

戦略的創造研究推進事業
—CREST(チーム型研究)—

研究領域

「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」

研究領域中間評価用資料

研究総括: 荒川 泰彦

2021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	6
(3) 研究総括	6
(4) 採択研究課題・研究費.....	7
2. 研究総括のねらい.....	9
3. 研究課題の選考について.....	10
4. 領域アドバイザーについて.....	14
5. 研究領域のマネジメントについて.....	15
6. 研究領域としての戦略目標の達成に向けた状況について.....	25
7. 総合所見	43

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」

① 概要

半導体やレーザーなど、量子論を応用した科学技術の進展はこれまでも産業や社会に大きなインパクトを与えてきたが、1990年代以降、量子情報処理を可能とする物理素子が開発され、先端レーザー等による量子状態の制御技術も磨かれてきた中で、量子論を包括的かつ高度に応用しつつ産業応用までを視野に入れた新たな技術体系の発展の兆しが見られるようになった。近年、欧米政府や世界的企業が量子科学技術への投資を拡大している中、我が国においても、最先端の量子研究に光科学技術、物性物理、ナノテクノロジー等の強みを糾合させ、中長期的な視座から量子科学のフロンティア開拓を先導するとともに、超スマート社会の実現に向け、新たな産業や技術基盤の創出の核となるコア量子技術を世界に先駆けて生み出していくことが重要である。

このため、本戦略目標では、技術的フィージビリティや国際優位性、先進性等の観点を総合的に勘案した上で研究領域・方向性を特定し、その研究開発を重点的に進めることにより、新たな量子物性の開拓や量子情報システムの開発等を通じて幅広いイノベーションの源泉（新技術シーズ）を生み出すとともに、今後大きく変革する社会像の基盤となる量子技術・システム実装を世界に先駆けて実現することを目指す。

② 達成目標

本戦略目標では、量子の孤立系から多体系、巨視的な凝縮体に至るまで、多彩な量子状態の高度制御を実現することにより、未知の物理現象や物質機能・物性の探索、新たな概念に基づく情報科学の開拓及び新技術シーズ創出を図ることを目的とする。具体的には、以下の達成を目指す。

(i) 量子情報処理・シミュレーションの高度化により、複雑な量子系の実験的な解析・描像解明に向けた基盤を構築するとともに、従来手法では不可能な大規模・省エネ情報処理に係る要素技術を実現する。

(ii) 多彩な物理・工学系をつなぐ基盤的な量子技術・システムの開発により、既存技術分野（フォトニクス、エレクトロニクス等）の発展的融合・ブレークスルーを促す。

(iii) 巨視的な量子効果や先端量子光学等の応用により、計測・解析技術を飛躍的に向上させ、従来精度・感度の限界を超えたセンシング・イメージング技術の革新につなげる。

③ 研究推進の際に見据えるべき将来の社会像

②「達成目標」に記載した事項の達成を通じ、以下に挙げるような社会の実現に貢献する。

通信秘匿性の格段の高度化やビッグデータの超高速処理、超省エネ・高速・大規模情報処理が可能となるとともに環境負荷の低減が進展した超サイバー社会、及びこれらの情報処理・通信基盤に基づき物理空間とサイバー空間とが高次に結合された超スマート社会。

環境エネルギー、安全・安心、健康・医療等の地球規模の社会的課題の解決・緩和、知識集約度の高い装置・部材・技術産業等を源泉としたグローバル・バリュー・チェーンにおける優位性の確保、人々の多様なニーズに応える新たな価値を生み出すシステムの形成等を通じて質の高い生活の実現された社会。

物質・生命理解を含めた知識体系の革新により、次々世代の価値創造や安全・安心確保のコアとなる科学基盤・技術基盤が確保された社会。

④ 具体的な研究例

(i) 超電導回路、単一スピン、半導体量子ドットなど多彩な量子ビット技術の高度化による量子コンピューティング要素技術の開発

古典的コンピュータの計算性能を凌駕する量子計算手法のデバイス実装に向けては、欧米をはじめ各国の国家プロジェクトにおいて、量子情報の最小単位である様々な量子ビット及びその制御技術の開発やそれらのポートフォリオの戦略的な開拓が進められている。本分野において、我が国の光科学技術や量子基盤技術の強みを活かした研究開発を進めることで、世界に先駆けた量子暗号通信、量子コンピューティング等の要素技術の開発及びシステム実装を加速する。例えば、長距離で秘匿性の高い広帯域通信方式を確立するためには、多数ビット間での制御ゲート動作検証に加え、十分なコヒーレント時間の確保が重要であり、その実現に向けた特色ある量子ビットの開発及び組合せや量子コヒーレント制御技術の高度化等を行う。

(ii) 多彩な量子自由度を利用した新たな光・電子制御デバイスや超高感度計測技術の開発

量子ドットにおける単一電子スピンのコヒーレント制御など、個々のスピン状態の制御技術の高度化・実用化（新機能材料開発等）や、オプト・メカニクス等の要素技術開発、極低温原子気体やイオン、固体等の多彩な量子多体系の制御技術の組合せによる量子シミュレーション技術の高度化等に向けた研究開発を進める。これにより、力学系と量子光学・スピン系との融合を実現し、既存技術では不可能な微弱な相互作用の制御や従来精度の限界を超えた精密測定など新たな量子基盤技術の獲得を目指す。あわせて、量子多体系の電磁応答に関する第一原理計算の大規模化・高度化から期待される新原理に基づく超高感度センサー等の新技術創出に向けた基礎研究を推進する。

(iii) 巨視的な量子状態の精密制御による超高精度センサー等の開発

分子やクラスター等の量子多体系における極低温状態の制御技術の高度化や、巨視的な量子波動性を利用した高精度な量子センサー等の開発を推進する。

具体的には、ボーズ・アインシュタイン凝縮（BEC）の人工的操作・制御技術の高度化によ

り最先端の原子物理や量子光学、超伝導や超流動等の量子論特有の現象に関する本質的な理解深化を促すとともに、高感度かつ高精度な BEC 原子干渉計（加速度センサー、重力勾配計、ナビゲーション）など量子波の特長を活かした計測手段の開発・利活用等に取り組む。また、従来の補償光学応用では限界のある生体等の複雑構造系に対しても、量子もつれの干渉効果を利用することにより分散の影響の極めて少ない高分解能計測が期待できるため、その実用化・高度化に向けた技術開発を進める。

⑤ 国内外の研究動向（本研究領域発足時）

（国内動向）

最先端研究開発支援プログラム（FIRST）「量子情報処理プロジェクト」（平成 21 年度～平成 25 年度）、科学研究費助成事業新学術領域研究「量子サイバネティクス」（平成 21 年度～平成 25 年度）などで、超伝導量子ビット、電子スピンを用いた量子ビット、及びこれらのハイブリッド量子系の研究が行われ、これらの成果を発展させた革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」（平成 26 年度～平成 30 年度）では脳型情報処理を量子コンピュータに取り込んだ量子人工脳の開発が進められている。

（国外動向）

英国では 2014 年から量子科学研究の 5 年プロジェクト（予算：約 2.7 億英ポンド）が始まっており、ハブとなる 4 拠点において量子コンピューティング、量子センサー等の研究開発拠点形成プロジェクトが始動するなど具体的な強化策がとられている。量子コンピューティング関係では、カナダのベンチャー企業である D-Wave 社が開発した、世界初の市販量子コンピュータとされる「D-Wave 2」を米国のグーグル社や NASA が購入（2014 年）するなど、産業界を巻き込んだ研究開発が進められている。また、D-Wave 社の採用した量子アニーリング手法に基づくアナログ量子コンピュータに加え、米国カリフォルニア大学サンタバーバラ校（UCSB）・グーグル社や欧州では超伝導素子を用いたデジタル量子コンピュータ（論理ゲート方式）の開発も活発に進められている。オランダでは、デジタル量子コンピュータに特化した研究機関「QuTech」において 10 年間の量子科学研究イニシアティブ（予算：約 1.4 億ユーロ）を 2015 年に開始しており、マイクロソフト社やインテル社も支援・共同研究を行うなど量子コンピュータ実現に向けた研究開発を加速させている。

マクロ量子制御に基づく時間標準の研究は、これまで日本と米国がリードしてきたが、近年では欧州でも活発化しているほか、原子イオンに関連した物性研究では中国も追い上げを見せており、本技術を発展させた量子シミュレーションの研究が世界中で開始されている。また、従来の古典光によっては実現不可能な感度・分解能を有する量子もつれに基づく計測・イメージング技術や物質制御技術が注目されているほか、量子科学に基づく計測技術に関して、従来は理想的な完全測定を目指した研究が進められてきたのに対し、数学的な推

定処理を前提とした不完全測定・弱測定など将来的な実用性を考慮した研究へのシフトが見られる。

⑥ 検討の経緯

「戦略目標等策定指針」(平成27年6月8日科学技術・学術審議会戦略的基礎研究部会決定)に基づき、以下の通り検討を行った。

(科学研究費助成事業データベース等を用いた科学計量学的手法による国内外の研究動向に関する分析資料の作成)

科学研究費助成事業データベース等を用いて、研究論文の共引用関係又は直接引用関係の分析等の科学計量学的手法を活用することにより、国内外の研究動向に関する分析資料を作成した。

(分析資料を用いた専門家へのアンケートの実施及び注目すべき研究動向の作成)

「科学技術振興機構研究開発戦略センターの各分野ユニット」、「日本医療研究開発機構のプログラムディレクター等」及び「科学技術・学術政策研究所科学技術動向研究センターの専門家ネットワークに参画している専門家」に対し、作成した分析資料を用いて今後注目すべき研究動向に関するアンケートを実施した。その後、アンケートの結果の分析等を行い、注目すべき研究動向として「量子状態の高度制御による新たな物性物理・情報科学フロンティアの開拓」を特定した。

(ワークショップの開催及び戦略目標の作成)

注目すべき研究動向「量子状態の高度制御による新たな物性物理・情報科学フロンティアの開拓」に関係する産学の有識者が一堂に会するワークショップを開催し、特に注目すべき国内外の動向、研究や技術開発の進展が社会的・経済的に与え得るインパクトやその結果実現し得る将来の社会像、研究期間中に達成すべき目標などについて議論を行い、ワークショップにおける議論等を踏まえ、戦略目標を作成した。

⑦ 閣議決定文書等における関係記載

「第5期科学技術基本計画」(平成28年1月22日閣議決定)
第2章(3) <2>2)

個別システムにおいて新たな価値創出のコアとなり現実世界で機能する技術として、国は、特に以下の基盤技術について強化を図る。

(中略)

・革新的な計測技術、情報・エネルギー伝達技術、加工技術など、様々なコンポーネントの高度化によりシステムの差別化につながる「光・量子技術」

「科学技術イノベーション総合戦略 2015」（平成 27 年 6 月 19 日閣議決定）

第 1 部 第 1 章 2.

「超スマート社会」において我が国の強みを活かし幅広い分野でのビジネス創出の可能性を秘めるセンサ、ロボット、先端計測、光・量子技術、素材、ナノテクノロジー、バイオテクノロジー等の共通基盤的な技術の先導的推進を図ることも重要である。

⑧ その他

平成 27 年度の戦略目標「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」では、新たな光機能や光物性の解明・利活用・制御等を通じて従来の光科学技術を横断的かつ重層的に集積・発展させることにより、将来の社会・産業ニーズに応える新たなフォトニクス分野の進展を加速させるとともに、新技術シーズの創出を支える基礎的な原理の解明にも併せて取り組むことで、新たな光機能物質の人工生成や革新的な光通信技術の開発・活用、微細構造の高時空間分解可視化、先端数理科学との融合による複合光基盤技術・システムの創出等を目指している。ここで創出された優れた研究シーズを、本戦略目標を通じて相乗的に伸ばしていくことで、最先端の光・量子科学技術の実用化を加速していくことが重要である。

(2) 研究領域

「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」(平成 28 年度発足)

本研究領域は、光科学、物性科学、ナノ構造・材料科学、情報科学に立脚して量子状態の高度制御の物理と技術を探求し、量子科学のフロンティアを開拓するとともに、新たな量子情報処理や従来性能を凌駕する素子・システム機能を実現することにより、社会の発展に資する革新的量子技術基盤を創出することを目的としている。本研究領域においては、量子状態制御の物理の探索とその技術展開をはかる「新しい源流の創出」と、将来の社会・産業イノベーションを牽引する量子技術の実装に向けた「革新的システム機能の創成」を二本柱として、研究開発を推進する。

研究の具体例としては、量子ドットや超伝導体などにおける多様な量子系の状態制御の高度化とその量子情報処理技術への展開、高度に制御された量子系による新しい量子融合素子や高感度センサー素子の実現、および巨視的量子効果や量子光学の高度な活用による超高精度計測技術の開発などを含む。さらに、将来の社会基盤の構築に資する革新的量子システム機能の実現やその集積化・統合化も目指すこととする。

(3) 研究総括

荒川 泰彦 (東京大学 ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構 特任教授)

(4) 採択研究課題・研究費

※各研究課題は、カテゴリー(A)(B)いずれかに分類される。カテゴリーの考え方については、「2. 研究総括のねらい」を参照されたい。

- (A) 量子状態制御の物理の探索とその技術展開をはかる「新しい源流の創出」
(研究費上限：総額 2 億円)
- (B) 将来の社会・産業イノベーションを牽引する量子技術の実装に向けた「革新的システム機能の創成」
(研究費上限：総額 3.5 億円)

