

研究領域事後評価

さきがけ

「量子の状態制御と機能化」

研究総括

伊藤 公平 慶應義塾長

2022年3月3日



科学技術振興機構

目次

1. 研究領域の概要
2. 研究総括のねらい
3. 研究課題の選考
4. 領域アドバイザー
5. 研究領域の運営
6. 研究成果
7. 総合所見

1. 研究領域の概要

背景

- 量子力学の発見により、量子光学、固体のバンド理論などが進化し、レーザー・トランジスター・LEDなどが開発された。
- エレクトロニクスとナノテクノロジーの発展により、単一量子をコヒーレントに操作・制御し、その機能化によって従来技術の不可能を可能にし得る計算・通信・計測・標準・省エネ技術開発が注目されている。
- 基礎研究のフェーズは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に発展しつつある。

1. 研究領域の概要

背景

戦略目標に係る分野俯瞰図(2016年)

【達成目標①関連技術】

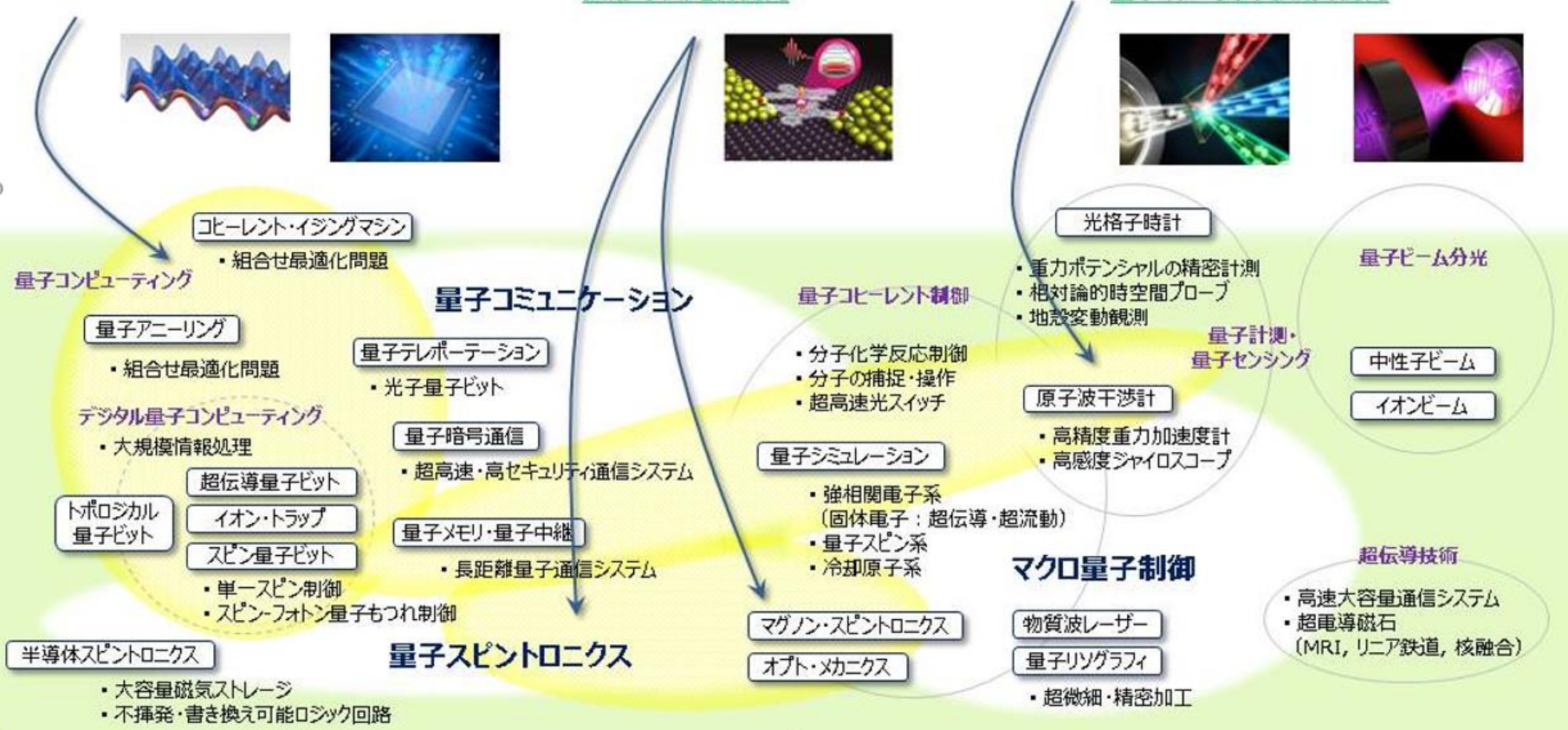
量子コヒーレント制御による量子シミュレーション・量子コミュニケーション要素技術の開発

【達成目標②関連技術】

量子スピントロニクスやオプトメカニクスなど多彩な物理・工学系をつなぐ基盤的な量子技術・システムの開発

【達成目標③関連技術】

先端量子光学やマクロ量子制御技術の応用による超感度・高精度な量子センシング・量子イメージング技術の開発



1. 研究領域の概要

本研究領域の位置付け

- 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推進。
- 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、新技術の創成に大きく寄与。
- 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、省エネ技術などに発展することを目指す。

