

戦略的創造研究推進事業
—さきがけ(個人型研究)—

研究領域「量子の状態制御
と機能化」

研究領域事後評価用資料

研究総括: 伊藤 公平

2022 年 3 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	5
4. 領域アドバイザーについて	11
5. 研究領域のマネジメントについて.....	12
6. 研究領域としての戦略目標の達成状況について.....	20
7. 総合所見	37

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

「量子状態の高度制御による新たな物性・情報科学フロンティアの開拓」

(2) 研究領域

「量子の状態制御と機能化」(2016年度発足)

(3) 研究総括

氏名 伊藤 公平 (慶應義塾大学 教授・塾長)

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」

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

平成 28 年度新規研究領域の事前評価

https://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/hyouka_h28.pdf

(4) 採択研究課題・研究費

表 1.1 採択課題の最終研究費

(百万円)

採択年度	研究者	所属・役職 採択時	研究課題	研究費 ¹
2016 年度	相川 清隆	東京工業大学・准教授 同上	真空中の浮揚ナノ粒子に対するレーザー冷凍機の開発	46.5
	加藤 真也	さきがけ専任研究者 早稲田大学・特別研究員	量子光学技術を駆使した生物系を含んだ散逸と量子の研究	44.3
	桐谷 乃輔	大阪府立大学・助教 同上	分子／二次元無機膜ヘテロ界面における量子伝導の発現と制御	44.4
	素川 靖司	自然科学研究機構・助教 ミラント大学・ポストドク	極低温ドレスト原子集団の超精密制御による非可換トポロジカル量子現象の探索	43.4
	田中 宗	早稲田大学・主任研究員 同上・助教	機械学習の高速化を指向した量子アニーリングの研究	14.4
	根来 誠	大阪大学・特任准教授 同上・助教	スケラブル分子スピン制御技術の高度化により可能になる量子情報処理の新機能	44.0
	野口 篤史	東京大学・准教授 同上・特任助教	表面弾性波を使ったエレクトロメカニクス of 量子制御	53.5
	藤井 啓祐	大阪大学・教授 東京大学・助教	知的量子設計による量子計算・量子シミュレーションの新機能創出	18.4
	山下 太郎	名古屋大学・准教授 情報通信研究機構・主任研究員	超伝導位相制御素子によるスケラブル量子技術	50.2
	山本 直樹	慶應義塾大学・教授 同上・准教授	フィードバック増幅による量子機能創出	9.9
2017 年度	猪股 邦宏	産業技術総合研究所・主任研究員 同上	量子プロセッサの大規模化へ向けた量子インターコネクションの基盤技術の創成	43.7
	川上 恵里加	理化学研究所・チームリーダー	ヘリウム表面上の電子を用いた万能デジタル量子コンピュー	54.0

		沖縄科学技術大学院大学・博士研究員	一ターの実現へ向けて	
	小塚 裕介	物質・材料研究機構・ 独立研究者 東京大学・講師	量子計算のための高品質酸化 亜鉛を用いた材料基盤創出	52.7
	武田 俊太郎	東京大学・准教授 同上・助教	プログラマブルなループ型光 量子プロセッサの開発	64.2
	中島 秀太	京都大学・特定准教授 同上・特定助教	冷却原子系を用いた量子時空 ダイナミクスシミュレータ	45.0
	橋坂 昌幸	日本電信電話（株）・ 主任研究員 東京工業大学・助教	準粒子量子光学の確立に向け た量子ホール回路技術	37.7
	馬場 基彰	京都大学・特定准教授 大阪大学・招へい教員	量子状態の制御と保護を両立 させる相転移環境	10.0
	フライザー マイケル	理化学研究所・ 客員研究員 同上・研究員	励起子-ポラリトンにおける強 相関トポロジカルハルデー ンモデルの実現	41.7
	堀切 智之	横浜国立大学・准教授 同上	量子ネットワーク構成技術と その応用研究	62.0
	森前 智行	京都大学・准教授 群馬大学・准教授	セキュアクラウド量子計算に おける量子スプレマシー	10.0
2018 年度	東 浩司	日本電信電話（株）・ 特別研究員 同上・主任研究員	量子インターネットの理論的 研究	10.0
	今田 裕	理化学研究所・ 上級研究員 同上・研究員	分子間コヒーレントエネルギー 移動の時空間計測と制御	60.0
	太田 泰友	慶應義塾大学・准教授 東京大学・特任准教授	ハイブリッド集積シリコン量 子フォトニクスの開拓	52.8
	小野 貴史	香川大学・助教 ブリストル大学・ ポスドク研究員	非線形光学効果を利用した大 規模量子シミュレータの開発	48.0
	中田 芳史	東京大学・助教 同上・特任研究員	持続可能な高度量子技術開発 に向けた量子疑似ランダムネ スの発展と応用	14.8
	不破 麻里亜	学習院大学・助教	超伝導 MEMS を用いた浮遊型機	52.9

		オーストラリア国立大 学・博士研究員	械子の量子制御	
	森 立平	東京工業大学・助教 同上	定数時間量子アルゴリズムの 設計	15.0
	山口 敦史	理化学研究所・ 専任研究員 同上・研究員	「原子核時計」実現に向けた原 子核量子計測技術の開発	49.0
			総研究費	1092.5

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(2021年12月01日現在)

2. 研究総括のねらい

(1) 背景

20世紀初頭の量子力学の発見によって量子光学、固体のバンド理論などが進化し、レーザー・トランジスタ・LEDなどの素子が開発されてきた。20世紀後半以降は、エレクトロニクスとナノテクノロジーの急速な発展により、単一の量子（原子、電子、光子、フォノンなど）や、単一の量子として扱える巨視的な量子現象（超伝導量子ビットなど）をコヒーレントに操作・制御し、その機能に基づき従来技術における不可能を可能にし得る計算・通信・計測・標準・省エネ技術を開発することが注目されている。量子科学の発展は止まることを知らず、単一量子のコヒーレント制御から、少数の量子もつれ制御、さらには多数量子系の制御と研究フェーズを刷新している。

そこで本研究領域では、量子状態をコヒーレントに制御して機能化するフロンティアを切り拓く研究を推進した。

(2) 概要

量子現象をただ観るのではなく、制御して機能化するフロンティアを切り拓く独創的で意欲的な研究を本研究領域では推進した。様々な原子、分子、物質、ナノ構造、電磁波、生命体や、それらが相互作用する系に潜む量子現象の本質を紐解き、挑戦的な量子状態の操作・制御・測定をとおして新概念、新機軸、新技術の創成が寄与される。さらに、これらがシーズとなり、将来的には革新的な情報処理技術、計測技術、標準化技術、通信ネットワーク技術、省エネ技術などの発展が期待される。高度な洞察力と、理論展開・実験技術・計算技術などに支えられた実力を駆使して、量子科学とその応用の将来を世界レベルでリードする若手研究者の輩出を目指した。

具体的には、量子に関わる物理学、情報科学、化学、工学や生物学のみならず、数理科学、

物質科学、ナノ構造科学などの多岐に渡るテーマを推進し、これら異分野の連携・融合を促進するプラットフォームの構築を目指した。

3. 研究課題の選考について

(1) 研究課題の選考方針

新進気鋭の研究者が知恵を絞った、独創的で、科学的に胸が踊る提案を募集した。さきがけ研究の3年間でコンパクトな成果を出すのではなく、さきがけ研究から始まる挑戦が、さきがけ研究終了後の10年間で量子状態制御の新しい潮流を生み出すもの、そして続く10年間でその潮流が量子機能の応用という形で時代のうねりとなる期待を抱かせる研究提案を募集した。

研究に対するアプローチは、数理的な理論展開を中心とするもの、計算機でのシミュレーションを中心とするもの、実験を中心とするものなど様々なものが考えられ、個人の実力を活かした独創的なアイデア、実行力、発展性を特に重視した。また、さきがけは個人研究だが、グランドデザインが大きいほど一人で成し得ることが限られる場合も考えられる。よって提案者自らが発案する、独創的で重厚なシナリオであれば、提案者自らが貢献する部分を特定して推進する研究も対象とした。ここには比類なき量子制御を可能とする材料・物質やナノ構造などを創成する研究、抜きん出た量子制御技術を開発する研究、従来手法を凌駕する量子力学的測定技術を開発する研究などが含まれる。ただし、その場合には国際研究協力も含めて、量子の機能化というグランドデザインのなかで、自らが取り組む事項と、共同（または将来的な共同を希望する）研究者と協調していく事項を明確に示すことを求めた。

具体的な研究例として以下に示したが、これらの一部は、募集時点で世界トップがすでに取り組み始めているテーマであった。科学の発展のために誰かが取り組むべき挑戦的なテーマなので当然であろう。そのような提案を行う場合は、世界における自らの現在の位置を明確にした上で、なぜ自分が今それに取り組む必要があるのか？そして、さきがけ研究期間終了後にどのように新しい潮流を生み出していくのか？といった学術的発展の可能性を示してもらった。また、下記の例に当てはまらない、審査する側が驚くような挑戦的で新しい手法・アイデアの提案が集まることを期待した。

具体的な研究の例

- ・高いパラメータ制御性を有する量子多体系、例えば光格子中の冷却原子や、2次元ペニン
グトラップ中のイオン、チップ上に集積された光回路、多数のスピンの規則的に配置され
た固体材料・素子を用いて、その非平衡ダイナミクスや大規模量子もつれを定量的に評
価・制御する研究。
- ・光およびマイクロ波共振器中の光-物質相互作用や量子オプト・エレクトロ・ナノメカニ
クス手法による巨大な非線形効果の発現と、それを用いた光スイッチ、コヒーレント波長

変換、コヒーレントメディア変換などの超高効率・超高感度量子機能素子の開発に関する研究。

- ・量子情報科学の知見を用いて、微小系の熱力学、非平衡統計力学などの現在進行形の研究領域に新たなフレームワークをもたらすような理論研究と、そのような理論を検証する舞台となる原子・分子・光学系、メゾスコピック系、生体系などにおける量子フィードバック制御や開放系のダイナミクスに関する実験研究。
- ・散逸を取り込んだ形での量子状態制御、いわゆるリザーバーエンジニアリングに基づく量子情報処理手法、個別の量子ビットの測定を行わなくても誤り訂正が行える系など、従来のデジタル量子計算における要件・制約を緩和・除去する新たな枠組みに関する研究。
- ・植物の光合成、鳥類のもつ磁気コンパス、酵素反応などの生体内の化学反応における量子コヒーレンスの役割を定量的に明らかにする研究。
- ・情報理論と量子物理学を駆使した、従来技術の不可能を可能にする新しい量子アルゴリズムの開発。
- ・個人の特技を活かした、量子情報技術の実用化に不可欠な尖った技術の開発。例えば、デジタル量子計算の開発に必要な、特別な材料やナノ構造、多数量子ビットの並列制御に特化したインターフェイス、極低温下で動作する FPGA 回路やジョセフソンコンピュータ、捕捉イオンのコヒーレントな移動を可能にする RF 導波路などの開発。この場合、グランドデザインを提示し、特定のデジタル量子コンピュータの研究開発グループとの密な共同研究を前提とする。
- ・量子情報科学の研究フェーズが、単一量子のコヒーレント制御から、少数量子の量子もつれ制御、さらには多数量子の制御による量子計算機開発へと軸足をシフトさせていることはすでに述べた。このため、単一スピンの制御に基づく超高感度センシングや、量子凝縮体を用いた原子干渉計といった、すでに内外の有力研究グループが進めている応用的研究は、これまでよりも飛躍的な感度・精度向上が見込める革新性や、これまで考えられてこなかった量子センシングの独創的な応用などを伴わない限り、課題の対象としない。