採択年度	研究代表者 カテゴリー	所属・役職 上段：中間評価時 下段：採択時	研究課題	研究タイプ
2016 年度	井元信之	大阪大学・特任教授 大阪大学・教授	グローバル量子ネットワーク	B
	北川勝浩	大阪大学・教授 同上	室温超核偏極と量子符号化による超高感度生体 MRI/NMR	A
	高橋義朗	京都大学・教授 同上	冷却原子の高度制御に基づく革新的光格子量子シミュレーター開発	A
	竹内繁樹	京都大学・教授 同上	大強度広帯域周波数もつれ状態の実現と応用	B
	樽茶清悟	理化学研究所 創発物性科学研究 センター・グループ ディレクター 同上	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成 -スピン量子計算の基盤技術開発	A
	蔡 兆申	東京理科大学・教授 同上	超伝導人工原子を使った光子ベースの量子情報処理	B
2017 年度	青木隆朗	早稲田大学・教授 同上	スケーラブルな光学的量子計算に向けた超低損失ナノファイバー共振器 QED 系の開発	A
	神成文彦	慶應義塾大学・教授 同上	波長分割多重プログラマブル大規模量子シミュレータ	A
	小坂英男	横浜国立大学・教授	ダイヤモンド量子セキュリティ	A

		同上		
	齊藤志郎	日本電信電話株式会社・特別研究員 同上	超伝導量子ビットを用いた極限量子センシング	A
	仙場浩一	情報通信研究機構・上席研究員 同上	超伝導量子メタマテリアルの創成と制御	A
	田中歌子	大阪大学・講師 同上	オンチップ・イオントラップによる量子システム集積化	A
	田中雅明	東京大学大学院工学系研究科・教授 同上	強磁性量子ヘテロ構造による物性機能の創出と不揮発・低消費電力スピンドバイスへの応用	A
2018 年度	大野圭司	理化学研究所・専任研究員 同上	シリコン技術に立脚した室温動作スピン量子ビット	A
	小関泰之	東京大学・准教授 同上	量子光源による超高感度分子イメージング	B
	宗宮健太郎	東京工業大学・准教授 同上	量子制御を用いたオプトメカ結合型調和振動子のマニピュレーション	A
	永長直人	東京大学・教授 同上	ナノスピン構造を用いた電子量子位相制御	A
	長谷宗明	筑波大学・教授 同上	ダイヤモンドを用いた時空間極限量子センシング	A
	山本倫久	理化学研究所・チームリーダー 理化学研究所・ユニットリーダー	半導体非局在量子ビットの量子制御	A

2. 研究総括のねらい

半導体、超伝導、レーザーなど、量子力学に立脚した科学技術が進展し、産業や社会に大きなインパクトを与えてきたが、1990年代頃から、量子状態制御の要素技術や量子情報処理の基礎研究が開始され、現在、量子力学の包括的かつ高度な活用による、新しい学術や技術の体系、発展、萌芽が見られる。こうした進展を背景に、あらためて、光科学、物性科学、ナノ構造・材料科学、情報科学等の強みを糾合し、中長期的な視座から量子科学のフロンティア開拓を先導するとともに、新しい産業や技術基盤の創出の核となる量子技術を生み出すことは重要である。

本研究領域では、様々な経済的・社会的なニーズに応えるべく、量子状態の高度制御にかかわる研究開発を重点的に推進し、新たな量子物性の開拓や量子情報システムの開発の展開を図っている。これにより、幅広いイノベーションの源泉の創成を図るとともに、今後、大きく変革する社会の基盤となる量子技術・システム実装を世界に先駆けて実現する基盤技術の確立を目指している。

具体的には、量子の孤立系から多体系、巨視的な凝縮体に至るまで、多彩な量子状態の高度制御を実現することにより、未知の物理現象や物質機能・物性の探索、新たな概念に基づく情報科学の開拓及び新技術シーズ創出を図っている。また、基盤的な量子技術・システムの開発により、既存技術分野（フォトンクス、エレクトロニクス等）の発展的融合・ブレークスルーを促すことを目指している。

なお、本研究領域では、研究課題を下記の2本柱のいずれかのカテゴリーに分けて進めることとした。

(A) 量子状態制御の物理の探索とその技術展開をはかる「新しい源流の創出」

(B) 将来の社会・産業イノベーションを牽引する量子技術の実装に向けた「革新的システム機能の創成」

いずれのカテゴリーも目的は基礎研究を目指していることは言うまでもない。したがって、(B)はもとより(A)に属する研究課題であっても、その成果がシステムとして将来社会に対して如何に結実するかを求めている。

本研究領域の推進により、光科学、物性科学、ナノ構造・材料科学、情報科学が複合的・多層的に融合・連携し、世界をリードする量子技術基盤の確立を図る。

3. 研究課題の選考について

(1) 研究課題の選考方針

以上の考え方を具体的に実行に移すべく、幅広い研究分野からの提案を募集し、以下の方針に沿った提案を行うことを求めた。

- ①量子状態の高度制御によりこれまでの限界に挑むことで、新たな量子情報処理技術の開発や、従来技術を超えたセンサーやデバイスの実現をはじめとする様々な量子技術の社会実装に向けた基盤構築のための研究開発であること。
- ②科学と技術において学術的価値の高い研究成果の創出を確信させる構想であること。
- ③成果の社会的意義について明確なビジョンの提示があること。
- ④提案の遂行によりもたらされる既存技術からの不連続な進展とそのためのベンチマークを示すこと。
- ⑤学術的価値と期待される社会的価値の両方の観点において卓越していること。

また、本研究領域で研究開発の対象とする提案は、下記のような分野に属する提案であることを示して募集を行った。

- 1) 多様な量子系の状態制御の高度化による量子情報処理要素技術の開発
- 2) 革新的量子システム機能の実現によるスケーリング可能な量子情報処理技術の開発
- 3) 量子多体系の制御による新たな量子シミュレーション技術の開拓
- 4) 光子や電子の高度量子状態制御による量子通信要素技術開発とシステム実証
- 5) ナノ構造形成技術や新材料技術の開拓による新たな高度量子状態制御素子の実現
- 6) 巨視的量子効果や量子光学の高度な活用による超高精度計測・センサー技術の開発

(2) 選考結果

①2016年度

初年度の募集では、光子、原子、分子、半導体、磁性体、超伝導体など様々な系を対象にする量子状態制御・システムに関する研究提案が34件あった。提案応募数は決して多くは無かったが、我が国における本研究領域の主たる研究者からの提案はほぼ出揃ったため、審査では、精選された質の高い応募提案群からの選択となった。10人の領域アドバイザーと厳正なる書類ならびに面接選考を実施し、計6件を採択した。採択にあたっては、提案内容の学術的価値のみならず、研究目標の野心性、将来社会的に資する可能性が高い提案であるかどうかを評価の対象とした。結果として、量子計算、量子通信、量子計測、量子シミュレーションの各分野からバランスよく採択することができた。また、研究の舞台となる系も、もつれ光、冷却原子、超伝導回路、半導体量子ドットなど、その多様性を確保できたのは意義深いことである。2016年度の採択課題には、医学応用を目的とした提案が2件含まれているが、量子技術が、診断精度の飛躍的向上・がんの超早期発見等、医療技術に革新をもた

らし、健康・長寿社会に貢献することを期待した。

2016年度の採択課題は以下の6件である。

- 1) 井元課題「グローバル量子ネットワーク」
- 2) 北川課題「室温超核偏極と量子符号化による超高感度生体MRI/NMR」
- 3) 高橋課題「冷却原子の高度制御に基づく革新的光格子量子シミュレーター開発」
- 4) 竹内課題「大強度広帯域周波数もつれ状態の実現と応用」
- 5) 樽茶課題「スピン量子計算の基盤技術開発」
- 6) 蔡課題「超伝導人工原子を使った光子ベースの量子情報処理」

②2017年度

次年度の募集も2016年度同様、本研究領域の2本柱である“量子状態制御の物理の探究とその新しい源流の創出を計る「新しい源流の創出」と、“将来の社会・産業イノベーションを牽引する量子技術の実装に向けた「革新的システム機能の創成」”を基本的な枠組として行った。特に、2017年度は、これまでの研究分野（量子計算、量子通信、量子計測）に加え、それらの枠を超えた量子技術の開拓とその応用展開を目指す「新量子技術」の提案も期待した。

2017年度の募集では、光子、原子・分子、半導体、磁性体、超伝導体、生体分子など、実に様々な系の量子状態制御・システムに関する提案が29件あった。10人の領域アドバイザーの先生方と厳正なる書類ならびに面接選考を実施し、計7件の提案を採択した。採択にあたっては、提案内容の学術的価値のみならず、研究の独創性と提案者の熱意、ならびに提案が量子技術として将来的に社会実装できるかどうかについても評価した。結果として、量子計算、量子通信、量子計測、新量子技術の各分野の課題をバランス良く採択することができた。研究対象となる量子系も、イオン、NVセンター、超伝導体、光量子、磁性体など多様であり、前年度採択した課題と合わせて、領域全体として分野バランスと物理的多様性を兼ね備えた研究ポートフォリオを構築することができた。採択した課題が量子状態の制御の科学に新風を吹き込み、本研究領域を学術的に豊かで技術的革新性にも富み、社会的に意義深くなることを期待した。

2017年度の採択課題は以下の7件である。

- 1) 青木課題「スケーラブルな光学的量子計算に向けた
超低損失ナノファイバー共振器 QED 系の開発」
- 2) 神成課題「波長分割多重プログラマブル大規模量子シミュレータ」
- 3) 小坂課題「ダイヤモンド量子セキュリティ」
- 4) 齊藤課題「超伝導量子ビットを用いた極限量子センシング」
- 5) 仙場課題「超伝導量子メタマテリアルの創成と制御」
- 6) 田中歌子課題「オンチップ・イオントラップによる量子システム集積化」
- 7) 田中雅明課題「強磁性量子ヘテロ構造による物性機能の創出と

③2018 年度

最終年度の募集は、特に、国際連携強化の観点から、フランス国立研究機構（Agence Nationale de la Recherche:ANR）と共同で、日仏共同 CREST 課題の募集選考も実施した。日仏共同 CREST 課題は、日本側とフランス側からなる研究チームが本研究領域の研究を実施する、新しい国際連携の試みである。

募集では、光子、原子・分子、半導体、磁性体、超伝導体、生体分子など、実に様々な系の量子状態制御・システムに関する提案が、過去 3 年間で最大の 37 件あった。10 人の領域アドバイザーの先生方と厳正なる書類ならびに面接選考を実施し、日仏共同チームの提案 2 件を含む、計 6 件の提案を採択した。採択にあたっては、提案内容の学術的価値のみならず、研究の独創性と提案者の熱意、ならびに提案が量子技術として将来的に社会的に実装できるかどうかについても評価した。結果として、量子計算、量子計測、および新量子技術分野の課題をバランス良く採択することができた。研究対象となる量子系も、電子、光量子、NV センター、半導体、磁性体など多様であり、これまで採択した研究課題と合わせて、領域全体として分野バランスと物理的多様性を兼ね備えた研究ポートフォリオを構築することができた。特に、採択された日仏共同 CREST 課題には、量子技術における日欧連携の核となることを期待した。

2018 年度の採択課題は以下の 6 件である。

- 1) 大野課題「シリコン技術に立脚した室温動作スピン量子ビット」
- 2) 小関課題「量子光源による超高感度分子イメージング」
- 3) 宗宮課題「量子制御を用いたオプトメカ結合型調和振動子のマニピュレーション」
(日仏共同課題)
- 4) 永長課題「ナノスピン構造を用いた電子量子位相制御」
- 5) 長谷課題「ダイヤモンドを用いた時空間極限量子センシング」
- 6) 山本課題「半導体非局在量子ビットの量子制御」
(日仏共同課題)

図 3-1 に全採択課題の一覧を量子技術分野と研究の対象となる量子系の二軸で整理して、各課題のキーワードと共に示す。図からわかるように、量子計算、量子計測、および新量子技術など、量子技術分野の観点、また、電子、光量子、NV センター、半導体、磁性体など多様であり、研究対象となる量子系の観点、いずれの観点からも、領域全体として分野バランスと物理的多様性を兼ね備えた研究ポートフォリオを構築することができた。

本研究領域では、(A) 量子状態制御の物理の探索とその技術展開をはかる「新しい源流の創出」と(B) 将来の社会・産業イノベーションを牽引する量子技術の実装に向けた「革新的システム機能の創成」の二つのカテゴリーを設けたが、2016 年度は(A)3 件(B)3 件、2017 年度は(A)7件(B)0

件、2018年度は(A)5件(B)1件という配置で進めた。

量子技術 物理・物質基盤	量子計算	量子通信	量子計測	新量子技術
原子・分子	高橋A (冷却原子)		北川A (NMR)	田中(歌)A (イオントラップ)
超伝導体	蔡B (集積回路)		斉藤A (磁束量子ビット)	仙場A (メタマテリアル)
光量子	神成A (波長多重)	井元B (量子)	竹内B (量子光OCT)	青木A (ファイバーQED)
		小坂A (量子中継)	小関B (ラマン分光)	宗宮A(ANR) (オプトメカ)
半導体	樽茶A (スピン回路)		長谷A (NVセンター)	田中(雅)A (スピントロクス)
	山本A(ANR) (非局在Q-bit)		大野A (室温Q-bit)	永長A (創発磁場)

