

ERATO 中村巨視的量子機械プロジェクト 事後評価報告書

【研究総括】

中村 泰信 (東京大学先端科学技術研究センター／教授、
理化学研究所量子コンピュータ研究センター／センター長)

【評価委員】(敬称略、五十音順)

上田 正仁 (委員長；東京大学大学院理学系研究科／教授)

金本 理奈 (明治大学理工学部／准教授)

北川 勝浩 (大阪大学大学院基礎工学研究科／教授)

仙場 浩一 (東京大学大学院理学系研究科／特任教授)

水野 弘之 (株式会社日立製作所 研究開発グループ基礎研究センター／主管研究長)

【評価の概要】

ERATO 中村巨視的量子機械プロジェクト (2016 年 10 月発足) は、中村泰信研究総括が世界に先駆けて独自の研究を構築してきた超伝導量子ビットとそれを用いた量子回路に関する技術を発展させ、高精度な量子状態制御・観測技術を確立することを目標として進められた。幅広い計算問題を効率的に解くことのできる万能量子コンピュータの実現に向けて、誤り耐性を持つ量子情報処理方式を実装するための拡張性の高いプラットフォームを開発するとともに、超伝導量子回路と異種の物理系を融合したハイブリッド量子系の構築により、新たな量子情報処理技術の基礎研究とその応用展開の可能性を大きく飛躍させることを目指してきた。

本プロジェクトは人類未踏の挑戦的な研究であるがゆえに、期待される波及効果は絶大である。近年、超伝導量子回路を用いた量子状態制御技術・量子情報処理技術が飛躍的に向上し、量子ビット研究は現在の個々の物理量子ビットの制御・観測から、誤り耐性を持つ論理層における論理量子ビットの制御・観測へと重心を移しつつある。誤り耐性量子プロトコルの実現により、究極的には、任意の量子状態に任意の回数の万能量子ゲートが施され、任意の時間で量子コヒーレンスが保持できるようになれば、万能量子コンピュータ実現の重要なマイルストーンとなる。また、誤り訂正符号は、2次元集積化された量子ビットのネットワーク上でのトポロジカルな性質を利用するものであり、物性物理などの他の分野との境界領域における新たな科学の創出が期待される。さらに、量子インターフェイス技術は、分散型量子情報処理や、量子中継を用いた量子通信応用への展開が期待される。

本プロジェクトでは、中村研究総括のリーダーシップのもと、超伝導量子回路グループおよびハイブリッド量子系グループの二つのグループで研究を進めてきた。プロジェクト発足から現在まで、以下に代表されるような顕著な成果が得られており、量子情報科学の熾烈な国際競争の中で大きな存在感を示すことができたことは高く評価できる。

超伝導量子回路グループでは、超伝導量子ビットの2次元平面格子への稠密集積化にあたり、超伝導量子ビットの状態制御・読み出しのための配線の負荷を減らした、超伝導量子ビット素子の拡張性の高い構造として、基板貫通電極と垂直同軸線を実装した3次元垂直アクセス方式の提案に成功し、特許出願がなされた。その実装方式の性能を、試作した16量子ビット回路で評価し、世界の競合グループに対する優位性を明確にするとともに、量子ビット周波数のばらつき課題と解決方法を提示した。さらに、当該分野における動向として、本プロジェクト開始当時と比較して、競合グループが誤り耐性量子コンピュータの実現に向けた取組にシフトしはじめた状況に対応するため、当初の計画より先へ踏み込む戦略をとった。具体的には、拡張性の高い構造を維持したまま適用可能な誤り訂正符号の実装への見通しを示すものとして、量

子誤り検出符号の実装検討とエンタングル状態の安定化実験を行い、スケーラブルな実装方式の優位性をさらに押し進める提案を行い、特許出願がなされた。

集積化した超伝導量子ビットを高機能化するためには、量子ビット間で量子情報をやりとりする量子ネットワーク技術が欠かせない。超伝導量子ビットとマイクロ波共振器あるいは導波路中に伝搬する光子の相互作用の理解に寄与する成果として、マイクロ波単一光子の量子非破壊測定に成功した。この実験は離れた超伝導量子ビット間をコヒーレント¹に結合する基本原理の実証として高く評価でき、量子計測・センシング技術などへの応用も期待される。

ハイブリッド量子系グループでは、超伝導量子ビットや超伝導共振回路と、固体中の集団励起の一つであるマグノン、表面弾性波のフォノン、通信に適したフォトンなどが結合したハイブリッド量子系の学理と応用を追求した。その結果、超伝導量子ビットを核としたハイブリッド量子系の制御・観測技術のマイルストーンを次々と達成した。

はじめに、超伝導量子ビットを用いた、表面弾性波の超高感度量子測定に成功した。高い周波数と長い寿命を併せ持つ表面弾性波は、少ない熱励起と長いコヒーレンス時間により、それ自体も量子系として優れた特徴を持つ。ピエゾ効果などの弾性効果を利用することで、固体デバイス中の様々な自由度と結合させることができるため、異なる量子系を結ぶ架け橋としての役割が期待されている。この成果は、表面弾性波フォノンの様々な量子状態制御、超伝導量子ビットとの量子もつれの生成、量子メモリの開発などにつながると考えられる。

次に、強磁性結晶中の単一マグノンの単一読み出しに成功した。これは、光子における単一光子検出器に相当する、単一マグノン検出器を実現したことを意味する。特に顕著な成果であり、マグノニクスやスピントロニクスへ適用することで、スピンの量子揺らぎやその相関といったこれまで捉えられなかった物理量へのアクセスが期待される。

さらに、核磁気共鳴のレーザー光検出にも成功した。電気-機械振動子-光のハイブリッド量子系として共振器オプトメカニクスの原理を応用し、光による新しい核磁気共鳴 (NMR) の検出法を開発・実証した。この成果により、化学分析および NMR の原理を応用した磁気共鳴画像 (MRI) 診断のさらなる高感度測定と応用展開が期待される。

当初計画にはなかった新たな展開としては、超伝導量子回路と結合する電子トラップ量子系の実現を目指した研究において、電氣的に浮いた電子を非接触で冷却する技術の開発を開始した。低温環境で電子を捕獲するために必要な技術として、原子の光イオン化による低エネルギー電子源を利用した電子検出器の開発に成功している。

本プロジェクトの研究期間中の大きな展開としては、発足 2 年目の 2018 年 10 月に、文部科学省の光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) が発足したことが挙げられる。中村研究総括は、この Q-LEAP における量子情報処理 (主に量子シミュレータ・量子コンピュータ) 技術領域において、Flagship プロジェクトの研究代表者に選出された。これを受け、本プロジェクトおよび Q-LEAP プロジェクトは相互に連携・協力し、超伝導量子計算プラットフォームの構築と運用に向けて統合的に推進することになり、ハードウェア基盤の統合に向けた調整を行った。本プロジェクトの成果は Q-LEAP プロジェクトに継承されており、冷凍機、チップ、周辺エレクトロニクスの設計や量子ゲートの実装に好影響を与えたと評価できる。超伝導量子コンピュータ実現の基盤技術としてのさらなる発展が期待される。