(2)1 期生 (2016 年度) 選考結果・総評

2016 年度は最初の募集となったが、国の定める戦略目標決定後にただちに領域を立ち上げ、2016 年 4 月に募集を開始した。秋には第 1 回の領域会議を開催して本研究領域が目指す研究を一気にスタートさせるためである。研究総括の方針には「さきがけ研究の 3 年間でコンパクトな成果を出すのではなく、さきがけ研究から始まる挑戦が、さきがけ研究終了後の 10 年間で量子状態制御の新しい潮流を生み出すもの、そして続く 10 年間でその潮流が量子機能の応用という形で時代のうねりとなる期待を抱かせる研究提案を募集します。」と明記し、世界レベルで高い頂を目指す研究構想の提出を呼びかけた。研究領域設置から募集締切までの期間が 2 ヶ月程度と短く、高い目標を満たす研究構想を作成するのは大変だったと思うが、65 件もの挑戦的な応募が集まった。11 名の領域アドバイザーの協力を得て書

類選考と18件の面接選考を行い、最終的に10件（内、3件が理論的内容）の研究課題を採択した。選考にあたっては利害関係にある領域アドバイザーの関与を避け、厳正な評価を行った。

不採択となった提案にも素晴らしいものがたくさんあった。次年度以降に再応募を検討する場合に、その参考になるように総括のコメントを各申請者に送った。また、2016年度は準備期間が短く応募を見送った方も多いと思われる。さらに「量子」ということから、物理学分野の研究者が一番応募しやすかったようである。

2016年度採択候補のポートフォリオ

	物理系			情報・数学系	化学系	材料系
	計算	計測	その他			
基礎理論	「人工知能」 田中	「低ノイズ化」 山本				
光	「ファイバー」 加藤	「量子誤り耐性」 藤井				
超伝導	「磁性体」 山下	「音波」 野口				
原子・分子 ・電子	「量子機能界面」 桐谷		「レーザー」 素川			
	「分子スピン」 根来	「ナノクラススタ冷却」 相川				

図 3.1 2016 年度採択課題のポートフォリオ

(3) 2017 年度研究課題の選考方針

2016 年度の研究課題の選考方針に加え、2017 年度は以下の点も選考方針の考慮に入れて募集した。

- ・本研究領域では若手研究者育成の観点から、多くの方が機会を得られるよう、以前さきがけ制度で採択された方は、公募の対象外とした。
- ・前年度、本研究領域の一期生として10名の研究者を採択したが、その多くが物理学者であった。そこで本年度は、物理学者に加えて、情報科学者、化学者、材料科学者、電気工学者、制御工学者、応用数学者、バイオ関連学者らの積極的な応募を期待した。キーワー

ドは量子機能で古典に勝つ、すなわち quantum supremacy の発掘で、この可能性を軸に据えた魅力的な提案が多数集まることを期待した。量子情報科学の研究フェーズが、単一量子のコヒーレント制御から、少数量子の量子もつれ制御、さらには多数量子の制御による量子計算機開発へと軸足をシフトさせていることはすでに述べた。2017 年度の募集では、この枠組みをある程度重視しながらも、独創的な量子機能の発掘を野心的に目指す提案、すなわちより多角的なアプローチを広く募集した。女性研究者による積極的な応募も期待した。

(4) 2 期生 (2017 年度) 選考結果・総評

2017 年度は 2 度目の募集となったが 61 件の応募があり、11 名の領域アドバイザーの協力を得て書類選考会と 15 件の面接選考を行い、最終的に 10 件（内、2 件が理論的内容）の研究課題を採択した。「さきがけ研究の 3 年間でコンパクトな成果を出すのではなく、さきがけ研究から始まる挑戦が、さきがけ研究終了後の 10 年間で量子状態制御の新しい潮流を生み出すもの、そして続く 10 年間でその潮流が量子機能の応用という形で時代のうねりとなる期待を抱かせる研究提案を募集する」という領域の指針にそって、確固たる実力と志に基づく果敢な挑戦を重視する一方、無謀な挑戦との区別をしっかりと見極めることに努めた。また、物理系に偏りがちな本研究領域において、材料科学者や情報科学者を採択することもできた。これにより領域の幅が広がると期待した。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、厳正な評価を行った。

不採択となった提案にも素晴らしいものがたくさんあった。募集最終年度となる 2018 年度に再応募を検討する場合に、その参考になるように総括のコメントを各申請者に送った。

2017年度採択候補のポートフォリオ

	計算	計測	その他
基礎理論		「相転移」 馬場	
	「セキュアクラウド量子計算」 森前		
光	「光量子プロセッサ」 武田		「量子ネットワーク」 堀切
超伝導		「インターコネクション」 猪股	
原子・分子・電子	「酸化亜鉛」 小塚		「冷却原子」 中島
	「ポラリトン」 フレイザー		
	「ヘリウム表面電子」 川上		
		「準粒子」 橋坂	

図 3.2 2017 年度採択課題のポートフォリオ

(5) 2018 年度研究課題の選考方針

若手育成の観点から募集の最終年度においても、さきがけ 3 回目は前年度と同様に対象外とし、今後 10 年で新たな潮流を生み出せるようなさきがける人物を募集するため、前年度と同様の選考方針に加え、以下の点も考慮に入れて募集した。

- 量子情報科学の研究フェーズが、単一量子のコヒーレント制御から、少数量子の量子もつれ制御、さらには多数量子の制御による量子計算機開発へと軸足をシフトさせていることはすでに述べた。2018 年度の募集でも、この枠組みをある程度重視しながら、独創的な量子機能の発掘を野心的に目指す提案、すなわちより多角的なアプローチを広く募集した。キーワードは量子機能で古典に勝つ、すなわち quantum supremacy の発掘で、この可能性を軸に据えた魅力的な提案が多数集まることを期待した。前年度は、本研究領域の 2 期生として 10 名の研究者を採択した。情報科学者や材料科学者を採択することができたが、2018 年度も引き続き情報科学者（特に量子アルゴリズム）、材料科学者、化学者、バイオ関連学者、電気工学者、制御工学者、応用数学者らの積極的な応募を期待した。女性研究者による積極的な応募も期待した。

(6) 3 期生（2018 年度）選考結果・総評

2018 年度は 3 度目の募集となったが 50 件の応募があり、11 名の領域アドバイザーの協

力を得て書類選考会と 15 件の面接選考を行い、最終的に 8 件（内、3 件が理論的内容）の研究課題を採択した。「さきがけ研究の 3 年間でコンパクトな成果を出すのではなく、さきがけ研究から始まる挑戦が、さきがけ研究終了後の 10 年間で量子状態制御の新しい潮流を生み出すもの、そして続く 10 年間でその潮流が量子機能の応用という形で時代のうねりとなる期待を抱かせる研究提案を募集する」という領域の指針にそって、確固たる実力と志に基づく果敢な挑戦を重視する一方、無謀な挑戦との区別をしっかりと見極めることに努めた。特に「量子をただ観るのではなく、どのように制御・機能化するのか」という観点に重きを置き選考を行った。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、厳正な評価を行った。残念ながら不採択となった研究提案の中にも、素晴らしいものが数多くあった。今後それぞれのアイデアや現状得られている成果に磨きをかけ、関連する領域への提案を期待した。

2018年度採択候補のポートフォリオ		物理系	情報・数学系	化学系	材料系
	計算	計測	その他		
基礎理論	「量子アルゴリズム」 森		「量子ランダムネス」 中田	「量子インターネット」 東	
光	「シリコン光子回路」 太田 「シリコン導波路」 小野				
超伝導	「超伝導MEMS」 不破				
原子・分子 ・電子		「原子核時計」 山口	「人工光合成」 今田		

図 3.3 2018 年度採択課題のポートフォリオ

全採択者のポートフォリオ

	計算	計測	その他
基礎理論	「人工知能」 田中	「相転移」 馬場	
	「量子アルゴリズム」 森	「低ノイズ化」 山本	「量子ランダムネス」 中田
	「セキュアクラウド量子計算」 森前		「量子インターネット」 東
光	「ファイバー」 加藤	「量子誤り耐性」 藤井	「量子ネットワーク」 堀切
	「光量子プロセッサ」 武田		
	「シリコン光量子回路」 太田		
	「シリコン導波路」 小野		
超伝導	「磁性体」 山下	「音波」 野口	
	「超伝導MEMS」 不破	「インターコネクション」 猪股	
原子・分子・電子	「酸化亜鉛」 小塚	「量子機能界面」 桐谷	「冷却原子」 中島
	「ポラリトン」 フレイザー	「レーザー」 素川	「人工光合成」 今田
	「ヘリウム表面電子」 川上	「原子核時計」 山口	
	「分子スピン」 根来	「準粒子」 橋坂	
		「ナノクラスタ冷却」 相川	

うち女性：2名、外国籍者：1名

図 3.4 採択課題全体のポートフォリオ

4. 領域アドバイザーについて

本研究領域では、量子に関する理論物理、実験物理、情報、数学、化学など複数の分野が関与しており、異分野間での研究者ネットワークを推進するため、日本の量子関係を代表する大学や企業の研究者 12 名に領域アドバイザーを委嘱した。

表 4.1 領域アドバイザー一覧表

領域アドバイザー名 (専門分野)	着任時の所属 ¹ (現所属)	役職	任期
荒川 泰彦 (量子エレクトロニクス、半導体物性、ナノデバイス)	東京大学 生産技術研究所 (ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構)	教授 (特任教授)	2016年5月～ 2022年3月
小川 哲生 (非平衡量子統計力学、量子光学)	大阪大学 理学研究科	教授	2016年5月～ 2022年3月
上妻 幹旺	東京工業大学 理学院	教授	2016年5月～

(量子エレクトロニクス、レーザー冷却、量子光学)			2022年3月
小林 研介 (量子物性)	大阪大学 大学院理学研究科 (東京大学大学院理学系研究科)	教授	2016年5月～ 2022年3月
高橋 義朗 (原子物理学、量子光学)	京都大学 大学院理学研究科	教授	2016年5月～ 2022年3月
谷 誠一郎 (量子アルゴリズム、量子計算量理論)	日本電信電話(株) NTT コミュニケーション科学基礎研究所	主任 研究員	2016年5月～ 2022年3月
中村 泰信 (量子情報科学、超伝導)	東京大学 先端科学技術研究センター(同上/理化学研究所 量子コンピュータ研究センター)	教授 (同上/センター長)	2016年5月～ 2022年3月
西森 秀穂 (量子コンピュータ、数学)	東京工業大学 理学院	教授	2016年5月～ 2018年8月
橋本 秀樹 (光合成、人工光合成、光科学)	関西学院大学 理工学部	教授	2016年5月～ 2022年3月
藤原 聡 (半導体物性、ナノデバイス)	日本電信電話(株) NTT 物性科学基礎研究所	上席 特別 研究員	2016年5月～ 2022年3月
古川 はづき (低温物性実験、超伝導、強相関電子系)	お茶の水女子大学 基幹研究院	教授	2016年5月～ 2022年3月
萬 伸一 (超伝導、量子デバイス、量子情報)	日本電気(株) スマートエネルギー研究所 (理化学研究所量子コンピュータ研究センター)	所長 代理 (副センター長)	2016年5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

さきがけ研究の3年間でコンパクトな成果を出すのではなく、さきがけ研究から始まる挑戦が、さきがけ研究終了後の10年間で量子状態制御の新しい潮流を生み出すことを狙いとした。よって、本研究領域に集う研究者が大いに議論を深め、スケールの大きい目標に向かって力強く協動的に進める環境を整える事に努め、さきがけ研究の活動を通じて、研究領

域において研究者が相互に影響し合い、異分野連携・融合的な視点で問題解決に取り組む中で、科学技術のイノベーションの源泉となる研究成果を創出するとともに、量子科学とその応用の将来を世界レベルでリードする若手研究者を輩出することを目指した。

なお、領域運営においては、同じ戦略目標を有する CREST「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」との連携・協働はもとより、CREST「新たな光機能や光物性の発現・利活用による次世代フォトニクスの開拓」、さきがけ「光の極限制御・積極利用と新分野開拓」研究領域、さきがけ「量子技術を適用した生命科学基盤の創出」研究領域との連携推進を図り、必要に応じて、領域会議やワークショップ等の開催を共同で行った。また、アウトリーチ活動や啓蒙活動等についても、本研究領域の研究者の協力を得つつ取り組んだ。必要に応じて、全国の共用設備(つくばイノベーションアリーナや文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム)や応募者が所属する研究機関内の既存設備など、研究設備・機器の共用を検討することも勧めた。