1. 研究領域の概要

本研究領域の位置付け

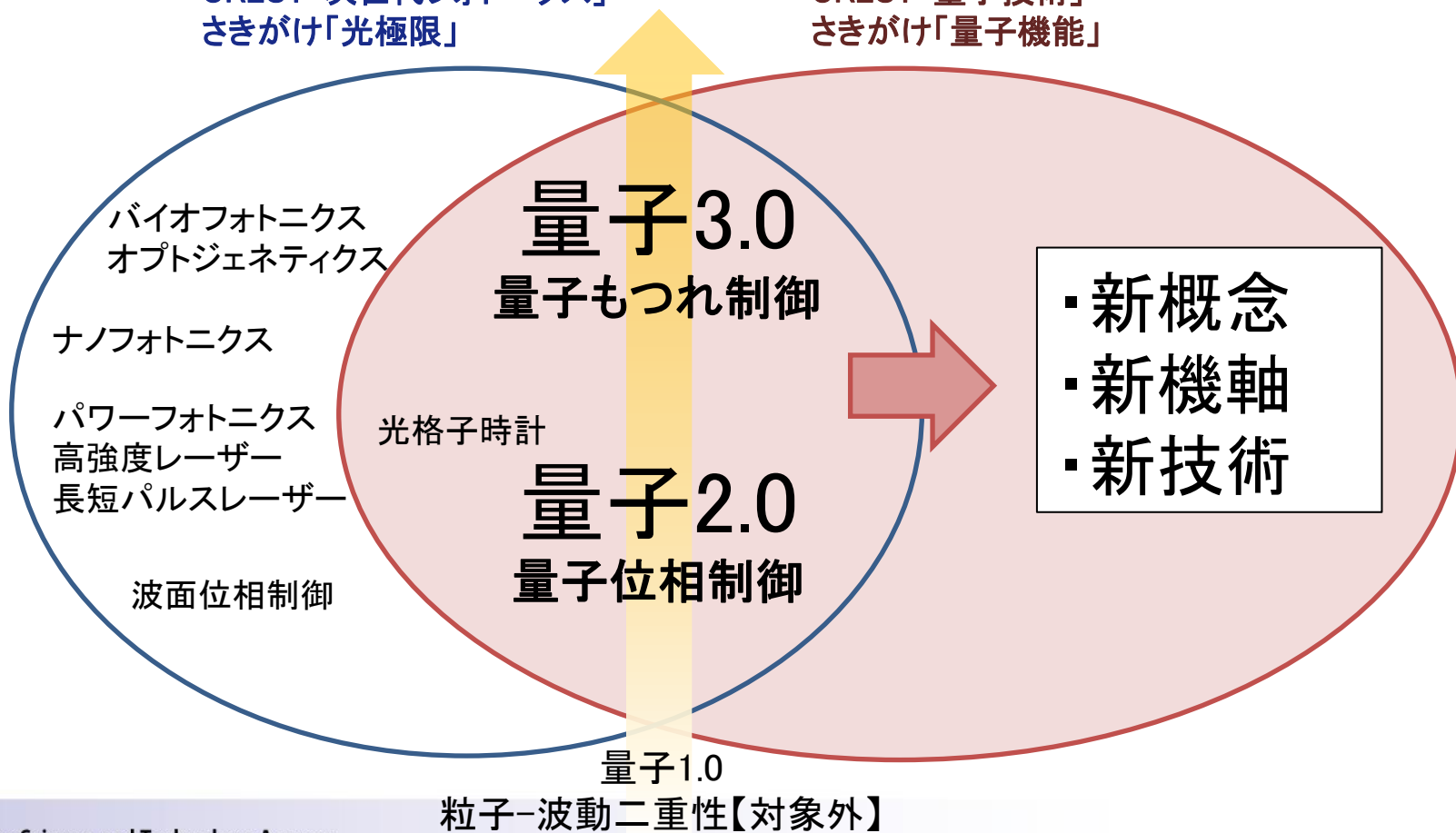


連携



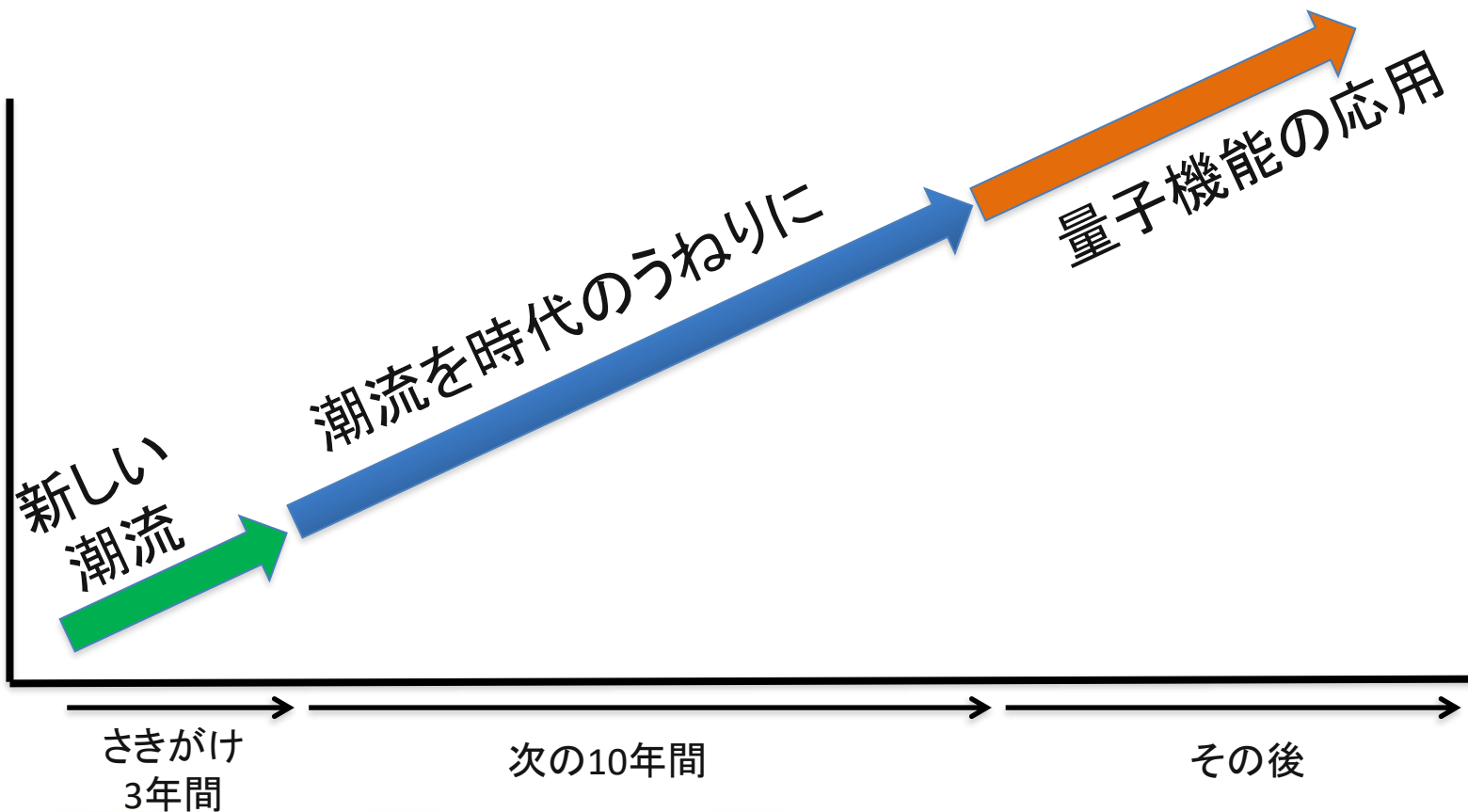
CREST「次世代フォトニクス」
さががけ「光極限」

CREST「量子技術」
さががけ「量子機能」



2. 研究総括のねらい 募集・選考の方針（1）

量子状態制御の新しい潮流を生み出す提案を募集します。



2. 研究総括のねらい 募集・選考の方針（2）

- 研究に対するアプローチは自由。
- 個人の実力を活かした独創的なアイデア、実行力、発展性を重視。
- ✓ ただ、グラウ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ある。グラウンドデザインが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共同研究も対象とする。ただし、さきがけからの支援は提案者個人のみ。
- ✓ 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、過去の「さきがけ研究者」には「さきがけ」ではなくさらに先に進んでいただきたいと願っています。

3. 研究課題の選考

求める研究提案

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ます。

- 以下に示す研究例は、何らかのレベルで世界のトップがすでに着手しているものが多い。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ください。

3. 研究課題の選考

具体的な研究の例（1）

1. 高いパラメータ制御性を有する量子多体系を用いて、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・素子など
2. 超高効率・超高感度量子機能素子の開発に関する研究。
 - ✓ 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
 - ✓ 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

3. 研究課題の選考 具体的な研究の例（2）

3. 量子情報科学の知見を用いて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、その理論を検証する実験研究。
 - ✓ 微小系の熱力学、非平衡統計力学など
 - ✓ 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
4. 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。
 - ✓ 散逸系での量子状態制御、量子情報処理手法
 - ✓ 個別の量子ビットの測定が不要な誤り訂正手法
5. 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。
 - ✓ 植物の光合成、鳥類のもつ磁気コンパス、酵素反応など

3. 研究課題の選考 具体的な研究の例（3）

6. 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。
7. 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。
 - ✓ 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。

これらは、例に過ぎません。知恵を絞った、独創的で、科学的に胸が踊る提案を募集します。

3. 研究課題の選考

対象外とする研究提案

- 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、
課題の対象としません。
- 過去のさきがけ研究者は対象としません。