また、2021 年 4 月には理化学研究所に量子コンピュータ研究センター (RQC) が発足し、中村研究総括がセンター長に就任した。同センターでは 14 の研究室が集結し、日本の量子研究を牽引し、世界トップレベルの研究が進められている。このことは同研究所にも拠点を置く本プロジェクトのさらなる加速につながった。

本プロジェクトの一連の成果は、2022 年 3 月末までに査読付き学術論文 84 報、書籍・総説

¹ コヒーレント：波と波が干渉し、干渉縞が生じている様子。

32 編、国際会議での発表 322 件、国内会議での発表 373 件を通じて積極的に外部に発表されている。また、プレス発表、アウトリーチ活動を通じ、専門分野以外の一般に対しても成果がアピールされている。質・量ともに十分な成果が発表されたといえる。研究成果の実用化を目指した特許出願は 44 件（国内 23 件、海外 21 件）であった。受賞は、朝日賞、Clarivate Highly Cited Researchers、APS Fellow、文部科学大臣表彰若手科学者賞、超伝導科学技術賞、Micius Quantum Prize など、計 25 件であった。

以上を総合すると、本プロジェクトは、超伝導量子ビットを中心とした量子状態の高度制御・観測技術の実現に向けて、全体的に大幅な進捗が見られ、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」の達成に資する十分な成果が得られていると評価する。

1. 研究プロジェクトの設定および運営

1-1. プロジェクトの全体構想

本プロジェクトでは、多数の量子ビットからなる人工的な量子系を構築し、その量子状態に対する高精度の制御・観測技術を確立し、誤り耐性を持つ量子情報処理技術実装のための拡張性の高いプラットフォームを提供することにより、ファインマンにより予言された、量子力学という物理の基本法則に従う量子コンピュータの実現を目指している。複雑かつ柔軟な量子機械の実現を通じ、量子物理や量子工学に関する理解を深めるとともにその裾野を拡げることにより、新たな科学の基盤技術の創出と量子情報科学の発展に貢献する。

本プロジェクトの全体構想では、超伝導量子回路を用いた次の 3 つの巨視的量子機械をベースとして、シナジー効果を高めつつ相互補完的に進める戦略をとり、世界的な研究開発競争のなかでトップ集団に位置付けられる研究を展開した。

3 つの巨視的量子機械：

超伝導量子ビット 2 次元稠密集積化と誤り訂正符号実装に向けた量子制御により、制御可能な大きなヒルベルト空間²を実現する

マグノンやフォノンといった固体中の集団励起における巨視的な自由度を利用するハイブリッド量子系を用いて、より幅広いエネルギー領域と、より大きな空間的広がりにもわたる量子制御を実現する

超伝導量子ビットの 2 次元稠密集積化は、超伝導量子コンピュータの実現に向けて避けて通ることの出来ない重要かつ基本的な課題である。メディアでは量子ビット数だけが盛んに取り上げられているなかで、本プロジェクトでは近い将来に限界を迎えようと考えられる超伝導量子回路の大規模化において、いずれは取りまなくてなくなる課題を先取りして設定し、他の競合グループに対する優位性を確保するという戦略をとった。巨視的な量子機械の構築につながる新たな学際的分野の創出と基盤技術の確立を目指すという点も兼ね備えており、国内外の量子情報科学研究を牽引するに相応しい構想といえる。実際、2021 年度から開始したムーンショット型研究開発制度・目標 6 では、量子ビットと共振器モード・導波路モードとの結合、量子光学ネットワーク構築も主要テーマとなっていることから、本プロジェクトの全体構想の描き方において、既存研究の延長線上に無いユニークさ、かつ、先見性の高さがうかがえる。中でも、誤り訂正符号実装に向けた量子制御は、誤り量子耐性量子計算を目指した基盤技術の確立につながる重要なマイルストーンである。これは 2019 年 10 月に Google が公表した

² ヒルベルト空間：量子力学的状態を数学的に表せる複素数を係数にもつベクトル空間。

Quantum Supremacy³実証の次のブレイクスルー技術として位置づけられており、実現の期待が高まっている。

優れた制御性を持つ超伝導量子集積回路の実現は、量子計算へ向けた取組以外にも、様々な関連研究領域への波及効果を持つ。例えば、量子多体模型に相当する回路を構成し、相関やダイナミクスを調べるアナログ量子シミュレーション、量子系のハミルトニアン³の時間発展を効率的に解くことを可能とし、量子化学計算などへの応用が期待されるデジタル量子シミュレーション、量子系における情報と熱力学の関係を考える量子情報熱力学、断熱的な量子状態の制御により最適化問題の解を探索する量子アニーリングなどが挙げられる。

超伝導量子回路は、極低温環境下でマイクロ波のエネルギースケールでのみ動作可能であるという制約を持つ。そこで、超伝導回路上にマイクロ波量子光学ネットワークを構築し、物理的に離れた超伝導量子ビット間をコヒーレントに結合し、量子ビット数が増えた場合でもウェハを超えて超伝導量子コンピュータを拡張できる技術の実現が期待されている。そのためには、マイクロ波と光という異なるエネルギー領域の量子情報を接続する必要がある。量子通信ネットワーク上で必要とされる量子もつれ中継技術など分散型の量子情報処理技術の実現に向けて、光量子通信技術と超伝導量子回路技術の融合が必須である。

ハイブリッド量子系グループでは、超伝導量子ビットを核として、マグノンやフォノン、光子などの異種量子系との間をコヒーレントに接続する量子インターフェイスの実現を目指しており、極めて創造性の高い分野融合的なアプローチをとっている。また、ハイブリッド量子系は、個々の量子系の可能性の飛躍的な向上を促し、量子センシング技術における信号を伝達するためのトランスデューサとしても重要な役割を果たすことが期待される。

1-2. プロジェクトの目標・計画

本プロジェクトで設定している大きな目標の根幹は、単に超伝導量子ビット数を増やすだけでなく、誤り量子耐性量子計算を目指した基盤技術の確立という質的な変換を目指している点にあり、特に後者は世界的に見ても非常に挑戦的かつ野心的な目標設定である。

本プロジェクト開始当初は、既に巨額の投資を始めていた海外勢に対して勝ち目はなく、目標が高すぎるのではという見方もあった。しかし中村研究総括から「IBM や Google と戦う」という強い決意が示され、本プロジェクトの実現に至っている。仮に、超伝導量子ビット集積化の研究には取り組まないという判断をした場合、世界で繰り広げられている量子コンピュータ研究開発の熾烈な戦いにおいて日本は完全に取残されていたといえる。