研究課題の指導については、採択時のキックオフミーティングから開始し、研究進捗の確認は年2回開催する領域会議、サイトビジット、各種イベントを通して実施した。

(2) 領域会議

領域会議は合計で11回開催した。領域会議では、さきがけ研究者が各自の研究報告を行い、研究総括・領域アドバイザー・さきがけ研究者らが全員で議論し、各研究課題への相互理解を深めた。さらに、オンサイトでの領域会議では、泊まり込み形式で夕食後に意見交換の場を設け、各自の専門分野だけでなく関連分野への視野を広げるための機会を設けた。また、さきがけ研究者の今後の成長を目的として、アドバイザーによる特別講演も設けた。2020年3月ごろからのコロナ禍突入に際しては、4月17日からの領域会議を中止や延期することなくオンライン実施することを直ちに決定した。当時 JST ではオンライン会議が整備されていなかったため、研究総括が大学で契約していた Webex を利用してオンライン会議を設定し、実際の会議進行は JST 領域担当が尽力した。結果としてこの領域会議が「さきがけ領域会議オンライン化」の先例となったと聞く。オンサイト・オンライン問わずに、各研究者へのフィードバックにおいては、研究者の発表後、アドバイザー・総括のみによる会議の場を設け、領域会議期間内に各研究者へのコメントを概ね作成し、領域会議後の各研究に遅滞なくフィードバックがかかるように努めた。

表 5.1 領域会議の一覧

回	日付	場所	特別イベント	参加者
第1回	2016/11/12 -13	クロスウェーブ船橋	意見交換会 小川 AD の特別講演「学習と学問」	1 期生
第2回	2017/4/22- 23	クロスウェーブ船橋	意見交換会 総合討論—長期的研究と短期的	1 期生

			研究ーのバランス 橋本 AD 講演「CUDOS と PLACE」	
第 3 回	2017/11/11- 12	ロワジールホテル豊 橋	意見交換会 古川 AD 特別講演	1-2 期生
第 4 回	2018/4/21- 22	ロイヤルホテル伊勢 志摩	意見交換会 谷 AD 特別講演	1-2 期生
第 5 回	2018/11/9- 11	ホテルコンコルド浜 松	意見交換会 中村 AD 特別講演	1-3 期生
第 6 回	2019/4/19- 21	ロイヤルホテル長野	意見交換会 藤原 AD 特別講演	1-3 期生
第 7 回	2019/11/8- 10	レクトーレ湯河原	意見交換会 1 期生の事後評価会	1-3 期生
第 8 回	2020/4/17- 18	webex	—	2-3 期生
第 9 回	2020/11/14 -15	webex	— 2 期生の事後評価会	2-3 期生
第 10 回	2021/4/24	webex	—	3 期生
第 11 回	2021/11/14	webex	3 期生の事後評価会	3 期生

(3) サイトビジット

領域会議に加え、さきがけ研究者の初年度および異動時には適宜サイトビジットを開催し、研究環境の確認、さきがけ研究がスムーズに進むための上司やメンターへの協力依頼、研究の進捗把握や研究計画へのヒアリング、相談などを実施した。特に研究体制に不安のある研究者には優先順位を上げて対応した。なお、コロナ禍においては入構規制や出社規制があったためオンラインにて実施した。

2016 年度：10 箇所

2017 年度：2 箇所

2018 年度：1 箇所

2019 年度：10 箇所

2020 年度：5 箇所（オンライン）

2021 年度：1 箇所

(4) 国際強化活動

川上研究者、武田研究者（2 期生）が 2018 年の国際量子技術ワークショップ（フランス）に参加し、同国を含めたヨーロッパの研究者達と有意義な意見交換をした。さらに、川上研

研究者は会議後に同国のサクレ原子力序センターを訪問し、世界で初めてヘリウム表面上の単一電子を捕獲した Mukharsky 博士と議論をし、2019 年に Mukharsky 博士を招聘し、その後の試料作製につなげた。また、同年には Rybalko 博士を招聘し、共振器の精度向上を図った。

(5) 研究課題間や他の研究領域、国内外の他の研究機関との連携・協力の推進

さきがけ研究者間の共同研究としては、藤井研究者と根来研究者が共同で特許の国内出願を 2 件、国際出願を 2 件出願しており、共著の原著論文としては 3 件、さらに藤井研究者と森前研究者の共著の原著論文が 1 件ある。

また、さきがけ「量子機能」領域の主催行事ではないが、さきがけ「量子機能」の中島研究者（2 期生）が中心となって主催した行事としては、以下の量子情報春の学校 2021 が挙げられる。コロナ禍で多くの研究会が中止あるいはオンラインになり、量子情報に興味を持つ学生が学習・交流する場が減ったことを受けて、中島が中心となり、全国の学部生・大学院生・若手研究者を対象に、2021 年 3 月にオンライン形式で 3 日間、「量子情報春の学校 2021」を開催した。学生だけでも 400 名以上の参加登録（学部生：約 250 人、大学院生：約 180 人）があり、当該領域のさきがけ研究者（根来(1 期)、野口(1 期)、藤井(1 期)、武田(2 期)、中島(2 期)、森前(2 期)、東(3 期)、中田(3 期)) を多く講演者・メンターに迎えて、基礎から応用、理論から実験に至る幅広い範囲で講義が行なわれた。上記記載のように、さきがけ「量子機能」を通して研究者間および新たな研究コミュニティの育成に大きな寄与があったと考えられる。

<https://sites.google.com/view/qinfspring2021/home?authuser=0>

(6) 研究費配分上の工夫

研究費の配分について、理論系のさきがけ研究者は大きな予算を必要としていなかったことから、無理のない範囲で採択時の予算を実験系と理論系とで分けた。さらに、最終年度である 3 期生においては採択者のレベルを高く保つために敢えて採択者数を 8 名とし、残った予算を総括裁量経費に組み入れた。この総括裁量経費により、全研究者からの研究加速・発展、装置トラブル、異動等に伴う増額申請があった時には、研究の進捗状況や提案内容を精査し、通常経費（JST での増額）に加え、大幅な加速や強化を図った。また、異動に伴う研究者の実験環境整備についても JST でのスタートアップ支援に加え、総括裁量経費での研究環境の維持や改善を図った。以下の表は増額案件のあった研究課題をまとめたものである。2 千万円以上の増額としては、武田俊太郎、堀切智之、今田裕らが挙げられ、1 千万円以上の増額としては、さらに野口篤史、山下太郎、川上恵里加、小塚裕介、太田泰友、小野貴史、不破麻里亜らが挙げられる。主な増額内容は研究加速・発展に向けた物品費の購入、異動に伴う実験環境設備の構築や機器の購入である。

表 5.2 研究費の増額リスト

(千円)

採択年度	研究者	年	内容	金額
2016 年度	相川 清隆	2018 年	5,000 千円：ヘリウム冷凍機の導入	6,500
		2019 年	1,500 千円：真空ポンプ類の導入	
	加藤 真也	2017 年	1,500 千円：異動に伴う機器購入	4,300
		2018 年	2,800 千円：任意信号発生器の導入	
	桐谷 乃輔	2018 年	4,435 千円：顕微 PL 用極低温装置の導入	4,435
	素川 靖司	2018 年	3,400 千円：異動に伴う機器の導入・移設	3,400
	根来 誠	2018 年	4,000 千円：計測操作システムの導入	4,000
	野口 篤史	2018 年	3,500 千円：波長可変半導体レーザーの導入	13,500
2019 年		10,000 千円：異動に伴う機器導入		
藤井 啓祐	2018 年	2,078 千円：研究補助者の追加	2,578	
	2019 年	500 千円：異動に伴うスタートアップ		
山下 太郎	2017 年	4,200 千円：異動に伴う機器移設	11,200	
	2018 年	4,000 千円：研究環境の立ち上げに伴う 機器導入		
		3,000 千円：量子ビット評価系の導入		
2017 年度	猪股 邦宏	2018 年	2,000 千円：マイクロ波ミキサ等導入	3,650
		2020 年	1,650 千円：マイクロ波源の導入	
	川上 恵里加	2018 年	470 千円：国際 WS への旅費・講演費	14,007
		2019 年	2,770 千円：海外研究者招聘（国際強化）	
		2020 年	10,767 千円：異動に伴うスタートアップ 支援（移設費、機器導入）	
	小塚 裕介	2018 年	2,000 千円：異動に伴う機器移設	12,715
2019 年		6,215 千円：パレリン蒸着装置の導入		
2020 年		4,500 千円：ロックインアンプ等の導入		
武田 俊太郎	2018 年	4,330 千円：通信波長帯レーザーの導入	24,230	
	2019 年	3,500 千円：波長変換モジュールの導入		
		10,000 千円：昇任独立に伴うスタートアップ 支援（光学定盤等の導入）		
2020 年	4,400 千円：光ファイバ融着接続器の導入 2,000 千円：光ファイバビームスプリッタ等 の導入			
中島 秀太	2019 年	3,300 千円：イメージング用カメラ等	4,905	
	2020 年	1,650 千円：制御・測定機器等		

	橋坂 昌幸	2020 年	1,650 千円：ソフトウェア、実験用消耗品等の導入	1,650
	フレイター マイケル	2020 年	1,650 千円：マイクロ波アンプ等の導入	1,650
	堀切 智之	2018 年	5,750 千円：波長変換励起レーザーの導入	22,000
		2019 年	14,600 千円：希土類結晶制御レーザーの導入	
		2020 年	1,650 千円：光学部品等の導入	
	今田 裕	2020 年	7,000 千円：高精度波長計の導入	20,000
		2021 年	13,000 千円：STM/AFM コントローラの導入	
	太田 泰友	2020 年	5,000 千円：プロセス装置の導入	14,800
		2021 年	9,800 千円：異動に伴うスタートアップ支援（移設費、機器導入）	
	小野 貴史	2020 年	10,000 千円：異動に伴うスタートアップ支援（移設費、機器導入）	10,000
	不破 麻里亜	2020 年	1,650 千円：制御・測定機器等の導入	13,013
		2021 年	11,363 千円：異動に伴うスタートアップ支援と総括裁量経費（移設費、機器導入）	
	山口 敦史	2020 年	5,000 千円：冷却装置導入	9,000
		2021 年	4,000 千円：パルスレーザー等の導入	
			合計	201,533

(7) 研究領域としての人材の輩出・成長の状況について

採択した 28 名の研究者のうち、ほとんどの研究者である 22 名がさきがけ研究期間中および終了直後に昇任した。内訳としては、教授への昇任が 2 名、准教授相当への昇任が 10 名であることに加え、博士研究員や特任研究員などの若い研究者が助教に昇任している。

さらに、本研究領域の研究終了後に藤井研究者と根来研究者がさきがけ「革新的な量子情報処理技術基盤の創出」、森前研究者が ACT-X「数理・情報のフロンティア」の領域アドバイザーに就任しており、さきがけ研究を通して若い研究者が大きく成長したと窺える。

助教→教授	1 名	藤井 啓祐
准教授→教授	1 名	山本 直樹
助教→准教授	3 名	武田 俊太郎
		田中 宗
		桐谷 乃輔（終了直後）
主任研究員→准教授	1 名	山下 太郎

特任助教→准教授	1名	野口 篤史
特任准教授→准教授	1名	太田 泰友
助教→特任准教授	1名	根来 誠
博士研究員→チームリーダー	1名	川上 恵里加
特定助教→特定准教授	1名	中島 秀太
招へい教員→特定准教授	1名	馬場 基彰
講師→独立研究者	1名	小塚 裕介
主任研究員→特別研究員	1名	東 浩司
助教→主任研究員	1名	橋坂 昌幸
研究員→上級研究員	1名	今田 裕
研究員→専任研究員	1名	山口 敦史
日本学術振興会特別研究員→講師	1名	加藤 真也 (終了直後)
特任研究員→助教	1名	中田 芳史
博士研究員→助教	3名	素川 靖司
		小野 貴史
		不破 麻里亜