■ H28採択課題
 ■ H29採択課題
 ■ H30採択課題

図 3-1 採択課題のポートフォリオ

採択年度の進行に伴い、結果として若手研究者の提案を採択することとなった。実際、2016年度採択課題と2018年度の採択課題の研究代表者の平均年齢差は15歳近く開いている。

4. 領域アドバイザーについて

本研究領域は、量子技術が、光科学、物性科学、ナノ構造・材料科学、情報科学が複合的・多層的に融合・連携しているため、これらの幅広い分野から著名な研究者の方 10 名に領域アドバイザーとして就任頂いた。また、本研究領域では研究成果の社会実装も重視することから、3 名のアドバイザーは企業の方に参画頂いた。

以下、領域アドバイザーの名簿を示す。

領域アドバイザー名 (専門分野)	現在の所属	役職	任期
伊藤 公平 (半導体量子物性、量子情報)	慶應義塾大学	教授	2016 年 5 月 ～
香取 秀俊 (量子エレクトロニクス、レーザー冷却・トラップ、極低温衝突、原子の精密計測・分光)	東京大学	教授	2016 年 5 月 ～
寒川 哲臣 (量子光学、半導体量子ナノ構造の光・スピン制御)	日本電信電話 (株)	所長	2016 年 5 月 ～
西野 哲朗 (情報理論、コンピュータサイエンス)	電気通信大学	教授	2016 年 5 月 ～
野田 進 (光量子電子工学、ナノ光デバイス)	京都大学	教授	2016 年 5 月 ～
平山 祥郎 (半導体量子物性、スピン(核スピン)物性、キャリア相関)	東北大学	教授	2016 年 5 月 ～
藤巻 朗 (超伝導エレクトロニクス、超伝導回路)	名古屋大学	教授	2016 年 5 月 ～
古澤 明 (量子光学・量子情報、量子エレクトロニクス)	東京大学	教授	2016 年 5 月 ～
山田 真治 (材料科学、ナノテクノロジー)	(株)日立製作所	技師長	2016 年 5 月 ～

山本 喜久 (量子光学, 量子情報処理)	NTT Research, Inc.	Director	2016年5月 ～
-------------------------	--------------------	----------	--------------

5. 研究領域のマネジメントについて

(1) 研究課題の進捗状況の把握と評価、それに基づく研究課題の指導

キックオフミーティング、サイトビジットおよび領域会議を実施し進捗状況の把握に努めている。また、領域アドバイザーにもご協力いただき、必要な助言、支援を行っている。

① キックオフミーティング

2016年11月24日、TKP市ヶ谷にて採択課題の研究内容を紹介し、領域アドバイザーを交え活発な議論を交わした。2017年度以降の採択課題については領域会議と兼ねた。

② サイトビジット

総括は領域アドバイザーと各研究チームの所属機関を訪問した。進捗報告会および実験室見学を通じて突っ込んだ議論を交わし、進捗状況を把握して必要な助言を行うことができた。サイトビジットは、単なる施設見学ではなく、長時間の議論を通じて研究活動への理解を深めると共に適切なアドバイスをした。

<2017年度>

蔡課題	2017年9月29日	東京理科大学 森戸記念館
竹内課題	2017年10月19日	京都大学 桂キャンパス
高橋課題	2017年10月20日	京都大学 吉田キャンパス
樽茶課題	2017年10月26日	理化学研究所 和光地区

<2018年度>

井元課題	2018年4月26日	大阪大学 豊中キャンパス
北川課題	2018年4月26日	大阪大学 豊中キャンパス
齊藤課題	2019年3月26日	NTT 厚木研究開発センタ

<2019年度>

仙場課題	2019年4月16日	情報通信研究機構 小金井地区
神成課題	2019年4月16日	慶應義塾大学 新川崎タウンキャンパス
青木課題	2019年5月29日	早稲田大学 西早稲田キャンパス
小坂課題	2019年5月30日	横浜国立大学
田中歌子課題	2019年7月4日	大阪大学 豊中キャンパス

田中雅明課題 2019年 8月 8日 東京大学 本郷キャンパス

<2020年度>

小関課題 2020年 6月 29日 東京大学 本郷キャンパス

永長課題 2020年 6月 29日 東京大学 本郷キャンパス

大野課題 2020年 6月 30日 理化学研究所 和光地区

山本課題 2020年 6月 30日 理化学研究所 和光地区

長谷課題 2020年 7月 3日 筑波大学

宗宮課題 2020年 10月 23日 東京工業大学 大岡山キャンパス

③ 領域会議

実施時点での全採択課題についての進捗を報告し、領域アドバイザーを交え活発な議論を交わした。第1回から3回までは公開シンポジウムとし、領域外研究者との情報交換も図った。

第1回 2017年 5月 25日 東京大学先端技術センター ENEOS ホール
(公開シンポジウム)

第2回 2017年 12月 7日、8日 京都大学北部総合教育研究棟
(公開シンポジウム)

第3回 2018年 11月 21日、22日 東京大学先端技術センター ENEOS ホール
(公開シンポジウム)

第4回 2019年 10月 24日、25日 東京大学先端技術センター ENEOS ホール
(非公開)

第5回 2020年 12月 7日、8日 Web 開催
(非公開)

(2) チーム型のネットワーク研究所として、研究課題間や他の研究領域、国内外の他の研究機関、異分野との連携・協力の推進

本研究領域では領域内の連携に加え、海外との連携にも注力している。これを踏まえ以下の活動を実施してきた。なお、ANR との日仏共同研究に関しては次章 6. 「研究領域としての戦略目標の達成に向けた状況について」の宗宮課題および山本課題の説明の中で記載する。

① 国際ワークショップ・シンポジウム

以下のワークショップ・シンポジウムを開催し、国際的な交流を図った。

1) Japan-EU Joint Workshop on Advanced Quantum Technology for Future Innovation

2018年9月3日(月)～4日(火)にソルボンヌ大学ピエール・マリーキュリーキャンパス(フランス、パリ)にて、日欧の重点投資分野である「量子技術」におけるトップ研究者らを集め、有望な連携協力分野の探索や今後の連携方策について議論を行うワークショップを開催した。本ワークショップは2018年1月の林文部科学大臣(当時)の訪欧時に行われたモエダス研究・科学・イノベーション担当欧州委員との会談において、日欧で当該分野での協力拡大が合意されたことに基づき開催されたものである。

日本側 Co-chair を本研究領域の荒川泰彦 研究総括とし、日本から26名が参加し、CREST 研究代表者、ERATO「中村巨視的量子機械プロジェクト」の中村泰信研究総括のほか、さきがけ研究領域「量子の状態制御と機能化」からも若手研究者代表として2名が、そしてヨーロッパ側からも各分野を代表する研究者らが、それぞれの研究について講演した。EU 加盟国から仏、独、英、伊、蘭、デンマーク、スペイン、ポルトガル、ポーランド、フィンランド、ルクセンブルグ、クロアチア(12ヶ国)が、その他、米、露、スイス、印、豪、伯、トルコ、モロッコ(8ヶ国)、および日本の合計20ヶ国から合計120名(事前登録者数、発表者を含む)が参加し、研究者だけでなく、政策関係者も交えて活発な質疑応答・議論がなされた。

1日目終了後には、在フランス日本大使館主催のレセプションを開催し、堀内公使ならびにフランス高等教育・研究・イノベーション省 GARDIA 課長らからご挨拶いただくなど、日仏交流160周年にあたってトップサイエンスの側面からも両国の交流深化を内外に印象付ける機会となった。また2日目の最終セッションでは、今後の量子研究を俯瞰的に議論するパネルディスカッションを実施し、本ワークショップのサマリーレポートを取りまとめ、日欧の研究戦略・最先端の研究成果や情報交換を行い、連携協力やその方策について議論が行われ、進展が著しい量子技術研究の見通しについて認識を共有した。



Advanced Quantum Technology for Future Innovation 参加者

2) EU-USA-Japan International Symposium on Quantum Technology (ISQT)

2019年12月16日(月)～12月17日(火)に、京都ブライトンホテルにて、量子科学技術分野の日米欧でのさらなる国際協力の拡大と研究力の向上を目指した国際シンポジウム「EU-USA-Japan International Symposium on Quantum Technology (ISQT)」を開催した。

2018年のJapan-EU Joint Workshop on Advanced Quantum Technology for Future Innovationに続き2回目となった本国際シンポジウムでは、新たにアメリカの研究者・政策関係者も招き、3極の量子技術政策における様々な取り組みや、量子コンピューティング、量子コミュニケーション、量子計測・センシング等の最新の研究動向を互いに紹介した。合計10の国・地域から348名に上った参加者(事前登録者数、招待講演者含む)は、第一線で量子技術分野を担う研究者から学生まで幅広く、普段のコミュニティの垣根を越えた率直なディスカッションが交わされた。

シンポジウム終盤には、「Policy and Roadmap of Quantum Technology」と題したパネルディスカッションを設け、各極の代表が自身の分野の動向と展望や、量子科学技術分野の学術的な発展のための戦略、量子科学技術の社会発展への貢献に対する期待について意見交換を行った。特に学術分野の発展に関する議論では、若手研究者の育成や異分野との協働、技術を作る人だけでなく使う人の拡充、基礎研究を深めることの重要性等、地域によらない共通する課題や目標が明らかになった。

日米欧の各共同議長らによる閉会の挨拶では、心が弾むようなプレゼンテーションに感謝の意が述べられただけでなく、本シンポジウムは量子科学技術分野で日米欧3極が連携をさらに深化する上でのキックオフであるとし、今後の協働への期待が語られた。日米欧が競争・協調しながら先導する量子科学技術の学術的・社会的発展の具現化へと踏み出す確かな高揚感が、会場を満たした。

なお、共同議長らによりまとめられた本シンポジウムの討議結果は、内閣府を中心に検討が進められている「量子技術イノベーション戦略」の国際的な戦略における具体的な方策に向けた成果の一つとして位置づけられている。



ISQT 参加者

② 国際強化支援

海外との連携に関しては国際強化支援を積極的に活用してきた。以下にこれまで実施した研究者の派遣および招へいを示す。

<高橋課題>

・2018年度

派遣：Department of Physics, Boston University

当課題の研究者が教授 Anatoli Polkovnikov 氏を訪問。氏が最近提唱・開発した数値計算手法であるフェルミ粒子系に対する切断ウィグナー近似法のさらなる開発に携わった。

<蔡課題>

・2018年度

招へい：University of Technology Sidney Devitt, Simon, John 氏

本研究課題の主テーマである超伝導量子マイクロ波光子源を使ったクラスター状態量子コンピューターに向けた研究を大きく進めた。現在 Devitt 氏のサポートにより、三次元クラスター状態の生成について、回路実装の上で、今までにない優位性をもった、新規な量子コンピューターのアーキテクチャが東京理科大で創出されている。この新規な回路について、我々は Devitt 氏と共同でこの方式の基本論文を執筆した。彼の来訪中に、以下の表面コード型量子コンピューターの新規アーキテクチャに関する共著論文を完成させた：

“Pseudo-2D superconducting quantum computing circuit for the surface code”, H. Mukai, K. Sakata, S. J. Devitt, R. Wang, Y. Zhou, Y. Nakajima, J. S. Tsai, arXiv:1902.07911 (2019)

同時に以下の一方向超伝導量子コンピューターの共著論文の最終論議を行った：

“A cluster state architecture for superconducting quantum computing”, K. Sakata, H. Mukai, A. F. Kockum, S. J. Devitt, F. Nori, and J. S. Tsai, to be submitted

<小坂課題>

・2018年度

派遣：Delft 工科大学

当課題の研究者が Tim Taminiau 氏を訪問。氏のグループがもつダイナミカルデカップリングを用いた多数の ^{13}C 核スピン制御のための量子ゲートシーケンスや光学、マイクロ波工学に関する実験技術を学んだ。さらに、その手法を発展させてシミュレーションを行った。

・2018年度

派遣：Ulm 大学

当課題の研究者が Fedor Jelezko 氏を訪問。SiV-中心についての基本的物性に関する知識や実験技術について学んだ。さらに、SiV-センターを利用した核スピンへの量子情報転

写についての手法を共同で検討した。

<仙場課題>

・2018 年度

招へい：

Qatar Environment and Energy Research Institute (QEERI) S. Ashhab 博士

Institute of Fundamental Physics, CSIS, Madrid, Spain M. P. García 博士

超伝導人工原子と電磁場(光子)の超強結合、新強結合研究の第一人者である Ashhab 博士 (QEERI, カタール) を招へいし、深強結合基底状態や巨大な光シフトを用いた高感度磁場検出実験に関する意見交換、特性改良のための具体的方策を議論し、透過スペクトル測定における超伝導人工原子のバイアス磁場のパラメータ(ε)依存性に関する超放射相転移の明確な兆候を抽出することに成功した。