超伝導量子ビット 2 次元稠密集積化と誤り訂正符号実装に向けた量子制御にあたって、グループ独自で創出したアイデアを具現化するステップが明確に示された。具体的には、2 次元格子状に配置された量子ビットを、3 次元方向に配置された配線で制御し、読み出しに十分な結合強度を確保しながら拡張性を徹底的に追求する、極めてユニークな設計思想に基づいた計画である。達成目標は、2 次元稠密集積化された 10×10 サイトの超伝導量子ビット列の実装、その部分系 (18 ビット) における個々の量子ビットの制御・観測、隣接する量子ビット間の 2 量子ビットゲートの高忠実度の実現、3×3=9 個の物理量子ビットへ 2 次元表面符号を実装することによる 1 論理量子ビット制御、1 論理量子ビットとしての誤り検出機能の実証、接続符号化に向けた 2 論理量子ビットゲートの実装である。これらは 5 年という研究期間を考えると、特に 2 次元表面符号の実装は極めて挑戦的なハードルの高い目標である。

超伝導回路上のマイクロ波量子光学ネットワークは、光の帯域で確立されている量子技術の

³ Quantum Supremacy : 現在のスーパーコンピュータでは長い時間がかかる何らかの計算を、量子コンピュータが高速に実行できること。

マイクロ波版の整備を目指している。達成目標は、任意波形単一光子源や単一光子非破壊検出技術の開発、離れた量子ビットをコヒーレントに結合するために必須となるマイクロ波単一光子と量子ビットとの量子もつれゲートなどを組み合わせた、伝搬モード上の単一光子量子光学実験プラットフォームの確立である。また、量子ビット集積化の障害となりうる、体積や内部損失の大きなフェライト製マイクロ波サーキュレータを置き換えることを目的とした、超伝導回路を用いたオンチップ非相反素子の開発は、原理的な観点からその実現可能性を考える必要のある挑戦的な課題である。これらは、学術的基盤のみならず量子技術としても意義のある目標である。

ハイブリッド量子系では、超伝導量子ビットを核とした新たなハイブリッド量子系の構築、異種量子系における量子状態制御・観測技術の実現、マイクロ波-光の双方向高効率情報インターフェイスの実現、量子情報科学・量子光学的アプローチを活かした物性研究ツールの可能性の探求を目指している。超伝導量子ビットの持つ大きな双極子モーメントと、強い非線形性を利用したマグノンや表面弾性波とのインターフェイスの実現は原理的な手がかりがなく、特にハードルの高い目標設定である。

以上のように、全体的に極めて目標が高く、挑戦的な研究テーマと目標を掲げている。研究期間に限定せず長期的に見れば、巨視的量子機械の具現化へ着実に近づく研究計画である。いずれも基礎物理に根ざした野心的・挑戦的な目標・計画であり、積極的に評価したい。また、それらの目標に対して、世界の研究動向を踏まえながら、新しい着眼点をもって最先端を切り拓いたといえる。なお、目標の設定にあたっては工夫が必要であり、高過ぎても低過ぎても問題がある。例えば、複数のステップ（達成必須な目標、チャレンジ目標など）で設定するなどの方法もあり得るのではないかと考えられる。

記録しておくべきこととして、本プロジェクトでは、2018年のQ-LEAPプロジェクト立ち上げに伴い、本プロジェクト終了後も成果を継続的に発展させていくことを見込んだ計画に上方修正した。より詳細には、本プロジェクトで想定していた 3×3 格子における誤り訂正符号は、 $4\times 4=16$ 量子ビット系の部分系を用いて実行し、18量子ビット系における論理量子ビット間のゲート実行は $8\times 8=64$ 量子ビット系で実装することとした。これらのハードウェア基盤の統合は、冷凍機的设计、チップ的设计、周辺エレクトロニクス的设计やゲートの実装にわたり大きな影響を及ぼしたが、限りある時間的・人的資源の中でより効率的な遂行に取り組んでいる。統合作業は2019年度前期にほぼ完了し、統合したハードウェア基盤の実現を念頭に設計・開発を継続した。

両プロジェクトの達成目標について、2021年度末終了の本プロジェクトは9量子ビットの誤り検出符号の実装および誤り検出符号上における18論理量子ビットゲートの実行であり、Q-LEAPプロジェクトは発足5年後（2023年度）に50量子ビットを超える集積量子系の実現と2量子ビットゲート誤り率1%以下の達成、クラウド公開による近似型量子計算のアプリケーション開発としている。同時期の達成目標を互いに相補する形で、ハードウェア基盤を共有しながら効率的に進めた。Q-LEAPプロジェクトの発足後、速やかに、文部科学省および科学技術振興機構が緊密に連携したことにより、共通するハードウェア基盤部分における支援を強化できたと判断できる。なお、本プロジェクトは量子誤り耐性を目指しているという点においては、Q-LEAPプロジェクトの先を見据えているともいえる。今後は本プロジェクトの量子誤り訂正符号化とQ-LEAPプロジェクトの大規模集積化との融合が期待される。

1-3. プロジェクトの運営

本プロジェクトでは、超伝導量子回路研究グループ（超伝導量子演算チーム、超伝導量子回路工学チーム、理論量子情報科学チームから構成）およびハイブリッド量子系研究グループの

2つのグループを設置し、新進気鋭の若手研究者である、田淵 豊氏（東京大学 先端科学技術研究センター／助教 ※発足当時）、宇佐見 康二氏（東京大学 先端科学技術研究センター／准教授）をグループリーダーに抜擢した。各グループに主体性を持たせつつも、全体としてシナジーの高い融合的かつ一体感のあるプロジェクトとしての運営が実現できたことは研究総括の研究者としての求心力とリーダーシップが発揮された結果であり高く評価できる。

研究総括の補佐をするヘッドクォーターでは、研究成果の情報収集・発信、知的財産の管理、成果展開の立案・遂行、プロジェクト実施計画の企画立案、各種報告会、アウトリーチ活動などの開催、他の研究機関・JST との連絡調整、研究付帯業務などを担っており、総勢 71 名のプロジェクトを束ねる中心的な組織として重要な役割を果たした。