(8) 研究成果によってもたらされた国内外の顕彰・受賞等について

本研究領域の研究成果によって、科学技術分野の文部科学大臣表彰若手技術者賞を9名の研究者が受賞し、その他にも以下の通り多くの受賞があった。

表 5.3 さきがけ研究期間での受賞リスト

(2021年12月1日現在)

受賞者名	賞の名称	授与者名	受賞年月
相川 清隆	科学技術分野の 文部科学大臣表彰 若手科学者賞	文部科学省	2017年4月
山下 太郎			2017年4月
小塚 裕介			2018年4月
橋坂 昌幸			2018年4月
桐谷 乃輔			2019年4月
野口 篤史			2019年4月
太田 泰友			2019年4月
武田 俊太郎			2020年4月

今田 裕			2021 年 4 月
相川 清隆	第 2 回末松賞	東京工業大学	2017 年 2 月
山下 太郎	第 21 回超伝導科学技術賞	超伝導科学技術研究会	2017 年 4 月
	エレクトロニクスソサイ エティ活動功労表彰	電子情報通信学会	2020 年 3 月
山本 直樹	IOP Quantum Science and Technology Outstanding Reviewers of 2017	IOP science	2018 年 2 月
	エレクトロニクスソサイ エティ活動功労表彰	電子情報通信学会	2018 年 3 月
桐谷 乃輔	Young researcher award, Symposium on Surface Science and Nanotechnology -25th Anniversary of SSSJ Kansai	Kansai Branch, Surface Science Society of Japan (SSSJ)	2017 年 1 月
	日本材料学会半導体エレ クトロニクス部門委員会 平成 28 年度 講演奨励賞	日本材料学会半導体エレク トロニクス部門委員会	2017 年 4 月
	令和元年度日本材料学会 学術奨励賞	日本材料学会	2020 年 5 月
猪股 邦宏	第 22 回超伝導科学技術賞	超伝導科学技術研究会	2018 年 4 月
	超伝導エレクトロニクス 第 146 委員会賞	学振 146 委員会賞	2018 年 4 月
武田 俊太郎	船井情報科学振興財団 船 井学術賞	船井情報科学振興財団	2021 年 5 月
	Innovators Under 35 Japan 2021	MIT テクノロジーレビュー (日本)	2021 年 11 月
馬場 基彰	光科学技術研究振興財団 平成 29 年度 研究表彰	光科学技術研究振興財団	2018 年 2 月
	Publons Peer Review Awards 2018 (Web of Science Group)	Web of Science Group	2018 年 9 月

	Top Peer Reviewer 2019 (Web of Science Group)	Web of Science Group	2019年9月
橋坂 昌幸	文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム H29年度秀でた利用成果 優秀賞	文部科学省ナノテクノロジー プラットフォーム	2018年2月
森前 智行	大川出版賞	大川情報通信基金	2018年11月
東 浩司	2019年度 NTT 先端技術 総合研究所長表彰（研究 開発賞）	NTT 先端技術総合研究所	2019年12月
今田 裕	日本物理学会若手奨励賞 (領域9)	日本物理学会	2019年3月
	日本表面真空学会誌賞	日本表面真空学会	2019年10月
小野 貴史	レーザー学会業績賞：論 文賞「オリジナル部門」	レーザー学会	2021年5月
太田 泰友	The Young Scientist Award	The International Symposium on Compound Semiconductors	2021年5月
	奨励賞	レーザー学会	2021年5月
森 立平	第43回量子情報技術研 究会 学生発表賞	電子情報通信学会エレクトロ ニクスソサエティ 量子情報 技術特別研究専門委員会	2021年5月
	第44回量子情報技術研 究会 学生発表賞	電子情報通信学会エレクトロ ニクスソサエティ 量子情報 技術特別研究専門委員会	2021年11月

(9) 研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献

JSTの新技术説明会では100名前後の企業関係者が聴講し、今後の技術展開や製品化に向けた個別打ち合わせや相談が期待される。本研究領域からは、山下研究者が2019年1月18日に「磁性体を用いた大規模化可能な超伝導量子コンピュータ」の題目で、超伝導量子ビットについての開発状況の紹介と企業との協業へ向けた講演を行った。

6. 研究領域としての戦略目標の達成状況について

(1) 研究成果の達成状況

本研究領域が研究対象とする量子情報分野、特に量子コンピュータ・量子通信・量子暗号の近年の進展は凄まじいものがある。しかし、その流れに参加することは「追従」であり「さきがけ」ではない。今の発展は、先見性のある研究者たちのさきがけた基盤のうえに築かれていることを認識することが大切である。それだけに本研究領域では、さきがけ研究の3年間でコンパクトな成果を出すのではなく、さきがけ研究から始まる挑戦が、さきがけ研究終了後の10年間で量子状態制御の新しい潮流を生み出すという目標を、領域の発足当初から明確にしてきた。そのために、本研究領域では様々なバックグラウンドを有する研究者をバランスよく採用し、彼（女）らが議論を深め、スケールの大きい目標に向かって勇気を持って力強く協動的に挑戦する環境を整えることを心がけてきた。そして、研究領域において研究者が影響し合い、異分野連携・融合的な視点で問題解決に取り組む中で、科学技術のイノベーションの源泉となる研究成果を創出するとともに、量子科学とその応用の将来を世界レベルでリードする若手研究者を輩出することを目指した。

以上のような視点において、基礎理論、特に量子情報理論の分野では藤井啓祐博士が領域内でのディスカッションをリードし、自らも量子コンピュータの長期的な発展に不可欠な「誤り訂正符号」に関する新しい方向性を打ち出したことは大いに評価される。また、森前知行博士は古典計算と量子計算の性能を科学的かつ厳密に比較したことも高く評価される。

量子機能の実験面における超伝導分野では、山下太郎博士が現在の主流である超伝導量子ビットとは異なり、ゼロ磁場で動作する「 π 量子ビット」という新しいコンセプトを発案し、そのプロトタイプを実験的に作製することに成功した。また、野口篤史博士は表面弾性波と超伝導量子ビットの相互作用の研究から、新しい量子ビット「キュービクトランズモン」のコンセプトを発案し、その実験にも成功した。

超伝導以外の量子ビットとして、光を用いた量子コンピューティングでは武田俊太郎博士が、大規模・汎用的でプログラマブルな量子コンピューティングをループ型の光量子プロセッサを用いて実現する実験に取り組んだ。また、川上恵里加博士は、液体ヘリウム上の単一電子スピン状態を量子ビットに採用し、実用性のあるゲート型量子コンピュータの実現を目指す実験に取り組んだ。武田博士と川上博士の研究の共通点は、自らのアイデアを世界最高レベルの実験技術で具現化していくということで、本さきがけ期間中に要素技術を磨き上げたことである。

将来的な量子機能に向けた物性研究や評価技術では、今田裕博士が単一分子レベルでの光捕集における量子効果の解明と制御を目標に据えて、走査型トンネル顕微鏡（STM）に超高速レーザーを組み合わせた極限的な時空間分光法を開発し、単一分子内に生じる光電流を原子レベルの空間分解能とマイクロ eV のエネルギー分解能で可視化（光誘起電荷分離）することに初めて成功したことは高く評価される。また、山口敦史博士はトリウム同位体 Th-229 を用いて世界一高精度な時計の開発に取り組んだ。Th-229 原子核内のエネルギー準位と遷移を詳細に解明することから、現在の世界最高精度の時計より一桁優れた $1e-19$ 程

度の時計精度が得られる可能性を示し、その実現に向けた開発を世界にさきがけて行っている。東浩司博士は量子計算、量子通信、量子計測といった様々な量子技術を含む上位概念としての量子インターネット研究を理論面から発展させた。中田芳史博士は量子疑似ランダムネス理論を駆使して量子情報技術全般の発展に寄与した。その他の研究者も理論・実験の両面において、10年後の世界的潮流を創るべく鋭意努力した。コロナ禍においても鋭意研究を進めた本研究領域の研究者の今後の発展が実に楽しみである。以下、個々の上記研究者の成果について概要を記載する。

藤井啓祐研究者

現状、量子ビット数はまだ少なく、理論的に保証された量子アルゴリズムを用いて解くことができる大規模な誤り耐性量子コンピュータの実現は20年以上の先と考えられており、その前にノイズを含んだ中規模の量子コンピュータ、NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum computer) の時代が来ると考えられている。本研究は、このようなNISQ時代の到来にさきがけて、近未来的に実現する量子コンピュータを応用するための方法の開発に取り組んだ。特に、物理系がもつ計算能力を賢く活用し情報処理を行うレザバー計算に着目し、量子レザバー計算を提案した。さらにこれらを発展させ、NISQ型量子コンピュータを用いた世界初の機械学習アルゴリズム、量子回路学習を提案した。量子回路学習はIBMの実験グループが原理実証実験をするなど、NISQ型量子コンピュータの代表的なアルゴリズムになっている。さらにNISQ型量子コンピュータから大規模な誤り耐性量子コンピュータへと筋道をつけるため、本研究では、より高いノイズ耐性を目指した新たな量子誤り訂正符号方式や、量子コンピュータにおけるノイズ解析手法やデバッグ法の研究開発も行った。

代表的な参考文献

K. Fujii and K. Nakajima "Harnessing Disordered-Ensemble Quantum Dynamics for Machine Learning." *Physical Review Applied*, 2017, 8, 024030. [被引用数 121]

プレスリリース <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20171107/index.html>

Y. Suzuki, K. Fujii, and M. Koashi, "Efficient simulation of quantum error correction under coherent error based on the nonunitary free-fermionic formalism", *Physical Review Letters*, 119, 190503 (2017). [被引用数 19]

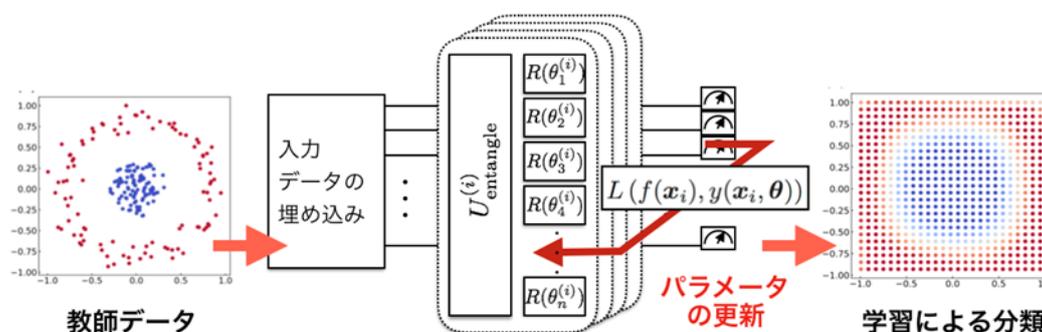


図 6.1 量子回路学習の構成図

森前智行研究者

従来の量子スプレマシーでは量子計算は多項式時間で古典シミュレートできないというものであったが、今回は指数時間であっても古典シミュレートできないというより強力な結果を得た。また、量子 Trusted center による古典検証者の検証プロトコルの構築に成功した。これらの結果は、Fine-grained 量子超越性。古典の Fine-grained complexity theory における仮定に基づき指数時間量子超越性の証明。さらに、量子計算の検証プロトコル。量子計算が正しく動作しているかをチェックする量子暗号プロトコルの構築に繋がる結果である。

代表的な参考文献

Morimae and Tamaki, “Additive-error fine-grained quantum supremacy”, Quantum 4, 329 (2020) [被引用数 4]

Morimae, “Quantum randomized encoding, verification of quantum computing, no-cloning, and blind quantum computing”, Quantum Information and Computation 21, 1111(2021) [被引用数 1]