M. P. Garcia 博士(CSIC, スペイン) に関しては、超強結合・深強結合系の新たな応用先として、量子アニーリングを実行した場合の特性を議論し、最近接との強結合では実現できない空間的に離れた量子ビットとの強結合が、共振器経由で 超強結合・深強結合を導入することによって可能となり、断熱量子計算を加速できる可能性があることが判明した。

・2019 年度

招へい：

Yale 大学 Devoret, Michel, H

MIT Oliver, William, D

Delft 工科大 Mooij, Johan

磁束量子ビットと LC 共振器とを超(深)強結合させた回路を量子 Rabi ハミルトニアンで記述することの妥当性については、これまで深く議論されてこなかったが、今回の招聘期間中に行った Devoret 教授との議論によって、改良型電荷量子ビットであるトランズモン量子ビットについて行われているラグランジアン形式に則った標準量子化の技法を磁束量子ビット回路に応用することによって検討することが可能となった。

W. D. Oliver 教授との議論で、超(深)強結合超伝導回路における相互作用定数の高速変調や量子相関測定には、数 GHz の増幅帯域幅をもつ広帯域 JTWPA を用いた測定が非常に有効であるとの認識で一致した。

Mooij 教授らが提案し研究しているジョセフソン接合を必要としない Phase-Slip Qubit について議論し、新たな量子ビット創成に成功した後は、Q 値の大きなマイクロ波空洞共振器を用いたコヒーレンス時間の測定から信頼できるエネルギー緩和時間、位相緩和時間を測定して、既存の量子ビット性能を超える特性を示せるかが大切という見解で一致した。

<田中雅明課題>

・2018 年度

派遣：ユーリッヒ総合研究機構

当課題の研究者が Peter H. Dederichs 教授および Rudolf Zeller 博士を訪問。KKRnano コードを用いて Fe 系磁性半導体の大規模第一原理電子状態計算を行い、物性値を高精度に計算した。さらに、Fe 系磁性半導体における磁気特性発現メカニズムの解明を行った。

(3) 研究費配分上の工夫

研究課題の進捗状況を評価し、必要な増額を総括裁量経費から配分している。また、その他に、期中予算調整による増額や国際強化支援を積極的に活用している。

(4) その他マネジメントに関する特記事項(人材育成等)

若手研究者の人材育成も本研究領域の重要課題として研究代表者に取り組んでいただいている。これまで、以下の研究代表者、主たる共同研究者、および研究参加メンバーが、昇任している。

富山大学・玉木潔（井元課題・主たる共同研究者）主任研究員⇒教授

大阪大学・山本俊（井元課題・参加メンバー）准教授⇒教授

東京大学・佐々木寿彦（井元課題・参加メンバー）助教⇒講師

NTT・東浩司（井元課題・主たる共同研究者⇒参加メンバー(さきがけ採用による変更)

研究主任⇒主任研究員・特別研究員

大阪大学・小林俊輝（井元課題・参加メンバー）学生⇒特任助教

NICT・山下太郎（井元課題・参加メンバー）主任研究員⇒准教授

東京大学・藤井啓祐（井元課題・参加メンバー）助教⇒教授

東京大学・中田芳史（井元課題・参加メンバー）研究員⇒助教

大阪大学・浅野元紀（井元課題・参加メンバー）学生⇒常勤研究職

大阪大学・達本吉朗（井元課題・参加メンバー）学生⇒研究員

大阪大学・竹内勇貴（井元課題・参加メンバー）学生⇒常勤研究職

大阪大学・水谷明博（井元課題・参加メンバー）学生⇒常勤研究職

東京大学・鈴木泰成（井元課題・参加メンバー）学生⇒常勤研究職

大阪大学基礎工学研究科・根来誠（北川課題・参加メンバー）

助教 ⇒ 大阪大学先導的学際研究機構 特任准教授

大阪大学基礎工学研究科・杉山太香典（北川課題・参加メンバー）

研究員 ⇒ 東京大学先端科学研究センター 特任助教

大阪大学基礎工学研究科・御手洗光祐（北川課題・参加メンバー）

学生 ⇒ 大阪大学基礎工学研究科 助教

愛知工業大学・中村祐士（北川課題・参加メンバー）

特任研究員 ⇒ 同志社大学 生命医科学部医情報学科 助教

京都大学・高須洋介（高橋課題・参加メンバー）助教⇒准教授
 京都大学・山下和也（高橋課題・参加メンバー）教務補佐員⇒特定研究員
 近畿大学・段下一平（高橋課題・主たる共同研究者）助教⇒准教授
 大阪大学・藤井啓祐（高橋課題・参加メンバー）助教⇒教授
 広島大学・ホフマン ホルガ（竹内課題・主たる共同研究者）准教授⇒教授
 新潟大学・岡寿樹（竹内課題・主たる共同研究者）准教授⇒北里大学・教授
 理化学研究所・大塚朋廣（樽茶課題・参加メンバー）：理研創発物性科学研究センター
 研究員⇒東北大学電気通信研究所 准教授
 理化学研究所・米田淳（樽茶課題・参加メンバー）：理研創発物性科学研究センター
 研究員⇒ニューサウスウェールズ大（オーストラリア）電気情報工学系 研究員
 ⇒東京工業大学超スマート社会卓越教育院 特任准教授
 理化学研究所・DEVITT Simon John（蔡課題、Nori グループ・研究参加メンバー）
 ポストドクトラル研究員⇒Macquarie University, Fellow
 株式会社東芝・後藤隼人（青木課題・参加メンバー）主任研究員⇒研究主幹
 慶應義塾大学・保坂有杜（神成課題・参加メンバー）後期博士課程⇒助教（有期）
 横浜国立大学・小坂英男（小坂課題・研究代表者）教授⇒教授・量子情報研究センター長
 （兼務）
 物質・材料研究機構・寺地徳之（小坂課題・主たる共同研究者）主幹研究員⇒主席研究員
 NTT・上野祐子（齊藤課題・参加メンバー）主幹研究員⇒教授
 NTT・尾身博雄（齊藤課題・参加メンバー）主任研究員⇒教授
 NTT・樋田啓（齊藤課題・参加メンバー）研究員⇒研究主任
 NTT・手島哲彦（齊藤課題・参加メンバー）研究員⇒研究主任
 東京大学・高橋優樹（宗宮課題・主たる共同研究者）
 特任助教⇒大阪大学・特任准教授⇒OIST 准教授
 東京大学・石塚大晃（永長課題・参加メンバー）
 助教⇒東京工業大学理学院物理学系・准教授
 理化学研究所・山本倫久（山本課題・研究代表者）ユニットリーダー⇒チームリーダー
 産業技術総合研究所・岡崎雄馬（山本課題・参加メンバー）研究員⇒主任研究員

また、研究参加者の受賞が多数あり、主な賞については以下に記載する。

(2020年10月30日現在)

受賞者名	賞の名称	授与者名	受賞日
三木茂人、山下太郎、寺井弘高	超伝導科学技術賞	未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会	2017/04/17

山崎友裕 (M2)	Best Oral Presentation Award	International Symposium for Nano Science (ISNS2019)	2019/11/19
山下太郎	文部科学大臣若手科学者賞	文部科学省	2017/04/19
山崎友裕	Best Oral Presentation Award	International Symposium for Nano Science (ISNS2019)	2019/11/19
前田健人	東京大学総長賞	東京大学	2020/03/19
Mori Y, de la Mora DM, Jin T, Yoshioka Y.	the First Prize	The 8th Annual Scientific Symposium of Ultrahigh Field Magnetic Resonance.	2017/06/30
高橋義朗	紫綬褒章	内閣府	2020/11/03
小野滉貴 (D2)	2019 年秋季大会 日本物理学会学生優秀発表賞	日本物理学会	2019/09/11
岡本亮	平成 29 年度 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	2017/04/19
清原孝行 (D2)	日本物理学会学生優秀発表賞	日本物理学会 (2018 年秋季大会)	2018/10/19
樽茶清悟	第 18 回応用物理学会業績賞	応用物理学会	2018/03/17
小嶋洋平 (M2)	日本物理学会学生優秀発表賞	日本物理学会	2019/03/27
小林瑞樹 (M2)	Best International Poster Presentation	Spin Qubit 3	2017/11/09
Franco Nori	2017 Highly Cited Researcher	The Web of Science, Clarivate Analytics	2017/11/15
蔡兆申	紫綬褒章	内閣府	2018/04/29
レイエス ラウスティン (M1)	2020 年秋季大会日本物理学会学生優秀発表賞	日本物理学会	2020/09/11
加納浩輝 (M1)	第 6 回 (2017 年秋季大会) 日本物理学会学生プレゼンテーション賞	日本物理学会	2018/03/22
長田昂大 (M1)	第 6 回 (2017 年秋季大会) 日本物理学会学生プレゼンテーション賞	日本物理学会	2018/03/22

中村孝秋 (M2)	第 6 回 (2017 秋季大会) 日本物理学会学生プレゼンテーション賞	日本物理学会	2018/03/22
笹間陽介 (D2)	Gold Young Scholar Award	Elsevier	2018/09/05
C. Osterkamp (D3)	DIAMOND POSTER AWARD	NDNC2019	2018/05/13
小関泰之 合田圭介 新田尚	科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞	文部科学大臣	2020/04/07
有富尚紀 (D2)	2019 年秋季大会 日本物理学会学生優秀発表賞	日本物理学会	2019/11/19
Naoto Nagaosa	Highly Cited Researchers 2018	クラリベイト・アナリティクス	2018/11/27
藤代有絵子 (D1)	Nature Poster Prize	Nature Publishing Group	2019/02/19
藤代有絵子 (D2)	Nature Poster Prize	CEMS Symposium on Emergent Quantum Materials	2019/05/23
藤代有絵子 (D2)	Poster Preview Award	International Conference on Topological Materials Science 2019	2019/12/16
北折暁 (M2)	Poster Award (Silver Prize)	International Conference on Topological Materials Science 2019	2019/12/16
賀川史敬	第 40 回本多記念研究奨励賞	本多記念会	2019/02/23
Yoshinori Tokura	Humboldt Research Award	Alexander van Humboldt foundation	2019/10/01
Naoto Nagaosa	Highly Cited Researchers 2019	クラリベイト・アナリティクス	2019/11/19
Yoshinori Tokura	Highly Cited Researchers 2019	クラリベイト・アナリティクス	2019/11/19
永長直人	米国科学アカデミー国際会員	米国科学アカデミー (National Academy of	2020/04/27

		Sciences)	
十倉好紀	米国物理学会 フェロー	米国物理学会	2020/10/20
十倉好紀	文化功労者	文部科学省	2020/11/04
重川秀実	紫綬褒章	内閣府	2019/12/06
北折暁 (M2)	Poster Award (Silver Prize)	International Conference on Topological Materials Science 2019	2019/12/16

6. 研究領域としての戦略目標の達成に向けた状況について

本研究領域では、様々な経済的・社会的なニーズに応えるべく、量子状態の高度制御にかかわる研究開発を重点的に推進し、新たな量子物性の開拓や量子情報システムの開発の展開を図る。さらに、これにより、幅広いイノベーションの源泉の創成を図るとともに、今後大きく変革する社会像の基盤となる量子技術・システム実装を世界に先駆けて実現する基盤技術の確立をねらいとしている。具体的には、量子の孤立系から多体系、巨視的な凝縮体に至るまで、多彩な量子状態の高度制御を実現することにより、未知の物理現象や物質機能・物性の探索、新たな概念に基づく情報科学の開拓及び新技術シーズ創出を図っている。また、基盤的な量子技術・システムの開発により、既存技術分野（フォトニクス、エレクトロニクス等）の発展的融合・ブレークスルーを促すことを目指している。

19 件の採択課題により、上記のねらいを達成すべく体制が構築され、これまで概ね順調に研究開発が進められてきたと判断している。特に、2016 年度の採択課題は、量子通信、量子コンピュータ・量子ビット基盤、量子シミュレーション、量子計測・センシング各分野を網羅しながら、きわめて順調に研究開発がこれまで進展し、重要な成果を達成してきている。2017 年度の採択課題も概ね順調に進展しているが、一部については、さらに質の高い研究目標達成に向けた成果の創出を大いに期待するところである。2018 年度については、これから中間評価を実施する段階であるが、量子材料に関する高いレベルでの成果の達成など、優れた研究成果が着々と出始めており、今後の進展が大いに期待できる。

研究成果の社会的・経済的観点からの貢献について若干述べる。我が国は、第 5 期科学技術基本計画において、将来の目指すべき社会像として「Society 5.0」を掲げており、経済・産業政策上、競争力の源泉となる重要な技術インフラである人工知能 (AI) やデータ連携基盤のさらなる飛躍的・非連続的発展に向けて、新しい価値創出のコアの鍵となる基盤技術として、量子技術（光・量子技術）が位置づけられる。量子技術は、この Society 5.0 実現に向けた社会課題の解決と産業応用を視野に入れた技術体系を構築し、また、高度な情報処

理から、材料・ものづくり、医療まで広範な応用が可能な研究領域として、非連続に課題を解決することが期待されている。本研究領域においては、特に将来の社会・産業イノベーションを牽引する量子技術の実装に向けた「革新的システム機能の創成」を目指した（B）のカテゴリーの研究課題は、このような要請に直接的に応じることが使命として課せられている。幸い、これまでの研究開発の遂行により、2016年度採択の（B）カテゴリーである井元・北川・竹内・蔡各課題においては、社会実装の見通しを与える可能性を含む成果を既にいくつか挙げる事ができた。