3. 研究課題の選考

選考結果

176名の応募者に対して、28名の選考で、約6.3倍の競争率であった。

原子光学:4名、分子磁気共鳴・顕微鏡:2名、超伝導:4名、半導体:4名、光子:2名、液体ヘリウム:1名、新規材料:2名、量子通信:1名、理論(物理学):6名、理論(計算科学):1名

採択年度	応募件数	書類選考採択件数	面接選考採択件数	倍率
2016年度	65	18	10	6.5
2017年度	61	16	10	6.1
2018年度	50	15	8	6.3
合計	176	49	28	6.3

3. 研究課題の選考

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		「量子誤り耐性」 藤井	
	「ファイバー」 加藤		「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		
超伝導	「シリコン導波路」 小野		
	「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		「量子機能界面」 桐谷	「冷却原子」 中島
	「酸化亜鉛」 小塚		
	「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	

物理系

情報・数学系

化学系

材料系

4. 領域アドバイザー

発足時

■ 企業 ■ 女性

氏名	所属 役職(発足時)	専門分野
荒川 泰彦	東京大学 生産技術研究所 教授	電子工学, ナノデバイス (CREST量子技術の総括)
小川 哲生	大阪大学 理事・副学長	理論物理学, 非平衡量子統計力学, 量子光学
上妻 幹旺	東京工業大学 大学院理工学研究科 教授	量子エレクトロニクス, 量子光学
小林 研介	大阪大学 大学院理学研究科 教授	量子物性
高橋 義朗	京都大学 大学院理学研究科 教授	原子物理学, 量子光学, レーザー冷却
谷 誠一郎	NTTコミュニケーション科学基礎研究所 上席特別研究員	量子アルゴリズム, 量子計算量理論
中村 泰信	東京大学 先端科学技術研究センター 教授	量子情報科学, 超伝導
西森 秀稔	東京工業大学 大学院理工学研究科 教授 (~H30.8)	統計力学, 量子力学
橋本 秀樹	関西学院大学 理工学部 教授	光合成, 人工光合成, 光科学
藤原 聡	NTT物性科学基礎研究所 上席特別研究員	半導体物性, ナノデバイス
古川 はづき	お茶の水女子大学 基幹研究院 教授	物性実験・低温(超伝導・強相関電子系)
萬 伸一	日本電気株式会社 スマートエネルギー研究所 所長代理	超伝導, 量子デバイス, 量子情報

5. 研究領域の運営

- 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。
- 本領域の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調的に進める環境を整えることに努めた。
- 量子科学とその応用について、将来、世界レベルでリードできる若手研究者の輩出を目指した。

5. 研究領域の運営

領域会議

- ・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、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。
- ・さきがけ研究者の今後の成長に向けて、アドバイザーによる特別講演も設けた。
- ・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。

5. 研究領域の運営

領域会議

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研究」のバランス 橋本AD講演「CUDOSとPLACE」	1期生
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	レクターレ湯河原	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

5. 研究領域の運営

情報発信

■国際強化

川上、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(仏)に参加し、欧州の研究者達と有意義な意見交換を実施。さらに、川上研究者は会議後にサクレ原子力センターを訪問し、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、Rybalko博士を招聘し、共振器の精度向上を図った。

■JST新技術説明会

山下研究者(1期生)、2019/1/18

「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。

■他学会との自主的な連携

「量子情報春の学校2021」(主催:京都大学研究連携基盤 量子情報ユニット)について、領域行事ではないが、中島研究者(2期生)が中心となって2021年3月にオンライン形式で開催した。領域内の根来・野口・藤井(1期生)、武田・中島・森前(2期生)、東・中田(3期生)が講演者・メンターとなり幅広い講義が行なわれ、400名以上の参加登録(学部生:約250人、大学院生:約180人)があった。

6. 研究成果

論文・発表・特許

	論文			特許			口頭発表		
	合計	国内	国際	合計	国内	国際	合計	国内	国際
2016年度採択課題	76	0	76	11	6	5	281 (153)	194 (110)	87 (43)
2017年度採択課題	49	0	49	1	1	0	171 (76)	98 (47)	73 (29)
2018年度採択課題	33	1	32	1	1	0	112 (41)	70 (22)	42 (19)
合計	157	1	156	13	8	5	564 (270)	362 (179)	202 (91)

(招待講演数は括弧で口頭発表数の内数として記載)
(1-2期生での共著が1件あり)

◆ 国際学術誌: 156報

※Nature系: 20報、 Science系: 5報、 Phys. Rev. Lett.: 10報

領域内の共著論文数: 4報、共著出願数: 4件

※ Nature, Nature com, " Physics, " Photonics, " Nanotechnology, npj Quantum Information Science, Science advances

6. 研究成果

受賞(国内:30件, 国際:4件)