山下太郎研究者

磁束型量子ビットは超伝導量子ビットの中で高い非調和性等の優れた特徴をもっており、本研究では超伝導/磁性ハイブリッド素子であるスピンジョセフソン接合 (π 接合) を開発し、これを位相制御素子として超伝導量子回路へ組み込むことで、大規模化可能な量子計算素子 (量子ビット) 及び超伝導論理回路の基盤技術を創出した。作製面では量子回路応用に適する酸化物フリーな窒化ニオブ π 接合を導入した磁束型量子ビットを作製し、磁束バイアスフリー動作実証に成功した。今後、超伝導回路へ π 接合を融合し低電力化や小型化等の様々な優位性を示し、磁束バイアスフリーで最適動作する π 接合量子ビットにより、多量子ビット回路の制御が飛躍的に容易となり、大規模量子回路の実現が加速される。

代表的な参考文献

Taro Yamashita, Akira Kawakami, Hirotaka Terai, “NbN-based 0 and π ferromagnetic Josephson junctions”, Physical Review Applied, 2017, vol. 8, pp. 054028-1-5. [被引用数 27] プレスリリース <https://www.nict.go.jp/press/2017/11/15-1.html>

Kota Arai, Naoki Takeuchi, Taro Yamashita, Nobuyuki Yoshikawa, “Adiabatic quantum-flux-parametron with π Josephson junctions”, Journal of Applied Physics, 2019, vol. 125, no. 9, pp. 093901-1-7. [被引用数 6]

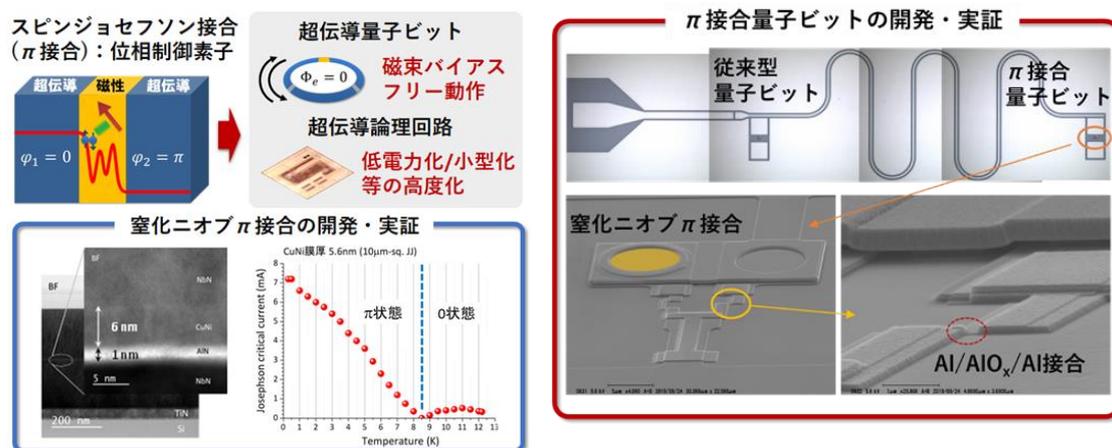


図 6.2 磁石と超伝導体の融合による新しい量子計算デバイスの概念図（左上）、実証図（左下）概観図（右）

野口篤史研究者

本研究では、非常に高寿命として知られている物体表面に局在化した表面弾性波と、制御性の高い超伝導量子回路とに着目し、これらの異なった性質の量子系が互いに結合したハイブリッド量子系を構築した。さらに、その研究の中で新しい超伝導共振回路として二次の非線形性を持つ回路を開発し、電磁波に人工的に大きな輻射圧を持たせることに成功した。この結果、既存の測定精度を二桁向上する事に成功し、超伝導回路の持つ非線形性を巧みに設計し、世界で初めて単一光子で量子制御可能なオプトメカニクスを実現した。

代表的な参考文献

Atsushi Noguchi, Rekishu Yamazaki, Yutaka Tabuchi, and Yasunobu Nakamura, “Qubit-Assisted Transduction for a Detection of Surface Acoustic Waves near the Quantum Limit”, Phys. Rev. Lett. 119, 180505 (2017) [被引用数 62]

Atsushi Noguchi, Rekishu Yamazaki, Yutaka Tabuchi, and Yasunobu Nakamura, “Single-photon quantum regime of artificial radiation pressure on a surface acoustic wave resonator”, Nature Communications. vol.11, 1183 (2020) [被引用数 12]

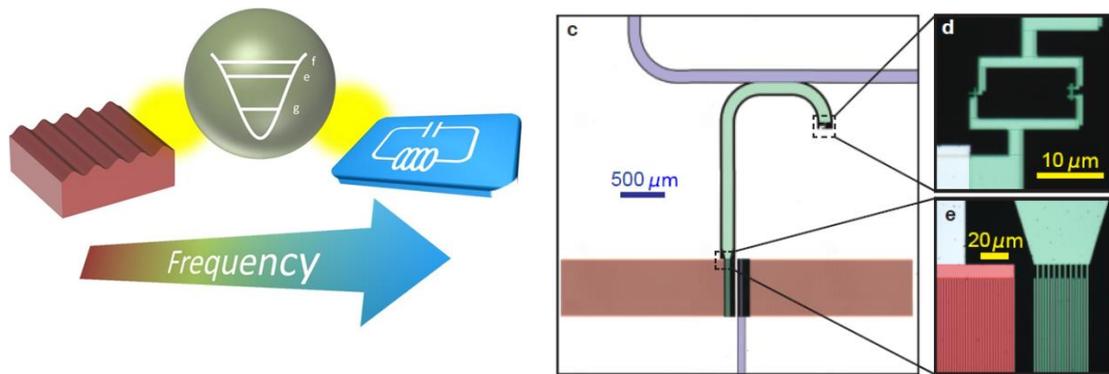


図 6.3 ハイブリット系による変換アレイの概念図（左図）、人工輻射圧を持った超伝導回路と表面弾性波共振器の写真（右図）

川上恵里加研究者

ヘリウム表面上の電子は、真空中に存在し、周りにノイズの原因となるものが少ないので、これを用いた高精度な量子ビットの実現が期待されている。本研究では、万能デジタル量子コンピュータを実現するための、第一歩として量子ビットの状態を読み出す技術として image-charge detection（鏡像電荷検出）と名付けた新たな読み出し技術を確認し、リュードベリ状態の励起を検出した。さらに、Image-charge detection に適切な増幅機能を付加して測定精度を向上し、リュードベリ状態の緩和時間を温度 135–700mK の領域で測定することに成功した。その結果、500mK 以上の高温領域ではヘリウム蒸気による緩和、550mK 以下の低温領域ではヘリウム表面弾性波 (ripplon) による緩和が支配的であることを明らかにした。測定された緩和時間は 135mK の時のおよそ 1 マイクロ秒が最長であった。また、リュードベリ状態の基底状態から励起状態への遷移レートはおよそ 40 MHz であることがわかった。これらの結果は従来の超伝導共振器や単一電子トランジスタを用いたものと比べ、実装が単純で、高精度な読み出しを出来るため、量子ビットを集積化していくための読み出し技術として、大きな優位性がある。

代表的な参考文献

Erika Kawakami, Asem Elarabi, and Denis Konstantinov, “Image-Charge Detection of the Rydberg States of Surface Electrons on Liquid Helium”, Phys. Rev. Lett. 123, 086801 (2019) [被引用数 10]

Erika Kawakami, Asem Elarabi, and Denis Konstantinov, “Relaxation of the Excited Rydberg States of Surface Electrons on Liquid Helium”, Phys. Rev. Lett. 126, 106802 (2021) [被引用数 4]

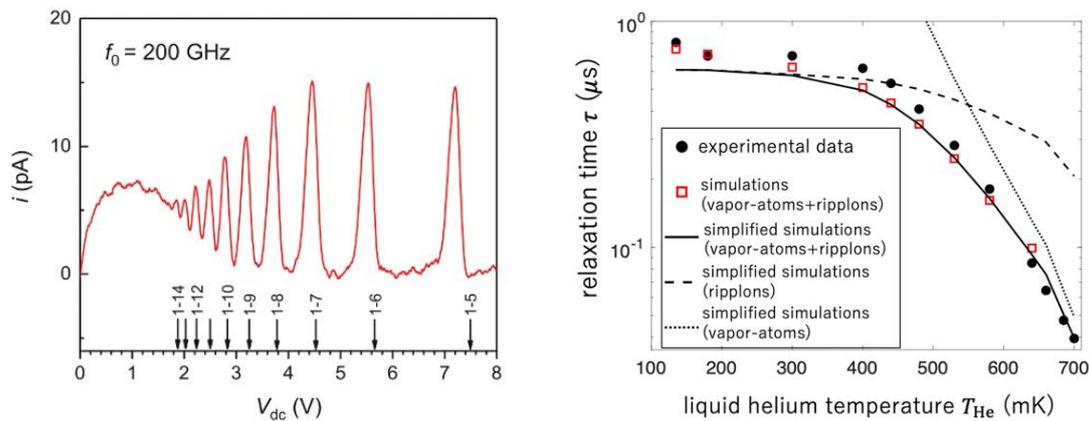


図 6.4 鏡像電荷検出により測定された電流値（左図）、液体 He 温度の変化による緩和時間の変化（右図）

武田俊太郎研究者

光を用いた量子コンピュータは、室温動作可能であり、現状の光通信に展開可能という利点を持つ一方で、拡張性や汎用性の乏しいものであった。本研究では、シンプルなループ型光回路を動的に制御するという独自のアイデアで、与えられたプログラムに従ってどのような計算も効率よく実行可能な、汎用光量子コンピュータのアーキテクチャを実現することを目指した。その結果、独自方式の光量子コンピュータの心臓部となるプロセッサを世界に先駆けて開発し、1000 個以上の量子もつれ光パルスの合成や多段階の量子演算の機能を実証した。本方式は連続変数の情報処理が可能であり、汎用性・拡張性を兼ね備えた光量子回路の実現に向けて着目されている。

代表的な参考文献

Shuntaro Takeda, Kan Takase, Akira Furusawa, “On-demand photonic entanglement synthesizer”, Science Advances 5 eaaw4530 (2019) [被引用数 42]

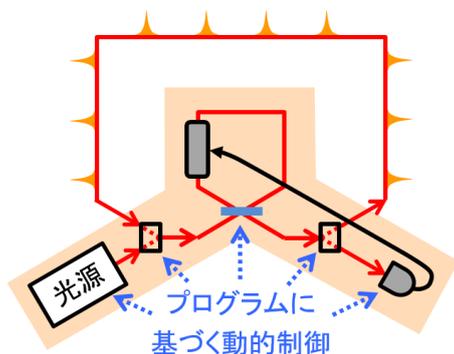
プレスリリース <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20190518/index.html> さらにNHKニュース、産経新聞、日本経済新聞、毎日新聞など各紙で報道された。

Yutaro Enomoto, Kazuma Yonezu, Yosuke Mitsuhashi, Kan Takase, Shuntaro Takeda, “Programmable and sequential Gaussian gates in a loop-based single-mode photonic quantum processor”, Science Advances 12 eabj6624 (2021) [被引用数 0]

プレスリリース <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20211113/index.html> さらに日本経済新聞、共同通信、時事通信、IT Media、EE-Times、Yahoo ニュースなど各紙で報道された。

さらに、科学技術イノベーションの創出と言う観点では上記研究成果が基となり武田研究者が Innovators Under 35 Japan 2021 に選出され、今後、この分野の発展が期待される。

独自のループ型光量子コンピュータ方式



◎拡張性：最小回路で大規模計算が可能

◎汎用性：同一回路で様々な計算が可能

本方式の心臓部となるプロセッサを開発
⇒拡張性・汎用性を兼ね備えた世界的にも
ユニークな光量子回路の動作を実証



今後、技術刷新により日本発・世界初の
大規模量子コンピュータを目指す

図 6.5 ループ型光量子コンピュータ方式の概略図

今田裕研究者

本研究では、レーザー励起された単一分子が生み出す発光や光電流を、光シグナルあるいはSTMの探針を流れるトンネル電流として検出し、ナノスケール/原子レベルの空間分解能を達成した。具体的には、狭線幅の波長可変レーザーを光STMに導入してフォトルミネッセンス分光を実現し、単一分子の電子状態や振動状態などの量子状態を、マイクロ eV のエネルギー分解能とナノスケールの空間分解能で精密に評価することを可能とした。さらに、光電流計測では、光電流の流れ方が分子軌道を強く反映していることや、印加電圧によって流れる電流の方向や空間分布が大きく変化することを見出した。また、空間平均的に見れば電流が 0 の電圧であっても分子内には対向して流れる光電流チャンネルが存在することも新たに発見した。