以下では、具体的に各課題について、その概要・目標、およびこれまでの成果と目標達成の見通しを述べるが、内容の多様性から敢えてテーマに分けず、採択年度毎に順番に記述することにする。なお、文献は主要文献3件を上限として記載しているが、重要な雑誌に多数掲載されていることがわかる。

2016年度採択課題

(1)井元課題 「グローバル量子ネットワーク」

[課題の概要と目標]

グローバル量子ネットワークに向けた研究を実施している。このような大規模量子ネットワークは最近「量子インターネット」とも呼ばれ、大規模研究計画が欧米、中国で開始されるなど注目を集めている。量子インターネットを実現するためには任意のユーザー間に量子もつれを配信することが重要となる。現在の光ファイバー網を利用してこれを実現するためには、光ファイバーでの損失を抑制し、光子を効率よく配信する「量子中継」が鍵であり、これに必要な要素技術を実験的および理論的に研究を推進することを目標として研究開発を推進している。

[主たる研究成果と目標達成状況]

これまで、量子メモリと通信波長光子の間の偏光エンタングルメントを実証し、原子量子メモリが長距離量子通信に利用可能であることを示した[1]。また、量子光波長変換器をイオン発の単一光子に初めて適用し、10kmの長距離伝送に成功し、イオンからの光子を通信波長光子に変えた伝送で当時の世界最長記録を打ち立てた[2]。さらに、「適応ベル測定」を世界で初めて実現し、「全光」量子中継の動作を実証した[3]。通信波長帯の非同期参照光を用いて、1kmの光ファイバーの自然変動下でエンタングルメントを回復させる実験にも成功した。

上記のとおり、長距離量子通信に向けた要素技術に関する研究を研究計画に従って遂行し、優れた研究成果を達成するとともに、また論文の公表も順調に進め

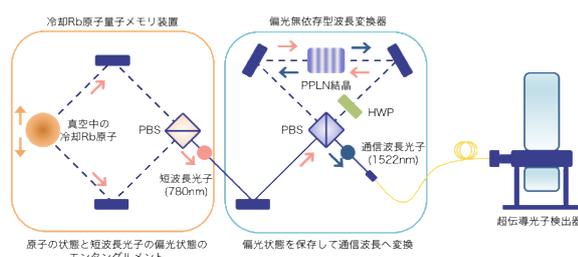


図 6-1 原子量子メモリの長距離通信用ノード

ており、本プロジェクト研究開発が順調に進展していると判断する。

[主要論文]

- [1] R. Ikuta et al., Nature Communications 9, 1997 (2018).
- [2] T. Walker et al., Phys. Rev. Lett. vol. 120, 203601 (2018).
- [3] Y. Hasegawa et al., Nature Communications 10, 378 (2019).

(2) 北川課題 「室温超核偏極と量子符号化による超高感度生体 MRI/NMR」

[課題の概要と目標]

本研究課題は、量子技術を駆使して、核磁気共鳴 (NMR) と核磁気共鳴画像法 (MRI) の感度を飛躍的に向上することによって、従来不可能であった生体内の微量分子の代謝やダイナミクスを可視化できる革新的技術を創出することを目標としている。そのために室温で飛躍的な信号増大が可能なトリプレット DNP、核スピン緩和抑制のための量子鈍感符号化、観測したい相互作用に敏感な状態を作り出す量子敏感符号化の 3 つの量子技術の研究を行う。

[主たる研究成果と目標達成状況]

トリプレット DNP を NMR へ応用するための装置開発を行い、高分解能な液体 NMR 信号を取得し

(図 6-2)、11.7 テスラの熱平衡状態と比較すると 220 倍の信号増大に成功した[1]。さらに、ペンタセンが添加可能な安息香酸と添加が困難なセンサー分子を共晶化させることでサリチル酸などの生体応用につながるセンサー分子の高偏極化に成功した[2]。量子符号化ではトリプレット DNP で高偏極化した *p*-クロロ安息香酸においてデコヒーレンスが抑制されるシングレット状態を生成し、縦緩和時間と比較して 2 倍以上高偏極状態を維持できることを示した[3]。溶解を行わない低磁場で行ったトリプレット DNP の結果では、従来目標である 1000 倍に近い信号増大に成功している。

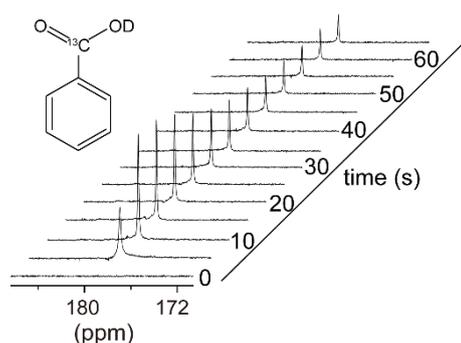


図 6-2 α - ^{13}C 安息香酸 NMR
スペクトルの時間変化

上記のとおり、室温超核偏極と量子符号化による超高感度生体 MRI/NMR 技術について研究開発を遂行し、優れた研究成果を達成しており、本プロジェクト研究開発が順調に進展していると判断する。

[主要論文]

- [1] A. Kagawa, et al., J. Phys. Chem. A, 122, 50, 9670-9675 (2018).
- [2] A. Kagawa, et al., 309, 106623-1-6 (2019).
- [3] K. Miyanishi, et al., Quantum Science and Technology, 5, No. 2, 025004-1-7 (2020).

(3) 高橋課題 「冷却原子の高度制御に基づく革新的光格子量子シミュレーター開発」

[課題の概要と目標]

光格子中に導入された超低温の原子集団を対象として、高度な量子制御能力を備えた革新的量子シミュレーターの基盤技術の創出を目指す。フェルミハバードモデルの超低温化や非平衡量子ダイナミクスの研究、新規な量子多体状態の創出など、量子多体系の量子シミュレーション技術を深化させるとともに、量子多体系を構成する単一原子に対しての最先端の量子操作技術を開発することを最終達成内容と設定し、その融合により、量子状態制御の物理の新しい源流を創出することを最終目標とする。

[主たる研究成果と目標達成状況]

量子多体系の最高峰の難易度に位置づけられるフェルミハバードモデルの量子シミュレーション研究について、1次元系の冷却原子フェルミハバードモデルの最低温度を更新した(図6-3参照)。また4サイトからなる「プラケット」構造に原子系を導入することで4つの異なるスピンの量子エンタングルした状態を生成した。さらに、2体の散逸を導入することで反強磁性スピン相関を強磁性的なものに動的に制御することに成功した。また、

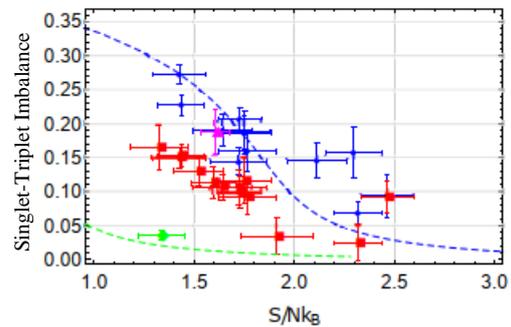


図6-3 SU(6)フェルミハバードでの量子磁性の初期エントロピー依存性

量子スピン輸送の研究として局在不純物により誘起されるスピン交換ダイナミクスの観測に成功し、スピン空間での新規な量子輸送の実験プラットフォームの構築にも成功した。

上記のとおり、当初設定した目標の殆どを達成するとともにリモート量子シミュレーションなど新たな課題にも取り組んで研究を前進させた。これにより革新的量子シミュレーターをほぼ完成させその実社会への展開の道を開くことに成功するなど卓越した成果を挙げており、本プロジェクト研究開発はきわめて順調に進展していると判断する。

[主要論文]

- [1] T. Tomita, et al., *Science Advances*, 3, e1701513 (2017).
- [2] S. Taie, et al., *Nature Communications*, 11, 257 (2020).
- [3] Y. Takasu, et al., *Science Advances*, 6, eaba9255 (2020).

(4) 竹内課題 「大強度広帯域周波数もつれ状態の実現と応用」

[課題の概要と目標]

広帯域周波数量子もつれ光とは、2つの光子が、それぞれ広い周波数帯域にわたり存在し、かつそれら2つの光子の周波数(エネルギー)の和が確定した値をもつような状態である。本プロジェクトでは、導波路型チャープ擬位相整合素子を実現(項目1)、さらに高分解能量子光断層撮影(項目2)や量子もつれ時間分解分光の実現(項目3)を目指す。また、さらなる大強度化にむけ、オンチップ導波路リング共振器を用いた量子もつれ

光源や光量子情報への応用（項目 4）も研究する。

[主たる研究成果と目標達成状況]

項目 1 については、今回開発したリッジ導波路型素子により超広帯域もつれ光（量子 OCT 分解能 $0.84 \mu\text{m}$ に相当）の発生に初めて成功、従来素子との比較で少なくとも 500 倍以上と、当初目標の 100 倍を大きく上回る効率を確認した。項目 2 については、これまでに従来型光源による量子 OCT の 50 倍の高速化を実現した。現在、導波路型光源と組み合わせ、当初目標の 1000 倍の高速化を目指している。項目 3 については、これまでに量子もつれ光子対間に時間遅延をつけた装置により和周波発生の実現と相関時間短縮に成功している。項目 4 については、知る限りオンチップリング共振器で世界最大のモード数(59)と帯域(23.6nm)をもつオンチップ量子もつれ光源の開発に成功した(図 6-4 参照)。

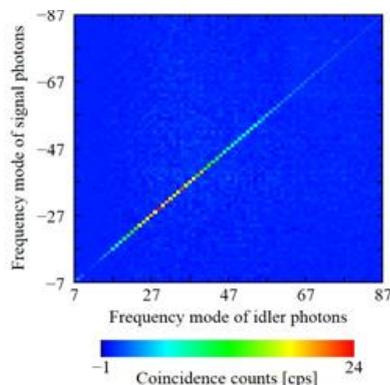


図 6-4 オンチップもつれ光子対源

上記のとおり、量子もつれ光子源に関する項目 1 と項目 4 についてはすでに当初の目標以上を達成しており、応用に関する項目 2 および項目 3 についても、一部の最終目標は実現するなど、本プロジェクト研究開発はきわめて順調に進展していると判断する。

[主要論文]

- [1] K. Sugiura, et. al., Applied Physics Letters, vol. 116, 224001 (2020).
- [2] T. Kiyohara,, et. al., Optica, vol. 7, 1517 (2020).
- [3] T. Ono, et. al., Scientific Reports, vol.7, 45353 (2017).

(5) 樽茶課題 「スピン量子計算の基盤技術開発」

[課題の概要と目標]

量子ドットの電子スピンの量子制御を主概念として、スピン相関と量子コヒーレンスの物理を探索し、高度な量子情報処理へ応用することを目的とする。最終的には、量子コヒーレンス・もつれの物理の解明とそれに基づく新量子技術の開発、量子コンピュータの課題である、量子操作（ビット操作、読み出し、初期化）における誤り耐性閾値の達成、誤り訂正の基盤技術開発、集積化技術と互換性をもつ量子ビット基本構成の提案を目指す。

[主たる研究成果と目標達成状況]

GaAs 量子ドットを用いて、世界に先行して量子ビット多重化を達成した。続けて 3 重ドットによる量子もつれ制御法を新開発し、交換結合を利用した非隣接スピン間の量子もつれ生成、異なる符号化の 2 ビットによる制御位相ゲートの高速化、量子テレポーテーションの原理実証に成功した。以上の実績を材料特性に優れた Si に適用し、3 量子ビットもつ

れ状態の生成に成功した (Si 系で世界初)。さらに、高忠実度の読み出しと初期化に有用な量子非破壊測定の開発に着手し、GaAs、次に Si で原理実証した後、高忠実度での非破壊読み出し、測定結果の帰還による初期化を達成した。大規模化に関しては、既存集積回路と相性の良い MOS 型 Si 量子ドット構造を作製し、多重ドットの量子状態制御を確認した。上記 Si 量子操作の成果に基づいて、集積化に向けて、量子ビット 3×3 配列の基本構成を提案した。

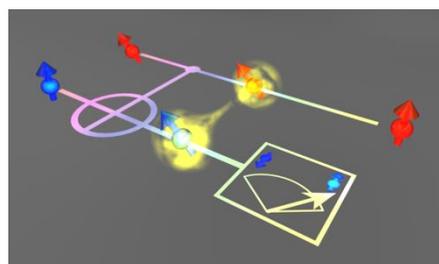


図 6-5 量子もつれを利用した量子非破壊測定概念図 [1]

上記のとおり、これまでに Si への技術移植を前倒しで進め、高忠実度化、非破壊測定など世界をリードする多くの成果を上げており、予定を上回る進捗が得られている。今後、誤り耐性閾値を超える量子ビット操作高忠実度化、量子誤り訂正の基盤技術開発など、当初計画を超えるレベルでの最終目標達成が見込まれており、本プロジェクト研究開発はきわめて順調に進展していると判断する。

[主要論文]

- [1] T. Nakajima, et al., Phys. Rev. X 10, 011060-1-11 (2020).
- [2] K. Takeda, et al., Phys. Rev. Lett. 124, 117701-1 – 5 (2020).
- [3] J. Yoneda, et al., Nature Communications, 11, 1144 (2020).