本プロジェクトでは、東京大学 先端科学技術研究センター、理化学研究所 創発物性科学研究センター（2021 年度から量子コンピュータ研究センター）の二箇所を主な研究実施場所として設定するとともに、それぞれにヘッドクォーターを設置した。超伝導量子回路集積化に向けた回路設計や回路評価実験・マイクロ波量子光学実験、ハイブリッド量子系の開発・評価を行う東京大学のメンバーと、超伝導量子回路作成技術の開発・評価を担当する理化学研究所のメンバーが互いに頻繁に行き来している。メンバー間の情報・意識共有を目的とした全体ミーティングやジャーナルクラブの定期的な開催の他、各グループあるいは各チームが独自に開催するミーティングの定期的な開催、週報の共有など、様々な形で連携が図られている。さらに、**Q-LEAP** プロジェクト発足後は、**ERATO** 全体会議および **Q-LEAP** 量子情報処理の領域会議を合同で開催し、ヘッドクォーターが中心となってサポートした。

中村研究総括はプロジェクト全体を俯瞰し、グループリーダーに任せられることは任せることにより、各グループリーダーあるいはチームリーダーがリーダーシップを発揮できる柔軟な運営体制がとられている。同時に、研究総括による細やかな気配りがプロジェクト全体に行き届いており、若手研究者の活躍と成長を促している。産・学、国内外、理論・実験を問わず、多様なバックグラウンドを持つ多数の有力な研究者（京都大学、大阪大学、名古屋大学、東京医科歯科大学、国際基督教大学、帝京大学、沖縄科学技術大学院大学、早稲田大学、情報通信研究機構、産業技術総合研究所、東芝、NTT、NEC、ボールウェーブ社など）が活発に議論しながら、互いに良く連携して有機的な協力体制のもとで研究を推進することにより、学術的研究と技術開発をバランス良く進め、大きな成果を生み出している点は高く評価できる。参画研究者の平均年齢の若さが際立っている点、全体として、常に活気に満ち、学術的にオープンであり、各方面から優秀な研究者を自然と惹きつけている点でも大変魅力的なプロジェクトである。

なお、2018 年 10 月の **Q-LEAP** プロジェクトの発足を受け、量子コンピュータ実現に向けた各プロジェクトの役割分担と相互連携について、文部科学省および科学技術振興機構において協議を行った。本プロジェクト終了後も **Q-LEAP** プロジェクトで成果を継続的に発展させていくことを見込んだ計画に上方修正しつつ、役割分担としては、本プロジェクトは当初の計画どおり要素技術の開発に注力し、**Q-LEAP** プロジェクトは、本プロジェクトで培われた量子コンピュータの技術基盤を活用した研究開発を担当している。なお、本プロジェクトおよび **Q-LEAP** プロジェクトのヘッドクォーターが協力し、研究計画書・研究報告書の共有、評価体制の連携、研究報告会の合同開催などに取り組んでいる。

本プロジェクトでは、既に 40 名近い若手研究者が独立して研究室を立ち上げたり、さきがけなどの個人研究予算を獲得したりするなど、国内外の関連分野の更なる活性化に寄与しており、次世代の研究リーダーの育成につながっている。

多くの人材の輩出は喜ばしい点である一方で、研究者の補充にも力を入れる必要もある。**Q-LEAP** プロジェクトと合わせると 10 年以上の長期プロジェクトであり、技術蓄積と人材ローテーションのジレンマは避けては通れない課題となる。本プロジェクトで扱う技術レイヤーは深く、各レイヤーで高度な専門性を担う研究者が多数必要となるため、あるレイヤーの研究者が

プロジェクトから抜けたときにもそれを補うことができる体制の工夫、全体を見渡せる（あるいは複数階層をつなげることができる）人材の育成を継続していくことが重要である。また、プロジェクトの構成員全員が研究者として論文執筆を研究成果と規定するだけでは、コンピュータの開発がエンジニアリングの要素を多く含む点で難しい側面がある。「リサーチャー」、「エンジニア」、「テクニシャン」のように人材の役割をある程度明確に区別し、それぞれに適した育成と評価制度の構築が望まれる。本プロジェクトを通じて、これらの課題への挑戦を期待したい。

今後の課題としては、“量子コンピュータ開発”として見た場合の Google や IBM などと比較した場合のプレゼンスについては、産業界との連携や省庁間の連携などを進めることにより、さらに効果的な方法を見出すことを期待したい。

全体としては、専門の異なる優秀な若手研究者を内外から集め、存分に活躍できる場を与え、挑戦的・創造的・融合的な研究の実現を期待させる相互作用を促すとともに、人材育成を行うリーダーシップが発揮されており、日本の研究プロジェクトのロールモデルとなる素晴らしい研究プロジェクト運営であると評価できる。

【研究プロジェクト（領域）の設定および運営】 a+（十分に的確かつ効果的である）

2. 研究の達成状況および得られた研究成果

2-1. 超伝導量子回路グループ

本グループは、大規模かつスケーラブルな超伝導量子回路の実現のための技術開発を目指している。プロジェクト前半では、超伝導量子ビットを稠密に 2 次元平面格子へ集積化するにあたり、集積化で世界の先頭を走る Google、IBM の方式と比較してスケーラビリティに優れた独自の配線方式として、基板貫通電極と垂直同軸線実装による 3 次元実装方式を提案し、特許も出願した。プロジェクト後半では、その実装方式の性能を $4 \times 4 = 16$ 量子ビット回路を作成して評価し、漏話⁴量が競合グループ（上海交通大学、オックスフォード大学など）と比較して 10dB 以上改善される優位性を明らかにした。実用に向けて漏話量のさらなる改善が期待される。また、2 量子ビットゲートの動作評価から量子ビット周波数のばらつきの課題と解決方法を定量化するとともに、誤り訂正符号を実装する将来の誤り耐性量子コンピュータの実現に向けて、スケーラブルな実装方式の優位性をさらに押し進める実装提案と特許出願を行った。

具体的には、2 次元格子上に配置された量子ビットを結合させ、制御・観測のための配線を上下の 3 次元方向に取り出す構成を実現した。現在、世界の主流であるフリップチップ方式に比して配線の負荷を減らすとともに、量子ビット数に対する配線密度を一定にすることに成功した。ほぼ同一の量子ビット配置パターンをタイル状に配置してスケーラブルに拡張できる点で画期的な方式といえる。超伝導量子ビットを大規模集積化していく際の最大の難所はその制御・観測に関わる配線技術であり、大規模化に伴う配線の複雑化による漏話量の増加が量子ビットの忠実度やコヒーレンスに悪影響を及ぼすことが世界的にも明らかになってきている。

本プロジェクトで最も重要視した点の一つは、信号整合性（シグナルインテグリティ）の確保である。シリコン基板の上部に位置する超伝導量子ビットに対し、制御・観測信号が、シリコン基板の上面や裏面から基板内部を垂直に伝搬する構造をとる必要がある。緻密な電磁界数値計算による検討の結果、基板貫通電極の導入により、量子ビット読み出しに必要な読み出し信号線との結合を十分に確保しつつ、信号の周波数多重化により、配線数の削減（IBM の方式に比べて 37.5%削減）に成功した。また、基板貫通電極の導入などによる実装方式は、基板内の