代表的な参考文献

Hiroshi Imada, Miyabi Imai-Imada, Kuniyuki Miwa, Hidemasa Yamane, Takeshi Iwasa, Yusuke Tanaka, Naoyuki Toriumi, Kensuke Kimura, Nobuhiko Yokoshi, Atsuya Muranaka, Masanobu Uchiyama, Tetsuya Taketsugu, Yuichiro K. Kato, Hajime Ishihara and Yousoo Kim, “Single-molecule laser nanospectroscopy with micro-electron volt energy resolution”, Science 373, 95-98 (2021) [被引用数 5] プレスリリース <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20210702/index.html>

Miyabi Imai-Imada, Hiroshi Imada, Kuniyuki Miwa, Yusuke Tanaka, Kensuke Kimura, Inhae Zoh, Rafael B. Jaculbia, Hiroko Yoshino, Atsuya Muranaka, Masanobu Uchiyama and Yousoo Kim, “Orbital-resolved visualization of single-molecule photocurrent channels”, Nature 603, 829-834 (2022) [被引用数 0]

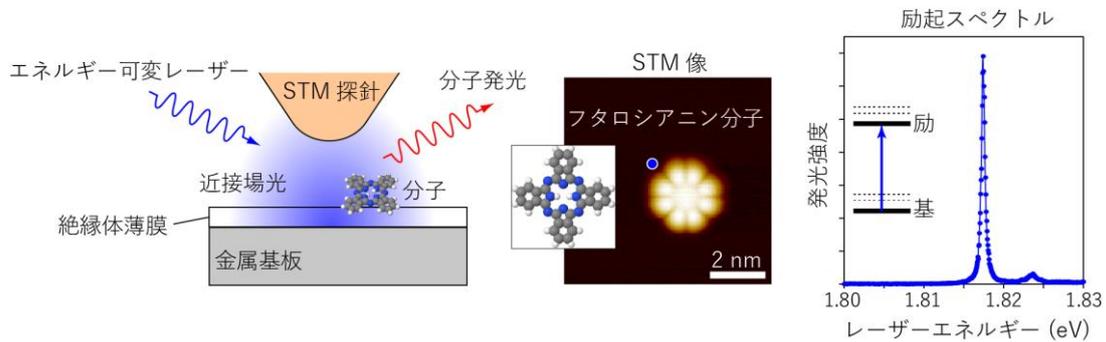


図 6.6 光 STM を用いた単一分子精密ナノ分光の概念図（左）と実験結果（中央、右）

山口敦史研究者

本研究ではトリウム 229 の励起状態の半減期を決定するため、ウラン 233 から α 粒子と γ 線の同時計測を行った。42.43 keV と 164.53 keV 状態の半減期は文献値と一致したが、97.14 keV の半減期は既知の値から乖離しており、71.83 keV と 163.25 keV の半減期を初めて決定した。さらに、得られた半減期と Alaga 則に基づきトリウム 229 における低エネルギーのアイソマー状態の放射性半減期は 5000 秒（狭遷移線幅：1 mHz）であった、これはトリウム 229 に基づく周波数標準の重要なパラメータの 1 つとなる。

代表的な参考文献

Y. Shigekawa, A. Yamaguchi, K. Suzuki, H. Haba, T. Hiraki, H. Kikunaga, T. Masuda, S. Nishimura, N. Sasao, A. Yoshimi, and K. Yoshimura, “Estimation of radiative half-life of ^{229m}Th by half-life measurement of other nuclear excited states in ^{229}Th ”, Phys. Rev. C 104, 024306 (2021) [被引用数 1]

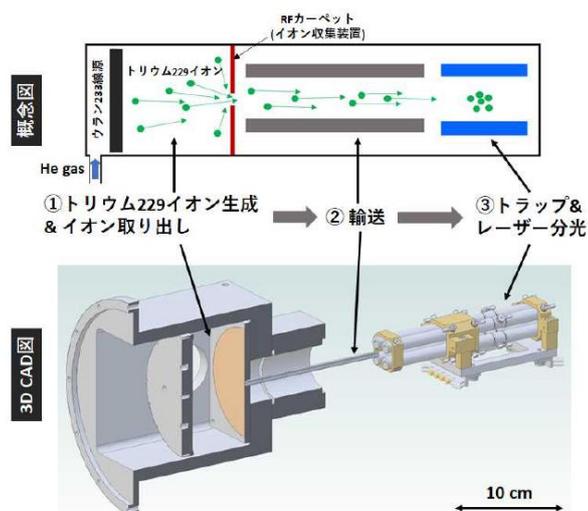


図 6.7 トリウムイオントラップ装置の概念図（上）と CAD 図（下）

東浩司研究者

量子暗号通信におけるツイン・フィールド量子鍵配送 (TF QKD) は、送受信者間に設置された測定器における単一光子干渉を利用することによって、ポイント・ツー・ポイント QKD の秘匿通信容量を凌駕するパフォーマンスを持つと期待されている。本研究では、概念的に元々の提案より簡潔な TF QKD プロトコルを導入した。これにより、安全性が簡潔に証明されるだけでなく、実装も単純化された。また、本方式の鍵配送レートは、当初予想された通り、ポイント・ツー・ポイント QKD の秘匿通信容量を超えるものである。

代表的な参考文献

Marcos Curty, Koji Azuma, and Hoi-Kwong Lo. “Simple security proof of twin-field type quantum key distribution protocol”, npj Quantum Information 5, 64 (2019) [被引用数 103]

中田芳史研究者

本研究では、高次の量子擬似ランダムネスを厳密に生成する量子回路を提案し、その応用として、ノイジーな量子情報デバイスを検証する randomized benchmarking (RB) プロトコルの改善を行った。前者は数学の一分野における未解決問題を解決した点で量子情報の枠を超えた顕著な成果である。後者は現在のノイジーな量子情報デバイスの改善に向けた実験手法を提案し、実際に実験実装したものであり、量子情報技術の堅実な発展に資するものである。

代表的な参考文献

Y. Nakata, D. Zhao, T. Okuda, E. Bannai, Y. Suzuki, S. Tamiya, K. Heya, Z. Yan, K. Zuo, S. Tamate, Y. Tabuchi, and Y. Nakamura, “Quantum circuits for exact unitary t-designs and applications to higher-order randomized benchmarking”, PRX Quantum 2, 030339 (2021) [被引用数 4]

(2) 論文、学会発表、知財の状況

本研究領域での論文件数 (国際) は 156 件、学会等での口頭発表件数は 564 件 (国内 362 件、国際 202 件)、招待講演件数は 270 件 (国内 179 件、国際 91 件)、特許出願件数は 13 件 (国内出願 : 8 件、国際出願 : 5 件) であり、研究領域として数多くの成果を発信することが出来たと考えられる。学術論文としては、Science、Nature、Nature Communications、Advanced Materials、Science Advances、Physical Review Letters 等の国際誌にも多く掲載されている。以下、上記 6 (1) 研究成果の達成状況以外の特徴的な論文成果について、基礎理論関係、光関係、原子・分子・電子関係について紹介する。

① 基礎理論関係

田中宗研究者

Koki Kitai, Jiang Guo, Shenghong Ju, Shu Tanaka, Koji Tsuda, Junichiro Shiomi, and Ryo Tamura, “Designing Metamaterials with Quantum Annealing and Factorization Machines”, *Physical Review Research*, 2, 013319-1-10 (2020) [被引用数 33]

量子アニーリングをはじめとしたイジングマシンを活用する際、組合せ最適化問題の目的関数が陽に与えられており、かつイジングモデルで表現できる必要がある。これはイジングマシンの活用範囲を限定してしまうボトルネックとして考えられてきた。本研究では、ブラックボックス最適化に対しイジングマシンを適用する新たな方法を考案した。これは機械学習における推論にイジングマシンを適用する研究として位置付けられ、また、イジングマシンの応用範囲の拡大を行うことができたという意義がある。

山本直樹研究者

R. Shimazu and N. Yamamoto, “Quantum functionalities via feedback amplification”, *Phys. Rev. Applied* 15, 044006 (2021) [被引用数 4]

フィードバック増幅は高度に制御された現代科学技術の基幹技法であり、典型的には電子回路中に内蔵されるオペアンプとして具現化される。本論文は、量子フィードバック増幅法の一般理論をはじめとて与え、フィードバック増幅法が多様な量子機能発現に有用であることを示すものである。とくに、超伝導量子系において、従来法よりもノイズロバストである一方向増幅器の構成法を与えている。また、量子レベルの信号検出器の帯域を広げるために、常温で機能する位相キャンセルフィルタの構成法を与えている。

馬場基彰研究者

X. Li, M. Bamba, N. Yuan, Q. Zhang, Y. Zhao, M. Xiang, K. Xu, Z. Jin, W. Ren, G. Ma, S. Cao, D. Turchinovich, and J. Kono, “Observation of Dicke cooperativity in magnetic interactions”, *Science*, 2018, Vol. 361, Issue 6404, 794-797 (2018) [被引用数 69]

磁性体 ErFeO_3 において、Er スピン集団と Fe マグノンモードとの結合の強さが Er 密度の平方根に比例することを、静磁場下のテラヘルツ振動数帯での吸収スペクトル測定によって実験的に確認した。結合の強さ（共鳴振動数の反発の大きさ）が Er 密度の平方根に比例すること（Er スピン集団と Fe マグノンの協同効果）は、超放射相転移が起こるための必要条件であり、それを実験的に確認した。

T. Makihara, K. Hayashida, G. T. Noe, X. Li, N. M. Peraca, X. Ma, Z. Jin, W. Ren, G. Ma, I. Katayama, J. Takeda, H. Nojiri, D. Turchinovich, S. Cao, M. Bamba, and J. Kono, “Ultrastrong magnon-magnon coupling dominated by antiresonant interactions”, *Nature Communications*, 2021, Vol. 12, 3115 (2021) [被引用数 6]

磁性体 YFeO_3 に掛ける静磁場の方向を変化させることで、 YFeO_3 中の 2 つのマグノンモー

ド間の結合が制御できることを実験的に確認した。具体的には、テラヘルツ振動数帯の吸収スペクトルから、共鳴振動数の反発が磁場を掛ける方向によって制御できることを観測した。また、量子スクイーミングについても理論的に見積もり、熱平衡下の YFeO₃ において、十分に低温であれば、有意な量子スクイーミングが得られることを示した。

森立平研究者

Y. Kondo, R. Mori, and R. Movassagh, “Improved robustness of quantum supremacy for random circuit sampling,” accepted for the publication in the Proceedings of IEEE Symposium on Foundation of Computer Science (FOCS) (2021) [被引用数 0]

本報告ではランダム量子回路の出力確率の近似計算が古典コンピュータにとって困難であることを計算量的な仮定から示した。あるアーキテクチャ(量子回路のゲートの配置だけを指定して、実際に配置されるゲートは指定しないもの)が存在して、そのアーキテクチャ上のランダム量子回路の出力確率を加法的誤差 $\exp(-\Omega(m \log m))$ で計算することは #P 困難である。ここで m は量子回路のゲート数である。

② 光関係

相川清隆研究者

M. Kamba, H. Kiuchi, T. Yotsuya, K. Aikawa, “Recoil-limited feedback cooling of single nanoparticles near the ground state in an optical lattice”, Phys. Rev. A 103, L051701 (2021) [被引用数 5]