賞の名称	授与者名	受賞者名(受賞年)
若手科学者賞	文部科学大臣	相川清隆、山下太郎(2017)、 小塚裕介、橋坂昌幸(2018)、 桐谷乃輔、野口篤史、 太田泰友(2019)、 武田俊太郎(2020)、 今田裕(2021)
IOP Quantum Science and Technology Outstanding Reviewers of 2017	IOP science	山本直樹
Innovators Under 35 Japan 2021	MITテクノロジーレビュー (日本)	武田俊太郎
超伝導科学技術賞	超伝導科学技術研究会	山下太郎(2017) 猪股 邦宏(2018)
Top Peer Reviewer 2019 (Web of Science Group)	Web of Science Group	馬場基彰
大川出版賞	大川情報通信基金	森前智行
日本表面真空学会会誌賞	日本表面真空学会	今田裕
The Young Scientist Award	The International Symposium on Compound Semiconductors	太田泰友

6. 研究成果 人材:28名のうち半数以上22名が昇任

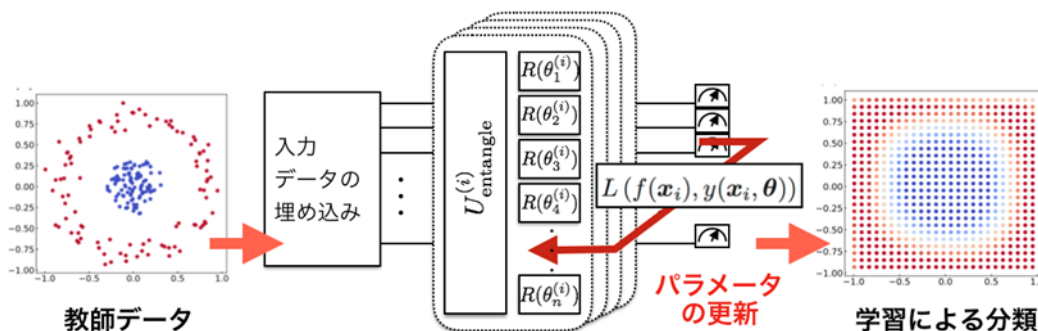
キャリアアップ状況	人数	研究者名
助教→准教授→教授	1名	藤井 啓祐
准教授→教授	1名	山本 直樹
助教→准教授	3名	田中 宗、武田 俊太郎、桐谷 乃輔(終了直後)
主任研究員→准教授	1名	山下 太郎
特任助教／特任准教授→准教授	2名	野口 篤史／太田 泰友
助教→特任准教授	1名	根来 誠
博士研究員→チームリーダー	1名	川上 恵里加
特定助教／招へい教員→特定准教授	2名	中島 秀太／馬場 基彰
講師→独立研究者	1名	小塚 裕介
主任研究員→特別研究員	1名	東 浩司
助教→主任研究員	1名	橋坂 昌幸
研究員→上級研究員／専任研究員	2名	今田 裕／山口 敦史

- ・藤井、根来研究者がさががけ「革新的な量子情報処理技術基盤の創出」の領域アドバイザー
- ・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

6. 研究成果

量子情報理論1

藤井 啓祐



NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum computer) 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、量子回路学習を実現。

森前 智行



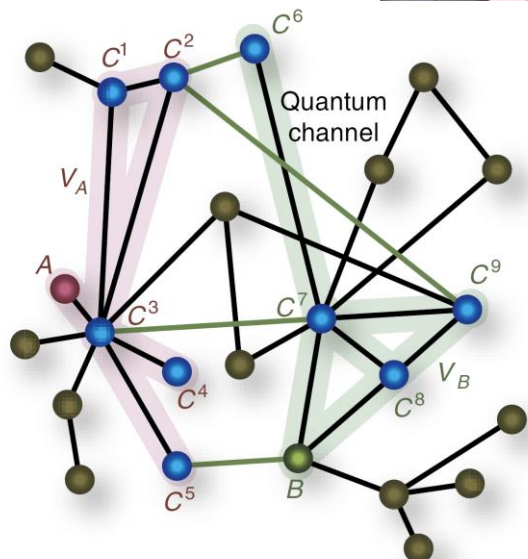
(1) Fine-grained量子超越性、(2) 量子計算の検証プロトコル。

(1) 従来の量子シミュレータ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、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。
(2) 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。