⁴ 漏話：線間の結合による信号やノイズの伝播のこと。クロストークともいう。

電磁界モードの空間的な閉じ込めによる漏話抑制、寄生電磁輻射モードと呼ばれる結合の抑制に寄与することを明らかにした。この実装方式は、漏話量を局所的で小さな値に抑え込み、Google、IBM、Rigetti などのグループの方式と比較して、大規模化に際して優位性をもつことを、実験データおよび量子ビット素子構造のバンド計算結果から実証された。エビデンスを持って実証したことで Q-LEAP プロジェクトへの研究展開においてもさらなる改良が期待される。

世界の研究グループがしのぎを削るなかで、Google や IBM は超伝導量子ビットをベースとした万能量子コンピュータの実現を目指しており、大規模な NISQ⁵システムの実現に向けて先頭を走っている。しかし、その回路の正確な動作においては忠実度や配線ノイズの課題で苦戦しているところが見受けられる。そこで量子計算の正確性を確保するために、NISQ にとどまらずに量子誤り訂正回路を適用する誤り耐性量子コンピュータを目指す動きも世界的に進み始めたところである。

本プロジェクトでは、開始当初からスケーラブル実装方式を誤り耐性量子コンピュータに対して適用する提案を行っている。なかでも、(i)表面符号による誤り訂正の最小単位となる量子ビット群による単位胞をタイル上に配置する提案、(ii)固定周波数量子ビットの周波数衝突が発生しないように周波数の種類を 8 つに絞り、周波数のばらつきに対して量子ビット周波数の事後調整法を導入する計画、(iii)その誤り訂正演算のために希釈冷凍機内で動作可能なオンライン復号器としてスパイクニューラルネットワークを用いた回路の設計が完了したことは、誤り耐性量子コンピュータ実現に向けた青写真の明確化に大きく貢献した。

2016 年に開始した本プロジェクトは、NISQ システム実現を目指した 2018 年の Q-LEAP プロジェクト立ち上げに伴い、ERATO 終了後も成果を継続的に発展させていくことを見込んだ計画に上方修正している。また、大規模な NISQ システムが実現されれば、その先に大規模な物理量子ビットによって論理量子ビットを実現する誤り耐性量子コンピュータに発展することが想定され、誤り耐性汎用量子コンピュータ実現を目標に掲げたムーンショット型研究開発制度・目標 6 が 2020 年度にスタートした。先見性を持って配線問題を取り上げ、ERATO にてスケーラブル実装方式を提案するとともに、さらにその方式を発展させて誤り耐性量子コンピュータ適用の方向性を示し、世界のグループと戦えるコア技術を確認したことは、本プロジェクトのエンジニアリング面での最大の成果といえる。

本プロジェクトが目指した量子誤り検出符号の実装については、ベーシックな表面符号でのエンタングル状態（ベル状態）安定化の実験に成功するとともに、7 量子ビット、11 量子ビット回路で量子誤り検出・訂正符号の実装に取り掛かっている。特別に用意した特殊な系でのデモンストレーションではなく、スケーラブルを目指す実システム上の量子ビットを用いて実験が行われたことは大きな意義があり、誤り耐性量子コンピュータへの展開が期待される。また、4 体相互作用と呼ばれる複雑な制御を必要とせず、2 つの量子ビット間におけるパリティ測定のみで誤りが抽出される 2 体相互作用を用いた、論理量子ビット演算が実行可能な新たな表面符号を提案したことも評価できる。

なお、上記のようにスケーラブル実装戦略の継続的な発展の可能性を示したことは、本プロジェクトの開始当初に想定していた以上の大きな成果ではあるが、一方で、当初の個別目標事項の達成状況からは、いくつか進捗の遅れが見受けられる。2 量子ビットの忠実度がやや目標値を下回ること、 $4 \times 4 = 16$ 量子ビット中の 11 量子ビットを用いた量子誤り訂正を含む符号での実験データはまだ得られていないこと、 $8 \times 8 = 64$ 量子ビット回路は完成しているものの、実験は 2022 年 1 月に開始されたことなどが挙げられる。これらは、きわめて挑戦的な目標設定である

⁵ NISQ : Noisy Intermediate-Scale Quantum Computer の略。小・中規模でノイズを含む量子コンピュータ。

こと、研究期間中に Q-LEAP プロジェクトにつながる計画を取り込んだこと、2020 年からの新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の流行によって実験機器の納入時期や外国人ポスドクの雇用の遅れが原因となっている。一方で、例えば忠実度や量子誤り訂正については量子ビット周波数をレーザーアニーリングによって調整するなどにより周波数衝突による問題を解消できることが今後の対応策として用意されており、引き続きの検証が計画されていることは評価できる。

本プロジェクトでは、基板貫通電極を形成するための平滑な内壁を実現するスルーシリコンビア(TSV)の作製技術や 10^6 を超える Q 値を実現する窒化チタン(TiN)薄膜技術などの超伝導量子ビット集積化技術も大きく進歩した。量子コンピュータを外側から扱うための周辺エレクトロニクスシステムやソフトウェアツール群、インターフェイスとなるジョセフソンパラメトリック増幅器やサーキュレータの技術、量子ビットの較正を正確に行う技術、量子ビット評価のためのリソースとして高次のユニタリ t-design と呼ばれる構成法の開発でも進歩が認められ、新産業創出へ向けた全体のレベルアップが得られている。

サイエンスの観点では、マイクロ波伝搬光子の量子非破壊測定の実現も超伝導量子回路グループのマイクロ波量子光学の大きな成果である。光子の存在を明らかにしつつ、その光子が反射されて伝搬し続ける、伝搬光子の量子非破壊測定に成功した。従来は、マイクロ波光子をエネルギーとして吸収して検出を行うため、検出後にそのマイクロ波光子を直接利用することができなかったが、超伝導回路上の量子ビットを反射型の検出器として用いることにより、マイクロ波単一光子を吸収せずに、その飛来を検知することができた。具体的には、超伝導量子ビットと伝搬光子の間で量子状態を転写できることを活用し、高感度なジョセフソンパラメトリック増幅器を用いて、光子の反射によって誘起された量子ビットの状態変化を検知し、検出効率 84%、暗検出確率 0.0147 という高精度で、マイクロ波単一光子検出を実現した。シリコン基板上に集積化された量子ビット素子をモジュール間で接続する量子ネットワークや量子計測・センシングへの応用が期待される。

さらに、単一光子状態の量子トモグラフィでは損失補正なしで非古典性の観測に成功した。エネルギーの高い光の領域での光子の量子非破壊検出は既の実現されているが、これをマイクロ波光子で実現したことで、マイクロ波量子光学の大きな進展が期待できる。既存の量子光学理論やモデルの普遍性を実証し、光帯域では手の届かなかったパラメータ領域で新しい概念や理論を生み出すという意味で学術的価値も高い。

