分割、量子・古典ハイブリッドは重要な技術となる。本研究領域では、量子コンピュータのベンチマークともなるシミュレータの開発、量子ビットの制御技術、量子ゲートの評価技術について新たな進展が見られた。

量子回路の近似的な表現に関して、1 期生の上田はテンソルネットワークの知見を活かして、既存の古典的データを自動的に量子回路化する自動量子回路符号化アルゴリズム (AQCE) を開発した。このアルゴリズムは従来のコンピュータ技術で得られたデータを量子コンピュータ上で走らせるための重要なツールとなりうる。また、意の量子多体系の基底状態を最良近似できるツリーテンソルネットワーク構造を状態のエンタングルメントエントロピーを監視しながら動的に探索するアルゴリズムを開発した。

シミュレータ

また、上田は物性物理で多く見られる対称性を仮定して問題を限定することによって 1000 量子ビット級の厳密なシミュレーションを行うソフトウェア QS3 を開発し GitHub で公開している。ノイズを考慮した 1000 量子ビット程度のランダム量子回路シミュレーシ

ョンは、近い将来規模が大きくなった実機のベンチマークや正常動作の検証に用いるデータセットを提供できる。また、2 期生の曾田は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こみ群 (DMRG) 法による量子計算シミュレーションプログラムを開発した。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る。

同じく水上は、軌道最適化 VQE 法を開発して微分の計算を効率化し、多原子分子の構造最適化を実現した。さらに、励起状態を扱えるように微分法を拡張し、光化学反応や 2 階微分が必要な分極率の計算に適用された。QunaSys 社が開発しているクラウドサービス Qamuy に固体系の計算や解析微分の機能が実装されている。土持は自ら考案した励起状態計算法など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。

また、品岡は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、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、ライブラリを公開した。

池田は量子多体系の時間発展シミュレーションで広く用いられている Trotter 分解について、与えられた次数に対して最小の量子ゲートで実現する新たな公式を導いている。また、Trotter 分解の誤差を直接見積もる方法も提案している。これらは今後の量子系時間発展シミュレーションの基盤として重要な成果である。

コンパイラ

秋笛は確率最適化問題をコンパイラにも適用し、ユニタリゲートを基本ゲート列で近似するという量子コンパイルの設定では、確率的に基本ゲート列を選択することで近似誤差を大幅に削減できることを示し、高速で近似誤差も最小化できる確率的コンパイラを開発した。応用に向けた共同研究を立ち上げるとともに、理論の一般化に向けて数論の研究者とも共同研究を行っている。

量子ビットの制御技術

2 期生の中島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。具体的には、量子ビットの読み出しに用いる単一電子センサの動作点自動制御による読み出しエラーの低減、量子ビットの周波数ドリフトのフィードバック制御による位相緩和の低減、アクティブリセットによる量子ビット初期化、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の制御 API の整備を行った。特に量子ビット制御において他自由度（核スピン）とのコヒーレント相互作用による測定を行わないダイナミックな制御の可能性を見出した。

一方、山本は冷却原子系のエントロピー制御法を進展させ、固体物理における強相関電子系を模倣するための 2 成分フェルミ系を効率的に冷却するための基盤技術を構築した。

評価技術

FTQC の実現には量子基本演算の高精度化が必要である。1 期生の杉山は、高精度化の前提となる、量子演算の誤りの詳細な情報を得るために、演算の精度評価手法、制御系の較正手法、ノイズ源の特定手法の 3 つの基盤技術を開発し、従来の量子トモグラフィによる評価手法のデータ処理の安定性向上、計算コストの削減、ソフトウェア開発を達成した。ソフトウェアは Quara という名称で GitHub 上に公開されている。

また、山本は光格子冷却原子系を中心とした人工量子系の量子状態の同定および量子エンタングルメントを定量化する方法を開発した。まず、量子状態トモグラフィにおいてスパイラル構造と圧縮センシング技術を取り入れた新手法を開発し、局所的な操作を不要にすることで、大規模量子系のエンタングルメントを効率よく検出できることを示した。また、置換対称化密度行列の情報エントロピーや、2 つの量子状態に関する擬エンタングルメントエントロピーなどの近年導入された新しい量子情報量に着目し、量子多体系の相関や量子相を別の視点で捉えられる指標としての有効性を示した。

③ 量子情報処理システムのアーキテクチャ研究開発

NISQ

2 期生の谷本は、Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA) を対象とした NISQ システム・アーキテクチャを提案し、20mK、4K、300K（室温）の各温度ステージでの最適な計算の割り振りや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。

FTQC に向けて

また、谷本は FTQC の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に対して論理誤り率を改善できる方法を提案した。