(6) 蔡課題 「超伝導人工原子を使った光子ベースの量子情報処理」

[課題の概要と目標]

スケールングに有利な、従来の平面配線技術が利用できる新規な量子コンピュータアーキテクチャの実現を目標に研究を進めている。これは量子ビットをチップの周辺部にのみ配置するアーキテクチャであり、量子エラー訂正にも対応できる回路構造を保持している。この回路方式を使い、マルチビット量子チップを作成し、その部分的動作を確認する。

[主たる研究成果と目標達成状況]

擬 2 次元ネットワーク [1] を使い、量子コンピュータ用の集積超伝導量子ビットチップを試作した。この回路方式の特徴は、従来の 2 次元広帯域配線技術を使い、外部とチップ間の入出力配線を実装できることにある。2 種類の量子コンピュータ回路を試作した。一つはクラスター状態生成回路であり、これは完全にゲート操作のみにより実現する回路であ

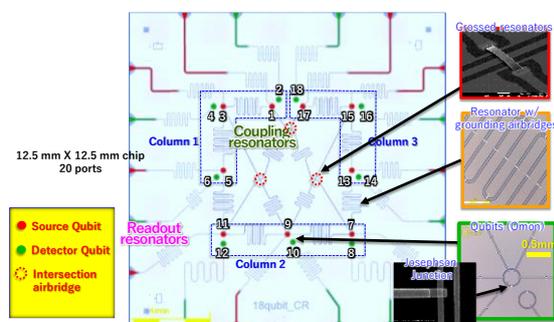


図 6-6 試作した一方向量子計算機

3×3 のアレー相当で、18 物理量子ビットを含む

る(図6-6)。18量子ビットを使い、3×3の量子ビットアレーを実現した(図6-6)。もう一つ試作した量子チップは、現在世の中で最も研究されている表面符号(表面コード)アーキテクチャに対応できるゲートモデル量子回路で、擬2次元ネットワークを取り入れた回路方式で実現した。

上記のとおり、超伝導体量子回路のアーキテクチャについて、一方向量子計算とゲートモデル量子計算の両方に対応できる新規回路を探索し、擬2次元ネットワークを使ったマイクロアーキテクチャを創出した。提案時に設定した方向とは若干異なっているが、諸困難を乗り越えて成果を着実に達成しており、本プロジェクト研究開発は概ね順調に進展していると判断する。

[主要論文]

[1] H. Mukai, et al., New J. Phys., 22, 043013 (2020).

[2] Y. Zhou, et al., Phys. Rev. Appl., 13, 034007 (2020).

[3] R. Stassi, et al., Phys. Rev. A 97, 033823 (2018).

2017年度採択課題

(7)青木課題 「スケーラブルな光学的量子計算に向けた超低損失ナノファイバー共振器 QED 系の開発」

[課題の概要と目標]

光子を用いたスケーラブルな量子計算(誤り耐性量子計算)の実装を可能にする超低損失ナノファイバー共振器を開発するとともに、光学的量子計算の要素技術をナノファイバー共振器 QED 系で実現する。また、このアプローチにおける各要素技術、および、それらを組み合わせて構築される誤り耐性量子計算のアーキテクチャ全体の最適化に関して理論的研究を推進する。これにより、スケーラブルな光学的量子計算の実装への道を拓く。

[主たる研究成果と目標達成状況]

超低損失ナノファイバー共振器開発では、シングルパス内部損失がわずか0.7%の共振器の作製に成功した。光学的量子計算の要素技術実証実験では、ナノファイバー



図6-7 結合ナノファイバー共振器 QED 系

共振器 QED 系の連結性能の実証として、2つの共振器 QED 系を結合した全ファイバー結合共振器 QED 系(図6-7)を構築した。この成果は、多数の小規模な量子計算機を光子でつなぐことで大規模な量子計算を可能にする分散型量子計算機の実現に向けた重要な成果である[1]。さらに、上記の全ファイバー結合共振器 QED 系において、特異な固有モードである共振器暗モードの観測に成功した[2]。また、結合共振器 QED 系を用いた分散型量子計算スキームへの展開を図っており、スケーラビリティに優れた分散型量子計算法に関する特許を出願した。光子生成方式の性能指数に関する理論研究も進めた[3]。

以上のように、当初の計画以上に進展しており、今後はナノファイバー共振器 QED 系の優れたスケーラビリティを活かした、分散型量子計算の実現に向けた研究の展開が期待されるものであり、本プロジェクト研究開発はきわめて順調に進展していると判断する。

[主要論文]

[1] S. Kato, et al., Nature Communications 10, 1160 (2019).

[2] D. White, et al., Phys. Rev. Lett. 122, 253603 (2019).

[3] H. Goto, et al., Phys. Rev. A 99, 053843 (2019).

(8) 神成課題 「波長分割多重プログラマブル大規模量子シミュレータ」

[課題の概要と目標]

フェムト秒レーザーパルスの広帯域スペクトル内の周波数モードを量子計算のリソースと捉え、波形整形技術を用いることによって多重周波数モードの生成過程ならびにモード間量子干渉の制御性を実証する。周波数モード間に任意にデザインされた量子相関を時系列的に光子数測定することで、周波数域での大規模な量子干渉を用いた今までにないプログラマブルな量子シミュレータの構築を行う。

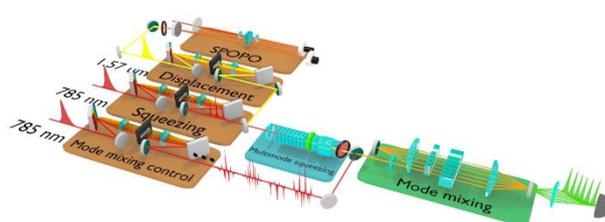


図 6-8 波形整形技術を用いた波長分割多重プログラマブル量子シミュレータ実験装置図

[主たる研究成果と目標達成状況]

量子シミュレータの要素技術として、波長 1550 nm 帯で独立した周波数モードで複数のスクイズド光パルスを生成し個々にその位相と振幅を制御できることを実験から明らかにした。さらに、2つ目は、波長多重量子状態の任意のモード混合（量子ゲート）である。そのためには、量子モードの基底変換の手法として、和周波発生用 Type-II PPLN 結晶が持つ特異な位相整合条件を用い、導波路型 PPLN を用いた実験を行い、周波数変換実験結果を固有値分解解析することで、本手法が 10 モード程度のプログラム可能な線形回路に応用可能であることを実証した。また、直交周波数モード間の Hong-Ou-Mandel 干渉を実証し、任意の線形量子干渉が周波数域においても可能であることを明らかにした。

以上、新しい量子シミュレータ実現のための要素技術開発と損失補正アルゴリズム開発の課題を順調にこなし、個々の要素技術の性能を高め、それらを連動させて動作させる段階に至っており、本プロジェクト研究開発は順調に進展していると判断する。

[主要論文]

[1] K. Wakui, et al., Opt. Express 28, 22399 (2020).

[2] 保坂 他, レーザー研究 48, 472 (2020).

(9)小坂課題 「ダイヤモンド量子セキュリティ」

[課題の概要と目標]

本課題では、ダイヤモンド中の窒素空孔 (NV) 中心における光子と電子の自発的な量子もつれ発光・吸収を基礎とし、光子から核子への伝令付き量子テレポーテーション転写、電子と核子の誤り符号付きのホロミック量子ゲート、シングルショットによる核子間の完全な量子もつれ読み出し、炭素同位体配置の機械学習による量子認証などを行い、量子セキュリティの実用化に道を開くことを目的とする。

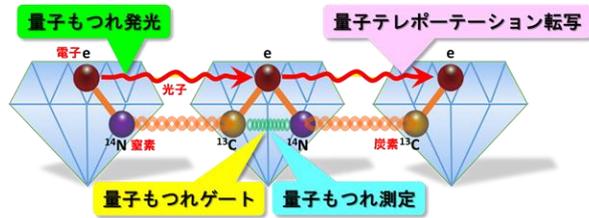


図 6-9 YNU 方式スキームの量子中継

[主たる研究成果と目標達成状況]

当初の計画に従い、量子中継に不可欠な 4 つの基本機能①量子もつれ発光、②量子テレポーテーション転写、③量子もつれゲート、④量子もつれ測定の開発を行い、全てについて完全なゼロ磁場下で完全に量子的な動作と高い忠実度を得ることに成功した。①量子もつれ発光では、狭帯域のゼロフォノン線を用いた偏光もつれ生成に成功した。②量子テレポーテーション転写では、単一光子から単一炭素への転写に加え、複数の炭素で構成されたアダプティブなマルチメモリ転写に成功した。③量子もつれゲートでは、電子スピンと核スピンの間の量子もつれをマイクロ波で操作するホロミックな万量子もつれゲートに成功し、99.5%以上の操作忠実度を得た。④シングルショット量子もつれ測定を行い、古典相関を遥かに上回る 75%以上の忠実度の完全ベル測定に成功した。

上記のとおり、量子中継に不可欠な 4 つの基本機能の開発に成功し、提案時の目標を完全に達成した。量子コンピュータの最有力候補である超電導量子ビットとの組み合わせが可能な完全ゼロ磁場化での量子メモリ動作の実現は、量子インターネットを構成するための量子中継器の実現に道を開くものであり、本プロジェクト研究開発はきわめて順調に進展していると判断する。

[主要論文]

- [1] K. Nagata, et al., Nature Communications, 9, 3227 (2018).
- [2] K. Tsurumoto, et al., Communications Physics, 2, 74 (2019).
- [3] P. Siyushev, et al., Science 363, 728-731 (2019).

(10)齊藤課題 「超伝導量子ビットを用いた極限量子センシング」

[課題の概要と目標]

本研究課題では、量子状態制御技術の新しい応用として期待されている量子センシングに、操作性・拡張性に優れた超伝導磁束量子ビットを活用する。まず、超伝導磁束量子ビットを長寿命化し、単一電子スピン感度を有する局所電子スピン共鳴の実現を目指す。次に、超伝導磁束量子ビット、あるいは、電子スピン集団とのハイブリッド素子を用い、古典限界を超えた高感度・高分解能な量子センサを実現する。

[主たる研究成果と目標達成状況]

図 6-10 に示す局所電子スピン共鳴測定系において、センサ部を超伝導量子干渉計(SQUID)から磁束量子ビットに変更し[1]、読み出し回路を SQUID からジョセフソン分岐増幅器に改良することで、スピン検出の性能指数が、検出感度 10^6 スピン/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、最小検出体積 100 fL から、20 スピン/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、6 fL まで飛躍的に向上した[2]。更なる感度向上に向け、磁束量子ビットのコヒーレンス時間の延長に成功し、磁束量子ビットにおける世界最高のコヒーレンス時間($T_1 = 90 \mu\text{s}$ 、 $T_2 = 130 \mu\text{s}$)を記録した[3]。理想的な測定系を仮定すると、このコヒーレンス時間から単一の電子スピンを検出可能であることが見積もられる。

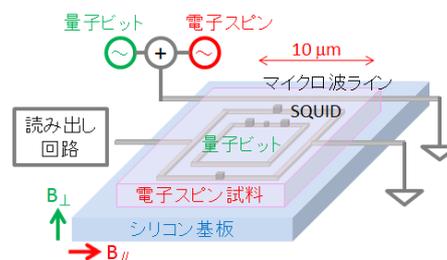


図 6-10 磁束量子ビットを用いた局所 ESR 測定系

以上のとおり、量子状態制御技術の新しい応用として期待されている量子センシングに、操作性・拡張性に優れた超伝導磁束量子ビットを活用し、超伝導磁束量子ビットの長寿命化をはかるなど、研究開発において一定レベル以上の進展があり、本プロジェクト研究開発は順調に進展していると判断する。

[主要論文]

- [1] H. Toida, et al., Commun. Phys. 2, 33 (2019).
- [2] R. P. Budoyo, et al., Appl. Phys. Lett. 116, 194001 (2020).
- [3] L. Abdurakhimov, et al., Appl. Phys. Lett. 115, 262601 (2019).