このマイクロ波量子光学の成果としては、他にも量子ビットの輻射崩壊を防止しつつ高速な量子ビット動作を可能とするジョセフソン量子フィルタや、35 個の伝搬マイクロ波光子列からなる 1 次元クラスター状態の生成とその評価が挙げられる。

2-2. ハイブリッド量子系グループ

ハイブリッド量子系グループでは、超伝導量子ビットを核とした新たなハイブリッド量子系の構築、異種量子系における量子状態制御・観測技術の実現のほか、超伝導量子回路をノードとする光量子情報ネットワークの実現に向けた、極低温環境下の超伝導量子回路中で操作されるマイクロ波領域の光子と常温でも量子情報を担保できる光の領域の光子の信号を双方向に高効率に変換する量子インターフェイスの実現、量子情報科学・量子光学的アプローチを活かした物性研究ツールの可能性の探求を目指してきた。

本グループの代表的な成果としては、(i)単一マグノン量子の検出、(ii)光による新しい核磁気共鳴(NMR)の検出法の開発・実証、(iii)表面弾性波共振器中のフォノンの高感度測定、(iv)超伝導回路を使って電子を捕獲・冷却する技術が挙げられる。これらの成果は、超伝導量子回路を核にマグノン、フォノン、マイクロ波、光子などを量子レベルでパラメトリックに観測・変

換・状態制御する技術を開拓したサイエンスの成果であり、量子技術の発展とその社会展開につながるものである。当グループは、この分野の世界的なアカデミア交流の1つの中核グループとして位置づけられてきており、ハイブリッド量子系の成果は本プロジェクトのサイエンス面での極めて大きな成果といえる。

(i) 単一マグノン量子の検出は、強磁性マグノンの準粒子を世界で初めて 1 量子レベルで検出した取組であり極めて大きな学術的成果である。これにより「量子マグノニクス」、「共振器マグノニクス」と呼ばれる学問分野を創生し、磁性体の諸特性を量子レベルで解明可能な新たな精密分野として世界的に注目され発展が続いている。具体的には、マイクロ波共振器モードの仮想励起を介してイットリウム・鉄・ガーネット (YIG) 試料中のマグノンと超伝導量子ビットとを相互作用させ、マグノン数に応じて超伝導量子ビットの共鳴エネルギーがシフトする強分散領域と呼ばれる状況を実現し、この領域で可能となるマグノン数に応じた条件付きの超伝導量子ビットの操作を利用することで、単一マグノンの単一事象読み出しを量子効率 0.71 で成功した。このような微弱なマグノンの観測技術は、単なる実験系の工夫から生み出されたものではなく、量子系の緩和、相互作用、巨視的集団モードなどを扱う物理学を共振器量子電気力学という新たなサイエンスツールに展開し、深く実験系を進展させてきた研究総括を中心とした研究者集団があつてこそ生まれた成果である。微弱なマグノンを検出する技術は、ダークマターを観測する技術や新たな微弱信号を検出するセンシング技術への発展が期待できる。

(ii) 光による新しい核磁気共鳴 (NMR) の検出法の開発・実証もセンシング技術、特にオプトメカニクス技術の大きな成果である。NMR 信号をファラデー誘導起電力としてピックアップコイルから LC 回路に結合し、LC 回路のキャパシタの一部を構成する窒化シリコン薄膜を介して薄膜の振動に変換し、薄膜自体をミラーとして利用したファブリー・ペロー光共振器の光応答として光学的な検出を可能とした。NMR は信号が微弱であることが課題となっていたが、この電気-機械-光学 NMR 検出法は、NMR や MRI を潜在的に非常に低雑音化できる光学測定を実現できるだけでなく、薄膜や核スピンをさらにレーザー冷却することでさらなる高感度が期待される。この成果は、核磁気共鳴、ナノメカニクス、量子光学という異なる分野にまたがる学際領域の研究を異なる専門分野、経験、ノウハウを結集させた国際共同研究の体制で実現している。

(iii) 表面弾性波共振器中のフォノンの高感度測定は、具体的には、780MHz の表面弾性波を超伝導量子ビットの非線形性を利用して 5GHz のマイクロ波信号に上方変換し、超伝導ジョセフソンパラメトリック増幅器を援用することで平均フォノン数にして 1 個以下の表面弾性波の観測を実現した。これにより、表面弾性波の測定感度を従来から 2 桁向上させることに成功したことは注目に値する。超伝導量子ビットを利用したフォノンの量子観測・制御技術が大きく展開していくための足がかりになると期待される。

(iv) 超伝導回路を使って数十 eV 程度の低エネルギーの電子を捕獲・冷却する技術は現在進行中である。浮揚した電子を Paul トラップした上でその電子の振動状態を冷却制御する技術を開発中であり、特許出願がなされている。真空中に浮揚したトラップ電子は周囲から完全に孤立した系となっており、またその質量が小さいことから振動の周波数が非常に高く、 $1/f$ ノイズが支配的な電磁波ノイズからの影響も小さいことが指摘されている。また、その振動周波数がマイクロ波帯であるために、既存の超伝導量子回路や超伝導マイクロ波技術との親和性も良い。電子トラップ系はイオントラップ系よりも高速であり、新しい量子系として期待があるが、未だ量子系として実現されることがない理由は浮揚した電子の冷却が難しいことであった。この問題を解決するための技術が検討されており、電子トラップが高速で長寿命の量子ビット技術に発展することが期待される。この技術の研究は当初の計画にはなかったものである。

また、極低温環境下の超伝導量子回路中で操作されるマイクロ波領域の光子と、常温でも量子情報を担保できる光の領域の光子の信号を双方向に変換する量子トランスデューサの実現を

目指し、マイクロ波－光量子インターフェイスについても研究を進めてきた。当初は上記のマグノンの知見を活用し、マイクロ波－マグノン－光の変換を目指したが、マグノンと光の相互作用が弱く、新たな展開として、自然放出レートの大きい励起子を活用し、マイクロ波－マグノン－励起子－光による実現を目指してきた。具体的には、遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD) を YIG 薄膜の上に積む、いわゆる van der Waals (vdW) ヘテロ接合で、YIG 中のマグノンと TMD 中の励起子とを近接相互作用させる手法により、マグノン－光結合の増強につながる新しいアイデアを提示した。その結果、近接効果による交換相互作用のために YIG 薄膜中のマグノンと励起子が結合し、YIG 薄膜の強磁性共鳴信号の光学的読み出しに成功している。現在は、チタン－サファイアレーザーを用いて低温環境下でのマグノン－励起子結合の研究を推進中である。これらは当初の計画にはなかった新たな試みであり、量子情報科学と物性科学の新たな融合領域を展開した学術的に価値の高い取組といえる。