6. 研究成果

量子情報理論2

東 浩司



量子インターネットの模式図

量子ネットワークの量子・秘匿通信容量の上界や下界の迅速な算出、今後のP2Pの通信限界を凌駕する量子鍵配送の実現に向けた理論を構築。

中田 芳史



具体的な研究内容・達成成果

《研究課題 1》
コア量子技術としての量子疑似ランダムネスの理論発展

《研究課題 2-1》
量子実験系におけるノイズ推定手法の高性能化

《研究課題 2-2》
量子通信プロトコルの拡張と基礎物理への応用

世界をリードする
量子情報技術の創出と
純粋科学の新展開

将来の量子新技術の提案・理論物理の新展開。
2021年度科研費学術変革研究(A)の参画

量子技術開発に直ちに使える新技術開発を通じて、
今後の量子実験技術開発の加速へ貢献。

多分野横断型の研究テーマを開拓し、
数学・物理・情報の叡智を集結した量子技術開発へ。
今後の国際連携研究への発展が期待される

研究成果のインパクトと今後の展開

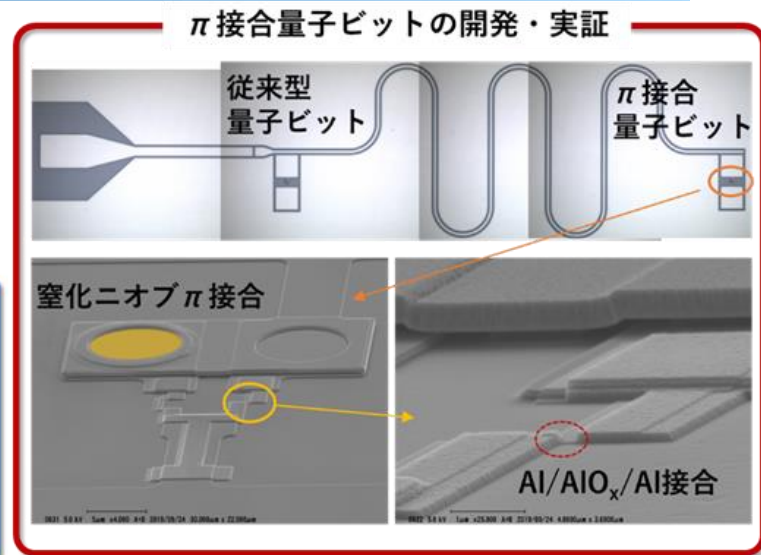
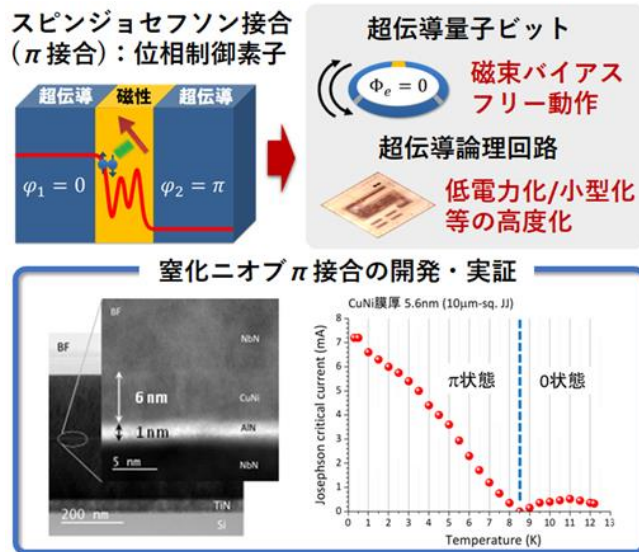
6. 研究成果

新規超伝導量子回路

山下 太郎



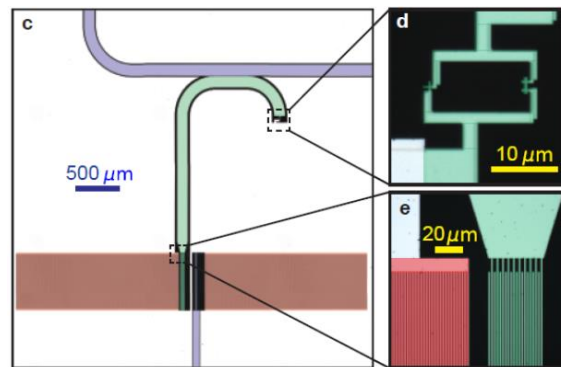
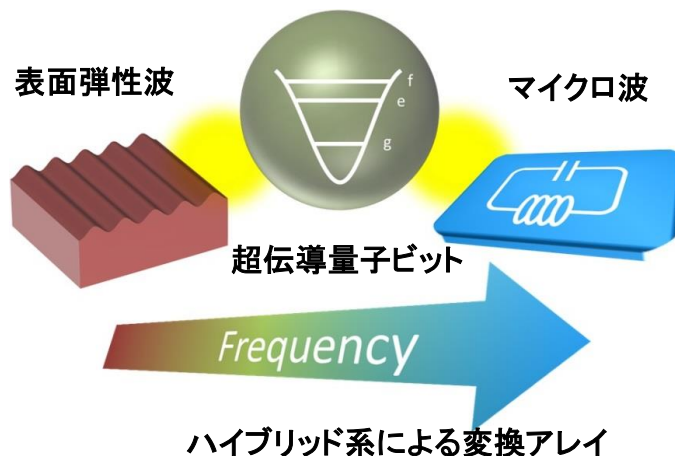
超伝導/磁性ハイブリッドであるスピントジョセフソン接合の実現と位相制御素子への展開。



野口 篤史



表面弾性波と超伝導量子回路とのハイブリッド量子系を実現。



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

6. 研究成果

ヘリウム表面上の電子と 光量子コンピュータ

川上 恵里加



武田 俊太郎



ヘリウム表面上の電子を将来的な量子ビットとして、Image-charge detectionにより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。