(11) 仙場課題 「超伝導量子メタマテリアルの創成と制御」

[課題の概要と目標]

本研究課題は「深強結合」など未踏領域の物理現象やハイブリッド量子系を駆使し、革新的な機能を有する超伝導量子メタマテリアル(一般化された分子や量子デバイス集合体)の創成とそのコヒーレント制御を目指す。具体的には次の5つの研究技術開発を推進する。

- ①ジョセフソン量子極限増幅、②窒化物超伝導薄膜技術、③ π 接合超伝導量子回路、④深強結合回路 QED、⑤量子光学的理論手法の応用。

[主たる研究成果と目標達成状況]

①量子ビット・共振器系の量子状態の増幅と修復に関する新プロトコルを開発した。②シリコン基板上に極薄 TiN バッファ層を介した NbN のジョセフソン接合プロセス確立に成功した[1]。③窒化物超伝導体 NbN 及びトンネルバリア層に磁性薄膜を用いたジョセフソン接合の I-V 特性とゼロバイアス電流の磁場依存性より接合が

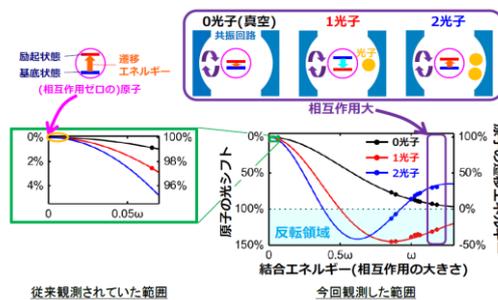


図 6-11 LC 共振回路中の光子数が 0 個、1 個、2 個の時の人工原子の遷移エネルギー

π 位相シフターとして機能することを確認した[2]。④深強結合回路 QED 技術では、共振器中光子数が 0~数個の量子的領域で先行研究より 100 倍以上巨大な量子的光シフト (Lamb シフト、Stark シフト) の観測に成功した (右図) [3]。⑤深強結合領域にあるもつれた量子ビット-共振器系基底状態が量子ビット-共振器間結合と共振器-環境間結合の様式 (容量的 / 誘導的) に敏感であることを理論的に見出した。

上記のとおり、コヒーレンス特性に優れた新型窒化物超伝導量子ビットをシリコン基板上に作製する技術を確認したことや π -磁束量子ビット (量子メタマテリアル) に不可欠な π 位相シフター技術を確認したことは意義深く、本プロジェクト研究開発は順調に進展していると判断する。

[主要論文]

- [1] Q. Wei, et al., Appl. Phys. Exp.13, 126501 (2020).
- [2] T. Yamashita, et al., Sci. Reports 10, 13687 (2020).
- [3] F. Yoshihara et al., Phys. Rev. Lett. 120, 183601 (2018).

(12) 田中 (歌) 課題 「オンチップ・イオントラップによる量子システム集積化」

[課題の概要と目標]

気体原子イオンを電場の力で空中に長時間捕獲するイオントラップ電極に、微細加工技術を取り入れることでオンチップ化し、集積化量子システムを用いた可搬型光クロックの開発、微細加工電極が作る特殊なトラップ電場による新奇量子システムの実装、高性能なトラップデバイス作製技術の研究開発を行う。光クロック開発では、従来の単一イオン型ではなく複数個のカルシウムイオンを捕獲して信号を増強し、市販のマイクロ波クロックよりも 2 桁以上高い安定度を持つ可搬型光クロックを開発する。

[主たる研究成果と目標達成状況]

本研究課題の光クロックは、オンチップ・イオントラップに捕獲した複数個のイオンを用

いて信号を増強し、通常必須とされる大がかりな参照用光共振器を不要にするという独自のアプローチである。これまで複数個化を妨げていたのは個々のイオンの時計遷移の周波数シフトのばらつきであった。本研究課題では、イオンを等間隔に配置する電場がこのばらつきを解消する魔法トラップ電場となることを発見した。そしてこの電場を生成するオンチップ・イオントラップ電極を設計・実装し、イオン数 35 個までの等間隔性の向上に成功した。複数個イオンの光クロック動作には他にも多くの要素技術が必要である。

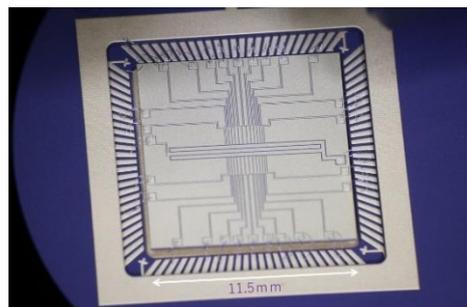


図 6-12 魔法トラップ電場を生成するオンチップ・イオントラップ電極

上記のとおり、本研究課題によってオンチップ・イオントラップのための新たな作製技術が進んでいる。こうした高性能なオンチップ・イオントラップを適用することで目標とする可搬型光クロックが実現できることが期待されるものであり、本プロジェクト研究開発は概ね順調に進展していると判断する。

[主要論文]

[1] K. Hayasaka, et al., 2nd Asia-Pacific Workshop on Trapped Quantum Systems (APTQS-2019) Korea 2019/2/22

(13) 田中(雅) 課題 「強磁性量子ヘテロ構造による物性機能の創出と不揮発・低消費電力スピンドバイスへの応用」

[課題の概要と目標]

従来の半導体デバイスや集積回路では持ち得なかった「不揮発性」「低消費電力」「再構成可能性」「情報処理の柔軟性」「非相反性」の新機能をもつ材料とデバイスを創製することを目的とした研究を行っている。

[主たる研究成果と目標達成状況]

これまでの主な研究成果を挙げる。(1) 世界初の室温以上のキュリー温度 (T_C) をもつ p 型および n 型の強磁性半導体：p 型 (GaFeSb) および n 型 (InFeSb) の作製に成功した。(2) 垂直磁気異方性をもつ単一の強磁性半導体 GaMnAs 薄膜の強いスピン軌道相互作用を用いることにより、従来より 2~3 桁低い電流密度での磁化反転機能創出に成功した。また、InAs/(Ga_{0.8}, Fe_{0.2})Sb からなる二層ヘテロ接合において新規伝導現象と巨大磁気抵抗効果を見出した。さらに、半導体薄膜中でのゲート電圧による波動関数制御により、近接効果磁気抵抗を巨大変調するトランジスタの作製に成功した。(3) 強磁性体半導体ヘテロ接合を用

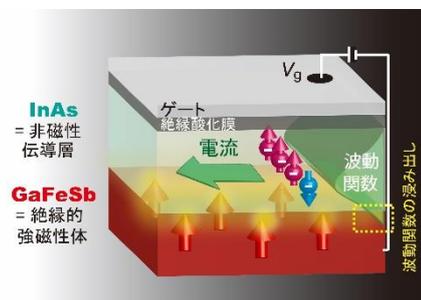


図 6-13 InAs/(Ga, Fe)Sb ヘテロ構想における近接巨大磁気抵抗効果と電界制御

いた縦型 Spin-MOSFET を作製し、スピントランジスタとしての動作を確認した。

上記のとおり、新しい強磁性半導体の創製、p型とn型両方で室温以上のキュリー温度をもつ強磁性半導体の作製と実証に成功、その高機能化、縦型およびスピントランジスタの作製と動作実証など、顕著な成果を挙げており、本プロジェクト研究開発はきわめて順調に進展していると判断する。

[主要論文]

- [1] K. Takiguchi, et al., Nature Physics 15, 1134 (2019).
- [2] M. Jiang, et al., Nature Communications 10, 2590 (2019).
- [3] M. Jiang, et al., Nature Electronics 3, 751 (2020).

2018 年度採択課題

(14) 大野課題 「シリコン技術に立脚した室温動作スピン量子ビット」

[課題の概要と目標]

深い不純物の電子スピンを利用することで量子ビットの動作温度を向上させる。最終的に室温動作を達成し、その急峻な磁場応答を磁気センサーとして応用する。スピン閉鎖による量子ビット読み出しのためには2種の不純物準位が必要となる。そこで中間目標を“意図的に導入した2種の深い不純物を有する量子ビット素子”とし、その後動作温度・磁場感度等のスペック向上を図ることで研究終了時までには上記目標を達成する。

[主たる研究成果と目標達成状況]

研究開始時にトンネル電界効果トランジスタ素子構造に深い不純物 (Al-N 対) を導入、室温までの単一電子伝導 (SET) 特性と温度 10K までの量子ビット動作を確認しており、研究開発はこの既存素子を基準として行っている。深い不純物として Be、S、および Zn に着目、これらをシリコン技術に沿った形で、かつ既存素子同様の濃度プロファイルで素子へ導入した。Be 導入素子において室温 SET 特性と低温スピン量子ビット動作を確認し、Be が既存 Al-N 対と同様に深い不純物量子ビットとなることを示した。S・Zn の両者を導入した素子は現在プロセスの終盤にきている。今年中にプロセスが終了、評価を開始できる見込みである。

上記のとおり、量子ビット動作が確認できれば中間目標を達成する。計画終了時までには最終目標を達成できる可能性は高く、本プロジェクト研究開発は概ね順調に進展していると判断する。

[主要論文]

- [1] K. Ono, et al., Scientific reports 9, 469 (2019).
- [2] K. Ono, et al., Phys. Rev. Lett. 122, 207703 (2019).

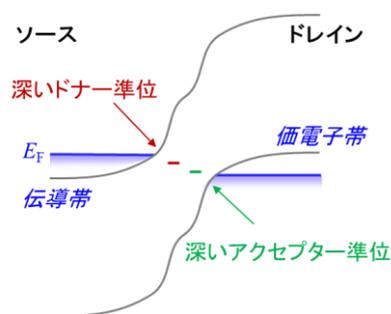


図 6-14 素子ソース・ドレイン方向のポテンシャルと2種の深い不純物

[3] K. Ono, et al., Phys. Rev. Lett. 125, 166802 (2020).

(15) 小関課題 「量子光源による超高感度分子イメージング」

[課題の概要と目標]

本研究課題では、スクイズド真空場を用いることで、標準量子限界感度を上回る超高感度性を有する誘導ラマン散乱(SRS)顕微鏡を開発する。さらに、小型・多波長・高機能レーザー光源の開発を進め、超高感度・多波長 SRS イメージングを実現し、複数種の小さな生体分子の高感度可視化を実証する。さらに、本技術を生物学に展開し、蛍光分子では見ることの難しかった小さな分子が関わる代謝・情報伝達等の可視化を実現する。

[主たる研究成果と目標達成状況]

量子増強 SRS 顕微鏡[1] (図 6-15) のための量子光源の設計[2]と開発を進めた。スクイージングのための光パラメトリック増幅器はすでに動作しており、波長 843 nm において 6 dB 程度の光利得を観測するとともに、干渉度向上のための波面整形に取り組んでいる。並行して、低損失顕微光学系の設計[3]と開発を進めた。さらに、SRS イメージングの応用開

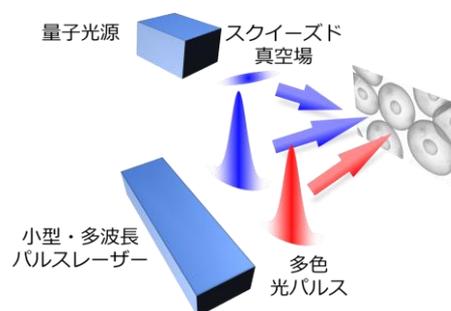


図 6-15 量子増強 SRS 顕微法のイメージ

拓としてホウ素化合物のイメージングなどの研究を進めた。また、多波長パルス発生のためのファイバーレーザー光源の設計、製作を進め、光ファイバーベースの波長 1.5 μm 帯のパルス光源の開発とチャープドパルス増幅、波長 800 nm 帯への波長変換に成功し、順調に開発を進めている。さらに、神経伝達物質可視化のためのラマンプローブの開発を進めている。

上記のとおり、中間報告での目標である(1) 5 dB のスクイージングレベルの達成、(2) 透過率 80%以上の光学系の実現、(3) 平均パワー200 mW 以上のパルス光源の開発のうち、(2)を達成済みであり、(1)(3)も達成見込みであり、本プロジェクト研究開発は順調に進展していると判断する。

[主要論文]

[1] Y. Ozeki, et al., J. Opt. Soc. Am. B 37, 3288 (2020).

[2] Y. Taguchi, et al., J. Opt. Soc. Am. B 37, 1535 (2020).

[3] N. Ochiai, et al., J. Opt. Soc. Am. B 36, 1342 (2019).

(16) 宗宮課題 「量子制御を用いたオプトメカ結合型調和振動子のマニピュレーション」

[課題の概要と目標]

社会のさまざまな場面で利用されている微小信号計測の感度を向上させるには、揺らぎの小さいプローブの開発が必須である。本研究課題では、レーザー光の輻射圧を利用したオ

プトメカニカル結合によって形成される「光バネ」に注目し、量子フィルタを導入して光バネの実部と虚部を操作する技術の開発とその応用を目標としている。応用先としては、巨視的量子力学の検証、重力波望遠鏡、核磁気共鳴の観測、の3つをターゲットとしている。なお、本課題は ANR との日仏共同 CREST 課題である。

[主たる研究成果と目標達成状況]

原理検証実験の第一目標である「光バネの観測」を単光共振器実験において成功した

(図 6-16)。共振器には非線形光学素子が組み込まれており、パラメトリック信号増幅のゲインが光共振器の結合定数に近づくと「光バネの共鳴シフトの観測」が実現できる予定である。単光共振器実験と並行して、暗縞制御したマイケルソン干渉計の信号取得側に高

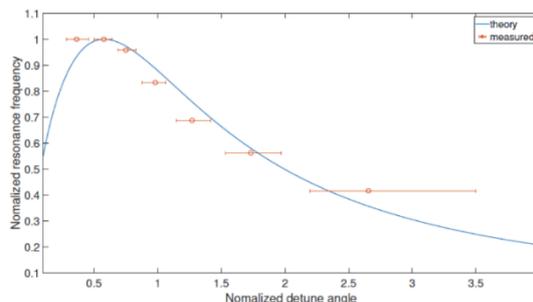


図 6-16 光共振器の離調角を変えて光バネの共振周波数がシフトしていく様子を観測した

反射鏡を設置した信号リサイクル干渉計実験も構築している。応用研究では、「準基底状態の実現」に向けて光学浮上における水平方向の安定性の検証と高磁場勾配を用いた石英片の反磁性浮上に成功した。フランス側ではフォノンニック結晶を用いたマイクロディスク実験を進めており、基底状態の数十倍まで迫る感度を実現した。

上記のとおり、各項目で進捗がある一方で、課題が山積している状況が続いているが、日仏共同研究の成果も出始めており、まだ十分まとまっていないが、本プロジェクト研究開発は概ね順調に進展していると判断する。

[主要論文]

- [1] T. Kawasaki, et al., Phys.Rev.A, 102, 053520 (2020).
- [2] S. Catano-Lopez, et al, Phys. Rev. Lett. 124, 221102 (2020).
- [3] K. Usami, et al, Phys.Rev.Research 2, 043200 (2020).