他に、SNAIL(Superconducting Nonlinear Asymmetric Inductive Element)と呼ばれる非線形素子を有する Cubic Transmon という量子ビットによる高速な量子ゲートの実現など、新たな展開につながる可能性を秘めた技術も多数登場してきている。

2－3. 知財取得

量子コンピュータを含む量子科学技術は近い将来、学術のみならず、経済的にも大きなインパクトを生むと期待され、特許を含む知財の権利確保は国家戦略上重要になる。本プロジェクトでは世界の競合グループに負けない知財創出のため、2019 年度中頃から知財支援チームを組織した。アカデミアの研究活動と密接に連携し、研究開発の上流に位置する知財アイデアも発掘し、研究者への負荷を出来るだけかけずに知財化を進める体制が構築された。これにより企業出願とは別に、アカデミアである東京大学などの研究者から 11 件の特許出願がなされた。世界と戦えるスケラブル実装方式や複数の重要な成果がこの体制により基本特許化された。このノウハウは他のプロジェクトにも水平展開を期待したいが、研究グループ毎の独立した知財化体制だけではなく、これからは知財の利活用を視野に入れた、オープンクローズなどの知財戦略を国家レベルで牽引する司令塔体制の構築の議論も必要とされるだろう。

プロジェクト全体としては、超伝導量子回路グループとハイブリッド量子系グループが、直交関係にありながらも研究総括が創成した超伝導量子ビットを核に結びつき、世界のトップを先導する顕著な成果を多岐に渡り生み出したことから、十分な成果が得られていると評価する。

〔研究の達成状況および得られた研究成果〕 a+ (十分に的確かつ効果的である)

3. 研究成果の科学技術、社会・経済への貢献

3－1. 科学技術への貢献

全体として、世界トップの成果を先駆的に次々と出し続けており、学術面では申し分がない結果といえる。論文投稿先や掲載された学術誌をみればそれらのインパクトの高さも明らかである。また、科学技術に与えるインパクトが基礎研究から実用的な技術まで多岐にわたっている。さらに、米レビュー誌に掲載されている成果も多く、国際的にも高く評価されている。

本プロジェクトで開発した大規模かつスケラブルな超伝導量子回路の実現のための技術は、超伝導量子ビットの大規模集積化を可能にする最有力候補となる可能性がある。将来、集積化がより進んだ段階において量子ビット数で先行している競合グループに対する優位性を発揮することが期待される。また、超伝導量子回路の技術開発にあたっては、量子コンピュータ実現に関係する冷凍機、チップ、量子極限アンプや、周辺エレクトロニクス設計や量子ゲートの

実装に関する数多くの卓越した知見やノウハウが蓄積されたことは、量子エレクトロニクス関連分野などの新産業創出への手がかりを与え得ると考えられる。

なお、学術的な成果の創出だけでなく、量子コンピュータをシステムとして完成させて社会実装するために必要な検討項目を網羅している点、さらに、物事を普遍的に見ようとする基礎研究の手法を上手くシステム設計に取り入れてシステム全体の見通しを良くする工夫をしている点について、本プロジェクトのメンバーの研究に対する姿勢と共に高く評価したい。

高効率マイクロ波単一光子の量子非破壊測定の実現をはじめとする、量子誤り耐性量子計算を目指した要素技術のマイクロ波帯域での実装および提案は、現代の量子技術の中でもとりわけ早急な開発が望まれるだけでなく、既存の量子光学理論や模型の普遍性の実証、未開拓パラメータ領域への拡張という意味で、新たな科学技術分野の潮流を生み出していると評価できる。

ハイブリッド量子系の研究は、学術上の興味にとどまらず、将来の分散型量子計算においてキーとなるテクノロジーに成長することが期待される。現在世界で研究が進行しているゲート型量子コンピュータの代表例として、超伝導量子ビット、イオントラップ、リュドベリー原子などの方式があるが、いずれも 100 量子ビットを超えた拡張性が課題となっている。ハイブリッド量子系は各々のノードを光技術などでつなぐことによって分散型の量子計算をする必要性が生じた場合、極めて重要な技術となる。本プロジェクト開始当初、ハイブリッド量子系では第一に学術面のブレイクスルーを目標に定めていたが、その後の展開において量子インターフェイス技術として重要な基盤技術に成長する可能性が高まっており、スピノフも含め、科学技術上の大きなインパクトが期待できる。

また、本プロジェクトおよび Q-LEAP プロジェクトの先にある、真の万能量子コンピュータの実現を念頭に研究開発が進められており、長期的に重要となる研究開発の指針を常に示し続けている点も意義深い。さらに、本プロジェクトの成果を Q-LEAP プロジェクト、ムーンショット型研究開発制度・目標 6 などへ橋渡しすることにより、成果の展開と深化を期待したい。

3-2. 社会・経済への貢献

量子コンピュータは、量子情報革命の切り札として極めて大きな社会的・経済的インパクトを持つ。秘匿情報通信、創薬、化学、材料開発、金融分野などの多岐にわたる展開が期待されており、この趨勢はさらに進むものと考えられる。その期待以上に、アーキテクチャの研究、アルゴリズム開発、アプリケーション開発などが予想され、現在の知見から詳細な技術予測が難しい技術的特異点として、破壊的イノベーションを超える転換が起こる可能性がある。本プロジェクトが推進する研究開発は、より広い視点から見ると、量子科学技術戦略のまさに中核技術となっており、開発した集積化超伝導量子回路は、日本の超伝導量子コンピュータの原型となった。量子コンピュータを中心に量子情報技術が今後の高度情報化社会を支えるブレイクスルー、つまり科学技術イノベーションを引き起こす起爆剤であるとの認識の下に研究開発を進めており、社会・経済に与えるインパクトは計り知れない。

本プロジェクトでは、国内はもちろん世界的に見ても、社会へのインパクトの大きい重要な成果を着実に挙げた。社会課題の解決や新産業の創出への手がかりとなる、科学技術イノベーションに大きく寄与する具体的な成果展開としては、もう少し開発が進んでからでないと問うのが難しいものの、真に有意な規模の量子誤り耐性量子コンピュータの実現が社会・経済に対して計り知れない効果を及ぼすことは間違いない。例えば、食料・エネルギー・環境など人類の抱える多くの深刻な社会課題を解決することも期待される。20~30 年後に本プロジェクトで生まれたアイデアや技術が社会・経済に大きく貢献していることを確信する。

本プロジェクトで考案された超伝導量子ビット集積化方式や周辺部の細やかな工夫は、量子ビット数を増やすにつれて発散的に増えていく問題を解決あるいは劇的に緩和させる可能性が