研究者らは光格子中に捕捉された単一ナノ粒子が、レーザーの位相ノイズによって大きく加熱されることを見出し、光共振器により測定された位相ノイズの大きさと加熱の速さを直接結びつけるモデルを考案し、このモデルが実験結果とよく一致することを示した。さらに、光共振器によりレーザーの位相ノイズを低減することで、光格子方向の運動を基底状態からの占有数が 3 程度の状態まで冷却することに成功した。十分に位相ノイズが低い場合、ナノ粒子の運動の加熱は、捕捉レーザー光の散乱による光子反跳が支配的であった。この結果は、光格子中のナノ粒子を量子力学的な研究や高感度加速度計への道を開くものである。

加藤真也研究者

Shinya Kato et al., “Observation of dressed states of distant atoms with delocalized photons in coupled-cavities quantum electrodynamics”, Nature Communications 10, 1160 (2019) [被引用数 34]

共振器量子電気力学 (CQED) 系は光と原子が量子的に相互作用する物理系で、原子の持つ状態の制御性や光の持つ長距離伝搬可能な性質のそれぞれを活かすことが可能な系として基礎的な面でも応用の面でも重要な物理系である。これまでの実験では CQED 系を個別に動

作させた量子光学の実験は多数存在したが、複数の CQED 系を低損失に接続し量子的に拡張していく実験についてはその重要性を指摘する理論提案はあっても実験的に検証した例は存在しなかった。この論文では独自の光ファイバをベースにした CQED 系を用いて 2 台の CQED ユニットを低損失に光接続し、全体で一つの量子系として振る舞う様子を観測した。

Donald H. White, Shinya Kato et al., “Cavity Dark Mode of Distant Coupled Atom-Cavity Systems”, *Physical Review Letters* 122, 235603 (2019) [被引用数 15]

光ファイバを用いた CQED 系を低損失に接続することで、全体として量子的に振る舞うことは上記の論文で実験的に示された。この論文では接続された CQED 系で始めて実現する特異なエネルギー状態を直接観測したことを報告した。それは原子の存在する光共振器には光電場が存在しないモードでありながら、原子と相互作用するからこそ実現する飽和の兆候を示す極めてユニークな状態で、その理論解析とともに発表を行った。

堀切智之研究者

Kazuya Niizeki, Daisuke Yoshida, Kou Ito, Ippei Nakamura, Nobuyuki Takei, Kotaro Okamura, Mingyang Zheng, Xiuping Xie, Tomoyuki Horikiri, “Two-photon comb with wavelength conversion and 20-km distribution for quantum communication”, *Communications Physics* 3, 138 (2020) [被引用数 3]

量子中継に必要な通信波長もつれ光源と量子もつれ結合システムに関する研究。多重化量子通信による量子もつれ生成レートの上昇による量子中継実装を目指し、中継ノード間を量子もつれ伝送させるための量子もつれ光源と中継ノード設置量子メモリとの高効率結合系が必要である。本研究では、Pr:YSO 量子メモリとの結合を可能にする狭線幅通信波長量子もつれ光源を開発し、通信波長-量子メモリ波長間の波長変換システムと合わせて実装し、量子メモリ波長変換後の 2 光子相関の観測に成功した。

太田泰友研究者

R. Katsumi, Y. Ota, A. Osada, T. Yamaguchi, T. Tajiri, M. Kakuda, S. Iwamoto, H. Akiyama and Y. Arakawa, “Quantum-dot single-photon source on a CMOS silicon photonic chip integrated using transfer printing”, *APL Photonics* 4, 036105 (2019) [被引用数 29]

本論文では CMOS プロセスにより作製したシリコンフォトニクス回路上へ InAs/GaAs 量子ドット光源をハイブリッド集積することに成功した。集積には転写プリント法を用い、50 nm 程度の高い位置合わせ精度を実証した。数値計算により 99%を超える効率で量子ドット発光を導波路へ結合できることを示した。実験では、量子ドットからの単一光子発生と導波路への高効率結合効率を観測し、シリコン上ハイブリッド集積量子ドット単一光子源を実証した。

③ 原子・分子・電子関係

桐谷乃輔研究者

H. Ichimiya, M. Takinoue, A. Fukui, K. Miura, T. Yoshimura, A. Ashida, N. Fujimura, D. Kiriya, “Tuning Transition-Metal Dichalcogenide Field-Effect-Transistor by Spontaneous Pattern Formation of an Ultrathin Molecular Dopant Film”, ACS Nano 2018 12, 10, 10123-10129 (2018) [被引用数 3]

半導体デバイス（ダイオード、トランジスタ、光学素子）を構築する上で、pn 接合は基盤となる機能構造である。本論文では、2次元半導体上へ電子供与性分子を界面・極薄膜化し、さらに非平衡場において「電子接合構造を自発的にパターン化」しうることを示した。非平衡場によるデバイスの自発組み立て、という新しいデバイス構築概念の提案を行なった。さらに、この現象は、無数に量子接合構造を自発的に組み上げることも可能であると考えられ、現在その実証に向けて研究を進めている。

素川靖司研究者

Seiji Sugawa, Francisco Salces-Carcoba, Yuchen Yue, Andika Putra, and I. B. Spielman, “Wilson loop and Wilczek-Zee phase from a non-Abelian gauge field”, npj Quantum Information, 7, Article number: 144 (2021) [被引用数 1]

10 万個のナノケルビン温度の極低温ルビジウム原子集団に対し、マイクロ波制御によって、非可換幾何学的位相（SU(2) Wilczek-Zee 位相）を制御・観測することに成功し、非自明な位相獲得をゲージ不変な物理量であるウィルソン・ループによって正確に特徴付けた。独自の結合スキームによって、高フィデリティかつ堅牢な断熱的位相制御が実現できることを示した本研究成果は、基礎学術的な意義のみならず、非可換幾何学的位相を用いたスピンドバイスや高エネルギー現象の量子シミュレーション、ホロノミック量子コンピュータ等への応用が期待される。

橋坂昌幸研究者

M. Hashisaka, T. Jonckheere, T. Akiho, S. Sasaki, J. Rech, T. Martin, K. Muraki, “Andreev reflection of fractional quantum Hall quasiparticles”, Nature Communications 12, 2794-1-7 (2021) [被引用数 2] .

占有率 1/3 の分数量子ホール系と占有率 1 の整数量子ホール系の界面において、超伝導-常伝導接合におけるアンドレーエフ反射と類似の分数量子ホール系のアンドレーエフ反射型プロセスを起こすことを観測した。さらに、量子ホール系のトポロジカルな性質により、界面において自然に複数回散乱が生じ、多重アンドレーエフ反射が起こることを観測した。これは 1990 年代に盛んに研究された理論予測を実験で初めてとらえた成果である。

小塚裕介研究者

Y. Kozuka, A. Sakaguchi, J. Falson, A. Tsukazaki, M. Kawasaki, “Andreev reflection at the interface with an oxide in the quantum Hall regime”

Journal of the Physical Society of Japan, 87, 124712 (2018) [被引用数 5]

(注目論文として選出され、科学新聞：2019年2月1日(1面)「異なる巨視的量子状態の界面実現へ」に掲載された)

本研究では、外部擾乱に強い量子ビットであると期待されるマヨラナ状態を形成するため、酸化亜鉛二次元電子系の量子ホール状態とアモルファス超伝導体 MoGe の接合を作製した。界面伝導度の測定により、二次元電子系と超伝導体が良質な接合を形成していることを示す、アンドレーエフ反射が観測された。また、磁場中で二次元電子系が量子ホール状態にあるとき特異的に通常のアンドレーエフ反射ではなく多重アンドレーエフ反射が起こっていることを示唆する結果を得た。この成果はマヨラナ状態を形成するための材料基盤が整ったことを示している。

H. Hou, Y. Kozuka, Jun-Wei Liao, L. W. Smith, D. Kos, J. P. Griffiths, J. Falson, A. Tsukazaki, M. Kawasaki, C. J. B. Ford, “Quantized conductance of one-dimensional strongly correlated electrons in an oxide heterostructure”, Physical Review B 99, 121302(R)-1-6 (2019) [被引用数 1]

本研究では、量子デバイスを作製する際に必須となる、ゲート絶縁膜の改善を行った。これまで、二次元電子系が界面に存在する酸化亜鉛ヘテロ構造上にアルミナゲート絶縁膜を積層すると、二次元電子系に乱れが生じることが明らかとなっていた。この問題に対し、有機絶縁膜であるパリレンをゲート絶縁膜として用いることで、アルミナ絶縁膜に由来すると思われる乱れが抑制され、量子ポイントコンタクトデバイスでは明瞭な1次元伝導を示す量子化が観測された。

(3) 知財状況

知財状況の詳細については以下のようになっている。なお、国内出願後に国際出願した場合には一つにまとめて記載した。

(2021年12月1日現在)

根来誠 (第一期生) ・ 藤井啓祐 (第一期生)	
1	出願番号：特願 2017-21450 出願日：2017/02/08 公開番号：特開 2018-128857 公開日：2018/08/16 特許第 6853531 号 登録日：2021/03/16 国際出願番号：PCT/JP2018/003750 国際出願日：2018/02/05 国際公開番号：WO/2018/147208 発明の名称：量子計算装置および量子計算方法 発明者：根来誠、北川勝浩、中嶋浩平、藤井啓祐 出願人：大阪大学、京都大学

	<p>概要：従来の半導体型フォンノイマンアーキテクチャに代わる新しいアーキテクチャとして、本発明はデジタル量子計算機に関するものであり、フォンノイマン型計算で用いられたビット素子の部分を、量子力学的重ね合わせを許す量子ビット素子に置き換えたものである。構成としては物質中の核スピン又は電子スピンの状態を表すキュービットを複数含んだ量子系からなり、量子系には、入力スピン、複数のノードスピン、及び測定スピンが含まれる量子レザバーと、第2電磁場を照射することにより測定スピンとノードスピンの間のスピン間相互作用を制御し、入力スピンを通じて信号を入力する信号入力部と、ノードスピン間のスピン間相互作用により量子系を時間発展させる時間発展制御部と、第1電磁場の照射を維持して第2電磁場の照射を停止することにより、入力スピンと他のスピンの間のスピン間相互作用を制御した状態にて、測定スピンとノードスピンの間のスピン間相互作用を復活させ、測定スピンを通じて信号を読み出す信号読出部とを備えることを特徴とするものである。</p>
2	<p>出願番号：特願 2018-032118 出願日：2018/02/26 国際出願番号：PCT/JP2019/006456 国際出願日：2019/02/21 国際公開番号：W0/2019/163866 発明の名称：量子回路学習装置、量子回路学習方法、コンピュータプログラム、 および記録媒体 発明者：藤井啓祐、根来誠、北川勝浩、御手洗洗祐 出願人：京都大学、大阪大学</p> <p>概要：本発明は従来の計算機システムでは取り扱いが困難なビッグデータを取り扱うため、量子力学に基づいた量子情報処理システムに関するものであり、量子回路における回路パラメータを調整することができる。情報処理タスクへの応用が可能な量子回路学習装置、量子回路学習方法、コンピュータプログラム、及び記録媒体を提供するため、複数の量子ビットを備える量子回路に対して入力信号を与える信号入力部と、前記量子回路が備える量子ビットの状態を観測し、観測した状態に基づく出力信号を取得する信号取得部と、該信号取得部が取得した出力信号と、該出力信号に対する教師信号とに基づいて設定されるコスト関数を用いて、前記量子回路の回路構成を規定する回路パラメータを調整する調整部とを備えることを特徴とするものである。</p>
根来誠（第一期生）	
1	<p>出願番号：特願 2017-160289 出願日：2017/08/23 国際出願番号：PCT/JP2018/030871 国際出願日：2018/08/21 国際公開番号：W0/2019/039477 発明の名称：原子核スピンの高偏極化方法及び高偏極化装置 発明者：根来誠、北川勝浩、香川晃徳 出願人：大阪大学</p> <p>概要：本発明は、原子核スピンを高度に偏極させるための方法及び装置、特にトリプレットDNPを利用した原子核スピンの高偏極化方法及び高偏極化装置に関するものである。原子核スピンの高偏極化方法として、一様な静磁場が形成された空間に配置された試料に、光を照射する光照射ステップと、光照射ステップに続き、試料に掃引磁場を印加中に、試料にマイクロ波を照射するマイクロ波照射ステップとを含み、試料は、固体の安息香酸誘導体にペンタセン誘導体が添加された試料であり、光照射ス</p>