1 期生の鈴木は、量子コンピュータの各レイヤにおいて必須となる要素の設計や制御の自由度を明らかにし、量子コンピュータの性能を解析するソフトウェアを開発した。具体的には超伝導量子ビットの量子操作におけるノイズマップの解析、ノイズマップのシミュレータ、表面符号を用いた際の誤り率計算、基本論理命令セットの定義、アセンブラ、アプリケーションを対象としたエミュレータがある。これにより、下位レイヤのシミュレーション、複雑なプロセスの符号性能の評価、アプリケーションの計算時間の評価が行える。誤り耐性量子コンピュータの設計においては誤り訂正よりも上位のレイヤの最適化を行っている。重要な成果として誤り訂正と誤り抑制の組み合わせによる所要の量子ビ

ット数の削減、時間的な誤り率の変動の効率的な管理、誤り率のばらつきを考慮したエラー推定、ループ並列化による高速化があげられる。また、コンピュータアーキテクチャや周辺回路についてエラー推定機構の効率的な実装を提案した。

量子エラー抑制

量子エラー抑制は量子回路の誤りを後処理によって軽減する手法である。NISQ はもちろん、FTQC においても必然的に生じる誤りを補償する技術は量子誤り訂正の負担を軽減できるため、将来にわたって重要である。

3 期生の遠藤は一般的な量子エラー抑制の定義を提案し、量子エラー抑制のコストである、量子回路の実行回数の増加（以下サンプリングコスト）が量子回路の深さに対して指数関数的に増加することを量子情報理論的なアプローチを用いて初めて示した。また、遠藤と吉岡は量子エラー抑制法の統合・一般化フレームワークである一般化部分空間展開法と対一般化部分空間展開法を提案した。また、局所仮想蒸留法を提案し、サンプリングコストを抑えることにも成功している。一般化部分空間展開法は実機にも実装され実証実験が行われた。

また、遠藤は量子エラー抑制法を取り入れた初期 FTQC のパラダイムを提案し、エラーの多くを量子エラー抑制で削減できることを示し、計算に求められる量子ビット数を初期の FTQC では 80%ほど削減できることを示した。さらに光量子コンピュータで有力視される符号化された連続量状態に対するエラー抑制にも世界で初めて取り組んだ。この他に量子センシングにおいてもエラー抑制法による感度向上が実現されることを示した。

吉岡は計算結果をノイズレスに復元するためには回路規模の大きさに対して回路実行回数が指数的に増大することを示し、量子エラー抑制における普遍的な理論限界を与えることができた。これはエラー抑制の限界を与えるものである。

量子誤り訂正

FTQC 実現の鍵となるのはもちろん量子誤り訂正である。1 期生の Darmawan は量子誤り訂正符号におけるノイズのシミュレーションと誤り訂正符号を解析する数値手法を開発した。特に、実際の量子ビットでは特定のエラーが起こりやすいこと（Biased noise）を考慮した解析を行い、従来知られている表面符号を変形することで復号が容易で誤り耐性の高い符号が実現できることを示した。また、Biased noise モデルでは誤り耐性量子コンピュータの実現に必要な魔法状態の生成も従来法より 2 桁低い誤り率で行えることが示された。この成果は例えば Amazon の量子コンピュータ研究グループにも取り入れられている。

また、山崎は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 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。これは世界で誰もが予想しなかった研究成果と言える。

本多は場の量子論の知見を利用して新たな誤り訂正符号を構成する可能性を見出した。

7. 総合所見

(1) 研究領域のマネジメント

パンデミックの影響を受け、選考面接やサイトビジットの一部と領域会議はオンラインでの開催となった。領域会議での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したりといった試みで研究者間の交流を促した。幸い2期生の第3年度からは領域会議を対面で行うことができ、さきがけならではの深夜にわたる研究者間の交流ができた。休憩時間での議論も活発に行われ、領域内での共同研究も盛んであった。また、領域会議の終了後にSFプロトタイピングとして量子情報技術が将来の社会に与える影響をSFの設定を作りながら議論した。これはさきがけ研究者のみならず、議論に参加した領域アドバイザーにとってもよい経験になったと思われる。2期生と3期生に対しては最終年度にも対面でサイトビジットを行い、研究の進捗や研究機関終了に向けた研究のまとめ方などを議論することができた。