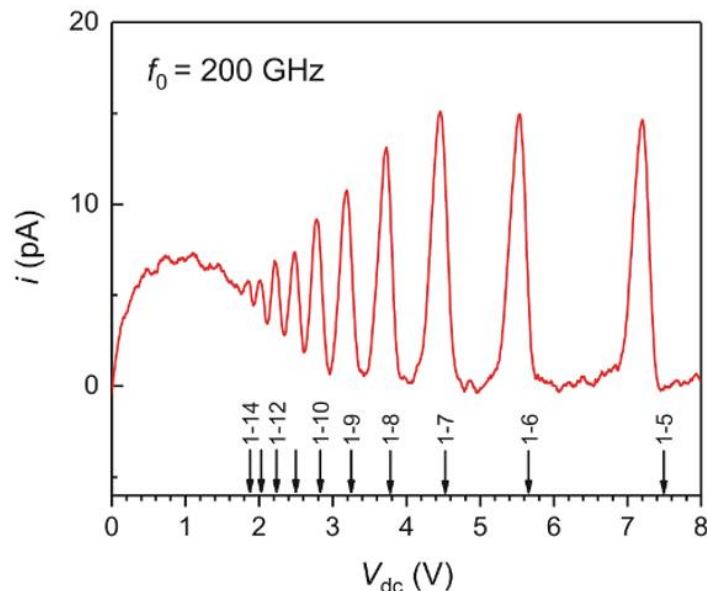
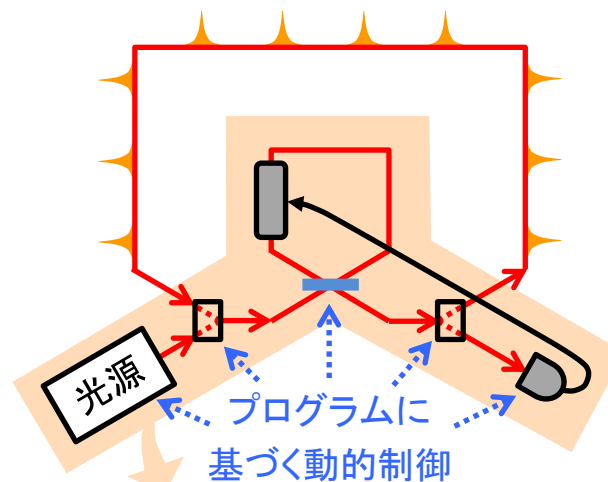


Image-charge detectionによる電流値

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

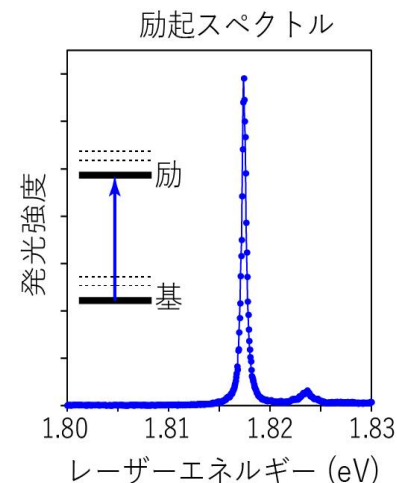
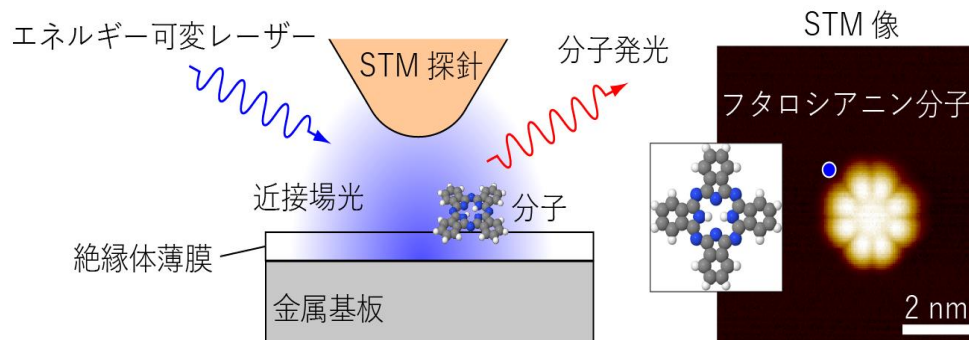


本方式の**心臓部**となる**プロセッサ**を開発
⇒拡張性・汎用性を兼ね備えた**世界的にもユニーク**な光量子回路の動作を実証。

6. 研究成果

計測技術

今田 裕

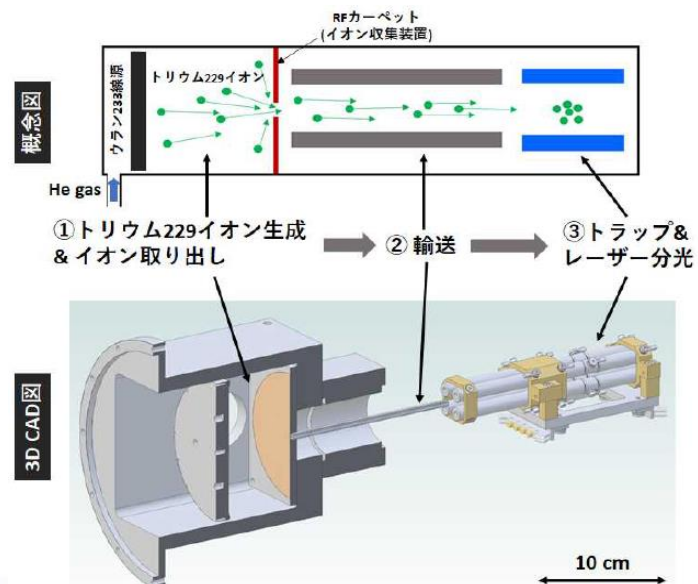


レーザー励起された単一分子の電子励起状態を発光やSTMのトンネル電流で検出し、マイクロeVのエネルギー分解能とナノスケールの空間分解能を実現した。

山口 敦史



世界一高精度な時計を目指して、トリウムの同位体Th-229原子核内のエネルギー準位と遷移を詳細に解明し、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た。