	<p>トップ及びマイクロ波照射ステップを繰返した後、試料中の安息香酸誘導体を溶解させて溶液を生成する溶解ステップを含むことを特徴とする。</p>
2	<p>出願番号：特願 2018-082859 出願日：2018/04/24 国際出願番号：PCT/JP2018/037504 国際出願日：2018/10/09 国際公開番号：W0/2019/207815 発明の名称：量子符号化による磁気共鳴高感度化法 発明者：根来誠、北川勝浩、香川晃徳、一条直規、森田靖、村田剛志、中村祐士 出願人：大阪大学</p> <p>概要：本発明はNMR測定を検出感度を向上させるため、複数の核スピンを有する分子を含む高偏極化液体を測定対象とした磁気共鳴高感度化法に関するものである。分子を一樣な外部磁場中に配置した状態で、複数の核スピンを環境に敏感なエンタングル状態にするステップと、エンタングル状態の複数の核スピンのセンシングを行なうステップと、センシングが実行された複数の核スピンを、エンタングル状態にするステップの逆過程に対応する操作により復号化するステップと、スピン増幅を実行するステップとを含むことを特徴とする。</p>
相川清隆（第一期生）	
1	<p>出願番号：特願 2017-028232 出願日：2017/02/17 公開番号：特開 2018-132500 公開日：2018/08/23 発明の名称：微小粒子を用いる加速度計 発明者：相川清隆 出願人：東京工業大学</p> <p>概要：本発明は微小粒子を用いて高感度に加速度を計測することを目的とし、構成として光源部、光学系、真空チャンバ、光検出部、加速度算出部からなる。光源部は右回りの光渦と左回りの光渦を合成しトラップされる微小粒子に与える軌道角運動量がゼロとなるように生成されるドーナツ型分布レーザー光を出力する。光学系は光源部からのドーナツ型分布レーザー光を集光し微小粒子を焦点にトラップするためのものであり、真空チャンバは微小粒子がトラップされる焦点を真空状態とし、光検出部はドーナツ型分布レーザー光にトラップされる微小粒子の振動周波数を検出する。加速度算出部は光検出部により検出される微小粒子の振動周波数から微小粒子に作用する加速度を算出することを特徴とする。</p>
野口篤史（第一期生）	
1	<p>出願番号：特願 2019-148136 出願日：2019/08/09 国際出願番号：PCT/JP2018/008489 国際出願日：2020/02/28 国際公開番号：W0/2020/029095 発明の名称：量子ゲート装置 発明者：野口篤史、中村泰信 出願人：科学技術振興機構</p> <p>概要：本発明は量子コンピュータの構成要素である量子ゲート装置に関するものであり、量子力学的に離散化された多数の状態から2つの状態を選択的に取るため、量子ゲート装置は、第1共振周波数で共振する第1超伝導回路と第2共振周波数で共振する第2超伝導回路、および接続部とを備える。第1超伝導回路は、1個の第1ジョセフソン素子、第2ジョセフソン素子群、第1キャパシターとを備える。第2ジョセフソン素子群は、n個のジョセフソン素子を超伝導体から成る配線で直列に接続したものであって、該n個のジョセフソン素子の各々が有するジョセフソンエネルギーは第</p>

	1 ジョセフソン素子の n 倍よりも大きい。第1配線は、第1ジョセフソン素子と第2ジョセフソン素子群を環状に接続することにより部分超伝導回路を形成し、さらに部分超伝導回路と第1キャパシタを並列に接続している。量子ゲート装置はさらに、部分超伝導回路内に静磁界を印加する磁界印加部と、第1共振周波数と第2共振周波数の差である差周波数を有する電磁波を第1超伝導回路及び／又は第2超伝導回路に照射する電磁波照射部（第1電磁波照射部）であることを特徴とする。
堀切智之（第二期生）	
1	出願番号：特願 2018-153107 出願日：2018/08/16 公開番号：特開 2020-28076 公開日：2020/02/20 発明の名称：通信ノード、及び量子通信システム 発明者：堀切智之、吉田大輔、新関和哉、田村秀平 出願人：横浜国立大学 概要：本発明は、量子通信における量子もつれ共有レートを高くするためのものである。通信ノードは互いに量子相関をもつ1対のもつれ光子のうち的一方のもつれ光子を、当該もつれ光子を吸収することなく検出する非破壊光子検出器と、非破壊光子検出器により検出されたもつれ光子を吸収することにより、もつれ光子の量子状態を保存する吸収型メモリとを備えることを特徴とする。
今田裕（第三期生）	
1	出願番号：特願 2021-149636 出願日：2021/09/14 発明の名称：走査型トンネル顕微鏡及び方法 発明者：今田裕 出願人：科学技術振興機構 概要：公開前にて非公開

7. 総合所見

平成 28 年度 (2016 年度) に発足した本研究領域は、文科省戦略的基礎研究の戦略目標「量子状態の高度制御による新たな物性・情報科学フロンティアの開拓」に基づく。我が国の物理学者（湯川秀樹、朝永振一郎ら）は、20 世紀初頭の量子物理学黎明期から本領域の発展をリードし、20 世紀後半からの量子力学の基本原則が計算や通信といった情報処理に活用できるという新基軸（量子情報処理）においても、量子アニーリング法の発明（西森秀俊ら）や世界初の固体量子ビット実現（中村泰信ら）などで世界の最先端を切り拓いてきた。そして 2010 年以降、西森らの発明に基づきカナダ・D-Wave 社が量子アニーラーの製品化に成功し、中村らの発明に基づき IBM や Google などが超伝導量子コンピュータを実用化した。量子通信や量子暗号といったその他の量子情報処理技術も加速するなかで上記の戦略目標が設定され、2016 年度に兄貴分の CREST「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」と共に本さきがけ領域「量子の状態制御と機能化」が発足した。チーム研究である CREST では技術基盤の創出が目標であるが、個人研究である本さきがけでは、次の西森秀俊

や中村泰信の発掘と育成を目指した。採用時の研究者の平均年齢は30代半ばであることから、さきがけ研究の3年間でホップ、ステップ、ジャンプの「ステップ」を体現し、さきがけ終了後の7年ほどで「ジャンプ」を果たしてもらおう。さきがけ研究開始から10年後の平均年齢が40代半ばであるから、その頃からは、自らが創出した世界的な新潮流を、基礎と応用（実用化）の両面でそれぞれの研究者が一気に花開かせるというのが本さきがけ領域の目標である。

研究領域マネジメントという観点から最も重要なのが、領域発足時に研究総括が作成する「募集・選考・研究領域運営にあたっての研究総括の方針」である。よって研究総括に内定した時点からJST担当部署との意思疎通を図りながら方針の草稿を練りあげ、領域アドバイザーのリクルーティングに用いた。結果として本さきがけ領域の目標と考え方に共感し、幅広い専門領域と研究者育成の考え方を有するアドバイザーが集まるベストチームが結成できたと自負する。研究者選考においても「研究総括の方針」の記述に沿わない応募はアドバイザーによる書類審査に回す以前に研究総括が却下し、その結果と理由を領域アドバイザーの理解を得たうえで、応募者にフィードバックした。これにより二期生以降「研究総括の方針」に沿わない応募が大幅に減少した。アドバイザーによる書類・面接審査においても「研究総括の方針」が徹底され、その結果として多彩なプロジェクトと個性の研究者を採用することができた。原子分子、超伝導、半導体、強相関係、光、液体ヘリウム、ハイブリッド系といった多岐にわたる実験家と、量子計算や量子通信に加えて古典計算機との比較をも実施する様々な理論家を採用し、特段の配慮を一切せず女性や海外からの応募者も採用できた。年2回の領域会議ではすべての研究者が進捗を報告し、その内容が常に世界レベルを目指した挑戦的かつ発展的な内容であることを「研究総括の方針」に沿って求めた。研究総括とアドバイザーは領域会議中にそれぞれの研究内容を徹底的に議論し、領域会議末にすべての研究者に対して「研究総括の方針」に照らしあわせたコメントをフィードバックし場合によっては叱咤激励してきた。領域会議では研究者同士が交流する時間を十分に作り、文字通り寝食をともにすることで、いつでも気軽につながって議論する環境を整えた。さらに各研究会終了後に、研究総括が各研究者へのフィードバックを書面で行い、次の研究会や長期的な目標に向けた領域アドバイザー会議の結果を伝えてきた。この積み重ねによってコロナ禍においてもオンラインで円滑なマネジメントが達成できたと考える。

領域としての戦略目標の達成状況であるが、概要に関してはすでに本文中に記したとおり、ほぼすべての研究者が上記のホップ、ステップ、ジャンプにおける「ステップ」は達成したと考える。さきがけとして求められる、次なる発展に向けた基盤作りは、各研究者が達成した。ただこれが次の7年間で「ジャンプ」につながるかは研究者たちの志の高さと意欲次第である。さきがけ領域としての真の達成状況は今から10年後ごろに明らかになると考える。

本研究領域を設定したことは極めて妥当であった。2016年の発足時はIBMもGoogleも量子コンピュータをシステムとして発表していなかった。それが今では、誰もがクラウド上で

量子コンピュータが利用できるようになってきている。このような急激な変化を遂げる数年間において、量子情報分野のさきがけ領域が運営できたことは極めてタイムリーであった。研究者同士のあいさつは常に「あのニュース聞いた？」という世界の発展と自らの研究の位置づけに関する議論であった。そして、本さきがけ領域発足の翌年度（平成 29 年度）には「量子技術を適用した生命科学基盤の創出」、3 年後（令和元年度）には「革新的な量子情報処理技術基盤の創出」という二つの量子情報処理に関するさきがけ研究領域が発足した。まさに、「さきがけ量子情報領域におけるさきがけ」と位置づけられる本研究領域が基盤となり、その成果によって次の二つのさきがけ領域が設定されていることは明らかであり、本さきがけ領域の領域アドバイザーや研究者が続く二つのさきがけに領域アドバイザーとして参加するなど運営方法も含めた寄与を果たしてきた。我が国がリーダーシップを取り続けてきた量子物理学と量子情報処理という観点から、我が国における「さきがけレベル」の個人研究者が、本さきがけ領域とそれに続く二つのさきがけ領域で成長していることは、今後予想されるスパコン+AI+量子コンピュータの組み合わせによる計算機の最先端と、Beyond5G と量子通信の組み合わせにより通信技術の最先端の発展に大きく寄与するものと期待される。

科学技術イノベーション創出に向けた、今後への期待、展望、課題は明確である。これまで半導体トランジスタの微細化（ムーアの法則）によって得られてきたコンピュータの高速化と省エネ化は限界を迎えており、これからは微細加工以外の手法を取り入れながら計算機の性能を上げる時代となる。そのときに重要となるのが、古典計算機（スパコンや AI）と量子計算機を上手に組み合わせるハイブリッド技術である。この方向性は基礎研究と産業応用の両面においてプロジェクトの宝庫である。新奇な材料で新しい量子現象を見出し、それを計算に応用するといった様々な発展が期待できる。通信に関しても古典と量子の融合が不可欠である。それを支えるのが本さきがけ領域の研究者であって欲しい。課題は量子状態の完全制御である。量子を用いるのであれば、少なくとも計算や通信に耐えうるレベルでの制御を獲得することが必要である。これを仮に完全制御と呼ぶとすれば、そのために解明しなければならない量子物理学の基礎研究は山積している。この課題に果敢に挑むのも本さきがけ研究者たちであってほしい。

最後に所感にかえて感謝を述べる。本さきがけ領域の運営にあたり JST の皆さんは最高の仕事仲間であった。特に領域担当の中田 希衣さん、瀧澤 浩史さん、土屋 朋信さんに心から感謝している。そして間接的ではあれ常に応援をしてくださった文部科学省科学技術・学術政策局研究開発基盤課 量子研究推進室の皆さんにも感謝の意を表したい。

以上