本研究領域の研究期間中に量子コンピュータの研究開発の動向が大きく変化した。超伝導量子ビットのビット数は着実に増加し、国産の量子コンピュータも3台稼働している。また、冷却原子を用いた量子コンピュータでは論理量子ビットの実装に成功し、超伝導でもブレイクイーブンが達成され、FTQCが現実味を帯びてきた。一方でNISQを用いた変分量子アルゴリズムの限界が明確に意識されるようになり、FTQCを前提とする理論研究が大勢となってきた。このため、当初計画が研究の潮流に合わなくなるケースも見られた。本研究領域では、研究の進展や外部情勢の変化により当初の目論見がうまくいかない場合には柔軟に方針転換することを奨励してきた。うまくいかない理由を考察して研究計画を変更していくことは研究者としての成長にもつながるものと考えている。そのためもあって、当初計画していたよりも将来的な発展が期待できる成果をあげることができている。もちろん、研究が順調に進捗している者もあり、その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。

(2) 研究領域としての戦略目標の達成状況

上で述べたように本研究領域は極めて研究開発の変化が激しい。戦略目標における達成目標の具体的な記述は主に量子アニーラや誤り訂正なしの量子コンピュータ（NISQ）を想定して立案されたものと思われるが、早い段階で時代遅れとなっていた。しかし、大項目レベルでの研究開発目標としては引き続き有効であると考え、研究課題ごとにより適切な目標設定を行えるように努めた。多くの研究者がFTQCに向けて自らの研究内容をフィッ

トさせ、むしろ今後の潮流を作っていくことができた。この意味で、本研究領域は当初の想定の上を行く形で目標を達成したものとする。

(3) 本研究領域を設定したことの意義と妥当性

本研究領域の発足当初は量子コンピュータ研究はハードウェア開発が中心で、ソフトウェアの研究はハード研究に付随するような形で進められてきた。しかし、量子コンピュータの発展と普及にはソフトウェア開発が不可欠である。このため、研究領域では隣接する諸分野からの参入を促すことによって量子コンピュータ活用のフィールドを広げることを一つの目的とした。確立した研究分野ではないため、応募者が限られていることは覚悟の上で募集したが、採択の基準は落とさずに優秀な人材を確保することを目指した。また、量子情報プロパーの研究者と異分野の研究者がうまく混じり合うように採択者の比率を設定した。

本研究領域では量子の特性を活用する新たな研究分野が開拓されることを期待していた。そのため、異なるバックグラウンドを持つ研究者の交流を奨励した。例えば、量子計算を場の量子論の計算に応用するといったことは当時あまり注目されていなかった。採択された研究者が優れた成果を上げるとともに積極的に研究集会を開催するなどした結果、分野として確立しつつある。量子計算の応用検討が進んでいる量子化学や物性理論の研究者や量子情報の専門家との議論が発展を促進したといえる。さらに、場の量子論の考え方を量子情報における誤り訂正に応用するなどのフィードバックも生まれている。また、本研究領域で出会った研究者が CREST などのより大きなプロジェクトに参画し、大きな研究プロジェクトのリーダーへ成長する事例も多くみられる。本さきがけ領域が新規な学問分野の形成とそれにかかわる研究者の成長に貢献していることは明らかであり、本研究領域を設定した意義と妥当性は高いものと言える。

(4) 今後への期待、展望、課題

量子情報を活用する技術は今後とも重要である。量子コンピュータに適した問題の探求や効率的なアルゴリズムの開発が必要である。実用的な量子コンピュータの実現のためにはハードウェア開発ももちろん必要だが、ハードの負担を軽くするためのアーキテクチャや論理量子ビットの符号化法、誤り訂正などでブレークスルーが必要であると考えられる。このためには、具体的な問題に即した解法の研究や物理系を想定した制御理論の研究が必要である。それと同時に、量子情報の構造を生かしたアルゴリズム開発を行うことも必要であり、高度な数学と情報科学、物理学の共同が求められる。本研究領域の実施により、異分野からの優秀な若手研究者の参入を促し、量子情報プロパーの研究者との共同研究によって分野の活性化と新しい研究の潮流を生み出すことができた。しかし、当初の目標を達成したとはいえ、あくまでも研究開発の端緒としての成果であり、今後さらに発展・深化させることが必要である。

(5) 所感、その他

パンデミックという想定外の事態のなかで、いかに研究者の交流を促進するかに悩まされたが、領域内での共同研究が自然な形で進んでいったことは予想以上であった。やはり、採用時に優秀かつポテンシャルの高い人材を確保できたことが決め手となったと思われる。領域アドバイザーも若くて優秀な現役研究者とご意見番的なシニアの両方をお願い出来たことが領域全体の活性化に役立った。

さきがけとして今後も発展していくためには本研究領域のようにまだ研究分野として確立していない領域に積極的にコミットしていくことを望みたい。本研究領域は期間中に分野も参加研究者も大きく成長していくのを目の当たりにできたのは幸いだった。今後ともこのような先見性を期待したい。

以上