6. 研究成果

さががけ終了後の研究費の獲得状況

種別	研究期間	場所	人数	配布額(k¥)
創発的研究支援事業	2020～2022年度	川上恵里加、小塚裕介、森前智行(2期生)	6名	20,000 (最大)
	2021～2023年度	桐谷乃輔(1期生)、太田泰友、森立平(3期生)		
学術変革領域研究(A)	2020～2024年度	今田裕(3期生)	2名	186,290
	2021～2025年度	森前智行(2期生)		78,260
基盤研究(S)	2019～2023年度	山下太郎(1期生)	1名	203,580
基盤研究(A)	2019～2022年度	山下太郎(1期生)	2名	45,760
	2021～2024年度	今田裕(3期生)		43,680
基盤研究(B)	2019～2021年度	相川清隆(1期生)、小塚裕介(2期生)	9名	17,160 ～18,330
	2019～2022年度	野口篤史(1期生)		
	2020～2022年度	武田俊太郎、堀切智之(2期生)		
	2020～2023年度	桐谷乃輔(1期生)、中島秀太(2期生)、森立平(3期生)		
	2021～2024年度	素川靖司(1期生)、		
Q-LEAP 基礎基盤研究	2018～2027年度	藤井啓祐、山本直樹(1期生)	2名	200,000 ～600,000
Q-LEAP Flagship PJ	2020～2029年度	藤井啓祐(1期生)	1名	3,500,000

6. 研究成果

さきがけ研究者の関与したベンチャー

株式会社: QunaSys Inc

2018年2月に設立、CEO: 楊 天任

事業内容: 量子コンピュータ向けのアルゴリズムとアプリケーションを開発。

QunaSysのアドバイザーである藤井 啓祐、根来 誠(1期生)らが設立時から関与

<https://qunasys.com/about/team>

キュエル株式会社(英語名: QuEL, Inc.)

2021年7月に設立、創業者: 北川勝浩(大阪大学 教授)

事業内容: 量子コンピューターの制御装置・ミドルウェアの開発、製造、販売。

取締役CSOとして根来 誠(1期生)が参画

<https://quel-inc.com/ja/members-2/>

7. 総合所見

領域の成果件数

1. **176人**(3年間3期)の応募があり、領域アドバイザーの協力を得て、「量子機能」領域として幅広い分野から新進気鋭の28人を採択することができた。
2. 研究成果として、総論文数:**157報**(Nature系:20報、Science系:5報、Phys. Rev. Lett.:10報)への論文掲載、特許件数:**13件**(国際特許:5件)、招待講演件数:**270件**(国際会議の招待講演:91件)であった。
3. 研究者の育成では、半数以上の**22名**が昇任し、国内の表彰では**9名**が文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞し、国際会議等では**4件**の受賞があった。
4. JST新技術説明会での発表1件、国際強化として量子技術WS(仏)への参加者:**2名**、海外招聘者:**2名**であった。
5. さきがけ研究終了後の新たな研究費(代表者のみ、1千万円以上)の獲得状況として、創発的研究支援事業が6名、学術変革領域研究(A)が2名、基盤研究(S)が1名、基盤研究(A)が2名、基盤研究(B)が9名、Q-LEAPの基礎基盤研究が2名、Flagshipプロジェクトが1名であった。

本さきがけ領域を通して多くの研究者が育った。

7. 総合所見

- ・さきがけ研究の3年間で、ほぼすべての研究者がホップ・ステップ・ジャンプにおける「ステップ」を達成したと考えられる。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られる。
- ・2016年の領域発足時にはIBMや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が、今では誰もがクラウド上で量子コンピュータを利用できるようになっている。本領域を足掛りに翌年には「量子生命」、3年後には「量子情報処理」のさきがけ領域が発足し、大型の国PJも立ち上がった。このような時期に本領域を発足し運営できたいことは極めてタイムリーであり、本領域の研究者が次の領域や国PJのアドバイザー、研究代表者として参画するなど本領域の寄与は大きい。
- ・今後の科学技術の発展に向けて、スパコン+AI+量子コンピュータの組み合わせや古典通信+量子通信の組み合わせなどが予想されるが、そのためには実用に耐える量子状態の制御が必須であり、解明しなければならない課題は山積している。これらの課題に果敢に挑み、新たな量子機能を開拓して行くのが、本さきがけの研究者であってほしい。