(17) 永長課題 「ナノスピン構造を用いた電子量子位相制御」

[課題の概要と目標]

磁性体中でスピンと結合する電子系は、スピンの作る角度に対応した実効的ベクトルポテンシャル（創発電磁場と呼ぶ）を感じる。この物理原理に基づき、非共線スピン構造を用いて創発電磁場を、100-1000テスラの強さで、ナノメートル・ナノ秒スケールで自在に操作し、電子の量子位相と運動を制御する。(A)ナノスピン構造を有する物質開発、(B)創発電磁現象の開拓、(C)デバイス開発へ向けた創発電磁機能の開拓、の3つのテーマにつき理論と実験が協働し、創発インダクタと創発ダイオードの原理実証デバイスの作成、の2つを目指す。

[主たる研究成果と目標達成状況]

インダクタ機能開拓では、伝導電子に媒介された磁気相互作用である RKKY 相互作用をもつ希土類化合物 $Gd_3Ru_4Al_{12}$ で、 $\sim 2\text{nm}$ スケールの短周期らせん構造等が現れることを、共

鳴 X 線散乱法により明らかにし (図 6-17)、らせん磁気相では、大きなインダクタンスが生じ、その値は数百ナノヘンリー程度であることを見出した。この素子の体積は従来型の小型インダクタンスと比べて 100 万分の 1 程度であり、インダクタの微細化への突破口を開いたと言える。ダイオード機能に関しては、スピンの非共線構造が揺らぎとして伝導電子を散乱する過程を詳細に検討し、それが磁場下で電気抵抗の非相反性をもたらすことを理論的に明らかにして、MnSi での実験結果を半定量的に説明した。

上記のとおり、インダクタの微細化への突破口を開くとともに、ダイオードに関しても、磁場で制御可能な整流効果で 10 数%の大きさを達成するなど、理論及び実験の両面で当初の想定以上に研究が進展しており、本プロジェクト研究開発は 2018 年度採択課題としてはきわめて順調に進展していると判断する。

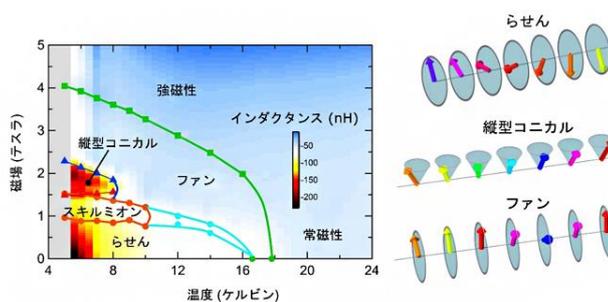


図 6-17 (左) 希土類化合物 $Gd_3Ru_4Al_{12}$ におけるインダクタンスの温度と磁場の依存性。
(右) 磁気構造の模式図

[主要論文]

- [1] N. Nagaosa, et al., Jpn J. Appl. Phys. 58, 120909 (2019).
- [2] T. Yokouchi, et al., Nature 586, 232–236 (2020).
- [3] K. Yasuda, et al., Nature Nanotechnology 15, 831–835 (2020).

(18) 長谷課題 「ダイヤモンドを用いた時空間極限量子センシング」

[課題の概要と目標]

新規ダイヤモンド光制御技術を基盤とし、フェムト秒領域での分光技術、走査プローブ顕微鏡による原子レベルでの空間分解、ダイヤモンドの精密加工、探針増強ラマン効果による局所物性計測技術を融合し、原子層材料などの新規固体機能素子の評価から蛋白質や細胞の解析までも可能にするマルチプローブ光量子技術、即ち新規ダイヤモンド光機能を用いた時空間極限量子センシング技術を開拓する。

[主たる研究成果と目標達成状況]

イオン注入および高温アニールにより窒素-空孔 (NV) センターをダイヤモンド単結晶の表面近傍 (表面下約 30 nm 程) に作成し、フェムト秒時間分解反射率変化測定を行うことで、光カー効果や 2 光子吸収への NV センターの効果を評価し、その結果、特に 3 次の非線形光学効果である光カー効果が 2 次の非線形光学効果 (電気-光学効果) のカスケ

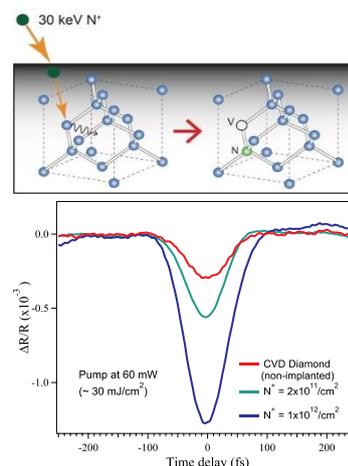


図 6-18 異なるイオン注入量の試料において得られた反射率変化

ード過程により増強されることを見いだした (図 6-18) [1]。また、同様にして表面下約 30 nm 程の層に複数の NV センターを作成したバルクダイヤモンド単結晶表面上にネオジウム磁性粒子を固定し、光検出磁気共鳴法 (ODMR) により磁性粒子からの漏洩磁場の三次元磁気ベクトルイメージングが可能であることを示した [2]。

上記のとおり、これまで基盤的な研究成果に基づき、今後、ナノメートルかつフェムト秒の時空間分解能を有する量子センシング技術開発に向けてさらに研究を加速することを計画しており、研究は概ね順調に進んでいると判断する。

[主要論文]

[1] M. Motojima, et al., Optics Express, vol. 27, 32217 (2019).

[2] D. Prananto, et al., Jpn J. Appl. Phys. vol. 58, SIIB20 (2019).

[3] H. Mogi, et al., Appl. Phys. Exp. vol. 12, 045002 (2019).

(19) 山本課題 「半導体非局在量子ビットの量子制御」

[課題の概要と目標]

本研究課題では、電子間相互作用などによるデコヒーレンスを受けない準粒子「レビトン」を用いた電子の飛行量子ビットの高精度制御や、局在スピンと電子波の結合制御に取り組む。これらを実現することにより、局在量子ビットのみを用いた大掛かりな量子システムから、非局在量子ビットを用いた効率的なハードウェア構成を持つ多機能な量子システムへと、量子アーキテクチャのパラダイムシフトを引き起こすことを目標とする。なお、本課題は ANR との日仏共同 CREST 課題である。

[主たる研究成果と目標達成状況]

レビトンの飛行量子ビットの研究に関しては、飛行量子ビットを制御する電子干渉計の開発とその理論研究、レビトン生成手法の開発を進めてきた。電子干渉デバイスの作製を行い、その評価に取り組むとともに、並列 2 重量子ドット系を用いた量子干渉計の有効モデルを構築し、リード中の複数の伝導チャンネルによる影響などを明らかにした。レビトンの生成に関しては、仏 Neel グループが周波数コムを用いた新しいパルス信号発生手法を開発し、当初予定以上の純度でレビトンを生成できるようになった。

局在スピンと電子波の結合制御に関しては、局在スピンと電子波の結合状態 (近藤雲) の空間的な広がり初めて解明し、これにより、電子波を介した局在スピンの結合を制御する指針が得られた。また、仏 Neel グループの参画により近藤雲形成のダイナミクスを明らかにする実験を新たな課題に加えることができた。

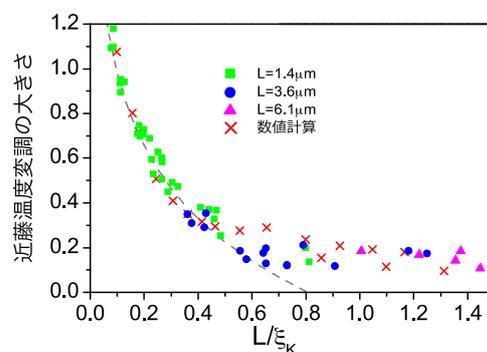


図 6-19 実験的に得られた近藤雲の形状 (横軸は局在スピンからの距離 L を近藤雲の大きさ ξ_K で割った値、縦軸は近藤雲の密度に対応する)

上記のとおり、周波数コムを導入による技術的なブレークスルーによって当初の予定以上のクォリティでレビトンを生成できる目処が立っており、また、局在-非局在ハイブリッド量子系に関しても、近藤雲の観察という世界的に注目される業績を挙げるなど、当初最終目標を大幅に上回る成果が期待でき、本研究開発は順調に進んでいると判断する。

[主要論文]

- [1] R. Sakano, et al., Phys. Rev. B 99, 155106 (2019).
- [2] I. V. Borzenets, et al., Nature 579, 210-213 (2020).
- [3] Y. Teratani, et al., Phys. Rev. Lett. 125, 216801 (2020).

7. 総合所見

本領域が発足して4年が経過したが、量子技術の研究開発状況は、この間に量子コンピュータを中心にして大きく変わった。特に、2020年10月にGoogleが英科学誌Natureに独自に開発した量子回路を用いて「量子超越(Quantum Supremacy)」を、きわめて特殊な演算プログラムではあるが、実証したと発表したことは、政治家や投資家などに衝撃を与えるとともに、ゲート型量子コンピュータの流れを一気に作りあげた。

我が国の量子技術政策も、この4年間で大きく展開した。2018度からは、文科省研究開発プログラム「光・量子飛躍フラッグシップ・プログラム(Q-LEAP)」が10年プロジェクトとして開始した。また、2020年1月には、「量子技術イノベーション戦略」が策定され、「主要技術領域」、「量子融合イノベーション領域」が設定されるとともに、ロードマップが策定された。拠点形成も現在進行している。さらに、ムーンショットプログラムの一つとして、誤り耐性を有するゲート型量子コンピュータの実現を目標としたプロジェクトも2020年度に発足した。このようにして、2020年度は補正予算等も含めると300億円以上が量子技術分野に投入された。

上記状況下において、あらためて中長期的な視座から量子科学のフロンティア開拓を先導し、新しい産業や技術基盤の創出の核となる量子技術を長期的に創成することをめざす本研究領域の存在意義を再確認することは重要であると考え。本研究領域では、図3-1で示したとおり、多様で横断的に研究課題が配置されており、他のプログラムにはない特徴を有している。本研究領域の多様性が将来の量子技術の発展につながるものと確信している。

本研究領域が我が国の一連の研究開発政策の先鞭といえるものの、研究者の一部は、Q-LEAPやムーンショットプログラムなど他の超大型プログラム等にも直接的もしくは間接的に関与しているのが現実である。この分野の研究者が不足しているのでやむを得ないことであるが、やや予算の重複感が否めない状況にある。もちろん、積極的な観点に立てば、本研究領域の実施期間は有限であるので、例えば、2016年度採択課題の研究者の一部がこれらのプログラムにも参画することにより、研究が継続されるとともに人材の育成を長期的に維持できたといえる。以上を十分認識しつつ、本研究領域としては、当初の戦略目標に向けて粛々と研究開発を推進し、今後もその使命を引き続き果たしていく所存である。

個々の課題の進展状況については、全体としてレベルの高い研究成果が達成されており、主要学術雑誌にも多くの論文が掲載されている。特に、当然と言えばそれまでであるが、2016年度採択課題群の達成度が高い。他方、最終年度である2018年度採択課題にも、既に重要な成果を創出している課題が含まれていることは心強い処である。2018年度の採択課題研究代表者の平均年齢は2016年度採択課題と比べて15歳近く低い。このことは、今後この分野を牽引する人材の育成の観点からも重要である。

研究成果について社会的・経済的観点からの貢献について論じるのは、特に量子技術分野ではやや早いかもしれないが、このような要請に応じることを使命として課している。

(B) カテゴリーの研究課題において、社会実装の見通しを与える可能性を含む成果が始めており、今後の発展を期待しているところである。

CRESTとしては、初めてANRと共同で、日仏共同CREST課題を募集した。選考方法などについていくつかの議論があったが、日仏研究者で構成される研究チームが推進する新しい国際連携の試みとして、2課題が無事発足したことは意義深いことであるといえる。

中間評価を2016年度と2017年度採択課題については実施した。2016年度採択課題においては、1課題がA⁺、4課題がA、1課題がB、また、2017年度採択課題では、3課題がA⁺、4課題がAと評価した。ただし、2016年度採択課題群の達成度は、全体として見たときに、質・量ともに他の年度の課題群全体に比べて高く、したがって2016年度の評価基準が2017年度より若干厳しくなっていた可能性も考慮すべきである。なお、2018年度採択課題については、来年度前半に中間評価会を行う予定である。

以上