ある。また、基板貫通電極と垂直同軸線実装による 3 次元実装方式の提案は、日本の中小企業のモノづくり力が活かされており、日本の産業力のさらなる向上に期待したい。また、ソフトウェアと併せて技術開発を続けていくことで、新産業の創出につながる可能性があると考えられる。

超伝導量子技術を軸とした巨視的な量子機械の研究を通して、誤り耐性量子計算実装という国際的な競争に挑んだことで、本プロジェクト開始前の量子計算機研究の日本の遅れを、プロジェクトを通して大きく挽回した。本プロジェクトで開発された超伝導量子系の制御・観測技術は、その独自性とエネルギー帯域の多様性から、量子計算だけでなく量子科学を基盤とした新技術・製品の創出につながり、日本の停滞した経済を量子技術で再び動かす可能性をも秘めている。

マイクロ波量子光学とハイブリッド量子系の一連の研究は、量子光学と物性物理など物理学の副分野を融合するだけでなく、物理・エレクトロニクス・情報科学といった異分野の融合にもつながるものであり、量子情報科学の発展に革新的な寄与を生み出すと期待される。例えば、超伝導量子ビット・マイクロ波・電気回路からなる超伝導回路の量子電気力学 (QED) では、光帯域では実現困難な強結合・非線形性を利用できることから、従来の量子光学研究の未踏領域まで拡大できる。更に、光帯域とマイクロ波帯域とのインターフェイスに異種量子系を導入することで、単独の系での技術限界を超えた技術イノベーションが期待できる。

本プロジェクトの参画研究者が、日本の AMO(atomic, molecular, optical)分野の今後を担う人材として活躍することが期待される。意欲的な多くの若手研究者を引き付け、育成に取り組んだ意義も高く評価したい。

【研究成果の科学技術、社会・経済への貢献】 a+ (十分に的確かつ効果的である)

4. その他特記すべき事項

4-1. 若手研究者支援

本プロジェクトの期間中に、40 名近くの若手の参画研究者が独立したり、プロモートされたポジションを様々な研究機関でタイムリーに得て活躍のフィールドをひろげており、キャリアアップが極めて順調に進んでいることは評価に値する。この分野の人材育成を先導するハブ的な存在になっており、キャリアパス支援を含む若手研究者の育成は著しい成功を収めている。また、本プロジェクトから輩出された多くの優秀な人材による、新たな研究室やグループの立ち上げ、量子技術研究に積極的な企業や国内外大学グループへの異動、大型予算や個人研究予算の獲得などにより、国内外の関連分野のさらなる活性化に大きく寄与した。

中村研究総括のリーダーシップが存分に発揮され、国内外の専門の異なる優秀な若手研究者が存分に活躍できる場、挑戦的・創造的・融合的な構想実現につながる相互作用を促し、切磋琢磨する研究の場を提供している。若手の研究者のほとんどが他分野の出身者であり、本プロジェクトで新たに当該分野に参入し、各人が第一線で活躍している。海外研究機関から研究者の招聘を頻繁に行うなど、優秀な人材の流動性があることも特筆すべき特長である。

4-2. アウトリーチ、PR 活動

アウトリーチ活動としては、2019 年 5 月につくばで開催した超伝導量子ビット 20 周年記念の国際シンポジウム (Superconducting Qubits:SQ20th) では、参加者 246 名のうち 3 分の 1 以上が海外の研究機関・企業からの参加となった。中村研究総括が超伝導量子ビット研究の創始者であり、かつ現在も当該分野の中心人物の一人であることを世界に示すとともに、国内外の専門家にはその存在感を十分にアピール出来たという点で高い意義があったと評価できる。

また、2018年1月（於：東京大学先端科学技術研究センター）および2022年2月（オンライン）に開催した国際シンポジウムでは、人工量子系のダイナミクスとその制御というテーマで様々なバックグラウンドを持つ国内外の一流の研究者を一同に集めて議論を行っている。

また、小中高生を対象としたアウトリーチを目的とした出張授業などのイベントも数多く開催し（2019年10月までに9件）、量子技術を中心とした科学の魅力を一般に伝える活動に積極的に取り組んだ。同時に、活動に関わった研究者自身も基礎科学教育に対する熱意が高まっており、教育者としての技能も養われている。プロジェクトに参画している研究者は、この他にも、関連分野の研究会幹事、集中講義なども担っており、当該分野の普及活動にも積極的である。

なお、2020年からの新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の流行により、出張授業などの継続は難しくなったものの、中村研究総括の功績を前面に出した量子コンピュータ関連でのアウトリーチ活動が増えるとともに、動画などのメディアを活用した科学技術コミュニケーション活動が図られた。例えば、2020年11月に京都総研四季報に掲載された6ページにわたるSpecial Interview記事、2021年4月に理化学研究所に量子コンピュータ研究センターが設立されてからの各種プレスリリースや報道記事、2021年6月のYouTubeチャンネル：予備校のノリで学ぶ「大学の数学・物理」におけるヨビノリたくみ氏、古澤明氏との三者対談なども挙げられる。

一方で、超伝導量子ビット関連技術の国内のプレゼンスは、本プロジェクトの成果の海外での評価の高さに追いついていないという印象を受ける。例えばGoogleのQuantum Supremacyのように、一般に分かりやすく、学術的な成果の価値を表現する工夫を伴うニュース性のある形でのPRやメディア対策を強化することが望まれる。IBMやGoogleなどの競合グループのPRが目立っている中で、メディア発信は特別な工夫が必要であり、より一層の活発化を期待したい。

5. 総合評価

本プロジェクトの特筆すべき成果は、超伝導量子ビットを稠密に2次元平面格子へ集積化するにあたり、配線の負荷を減らした拡張性の高い構造として、基板貫通電極と垂直同軸線の3次元実装方式を提案したことである。2次元集積化と3次元パッケージングを組み合わせ、読み出しに十分な結合強度を確保しながら拡張性を維持する方式は、量子ビット数で先行している競合グループに対して、集積化がさらに進んだ段階で、その規模を凌駕する優位性を発揮し、超伝導量子ビットの大規模集積化を可能にする唯一の方法となる可能性があることから、非常に高く評価できる。物理実験の領域を出ていなかった日本の量子コンピュータ研究開発を、実機開発に近い領域に押し上げた意義は大きく、計画通りに次のステップにつながる成果が得られていると評価できる。

超伝導量子回路グループについては、量子ビット集積化、パッケージ化、測定技術といった基礎レイヤーから、アルゴリズムなどの応用レイヤーまで、高い専門性を必要とするレイヤーに細分化され、各々で顕著な成果があがっている。海外の競合グループとどう戦うかの戦略立案が難しいが、メディアとの対話を深化させながら、誤り耐性量子コンピュータへの方向性を示し続けることを期待したい。また、超伝導量子計算プラットフォームの構築と運用、アプリケーションの開拓・実装に向けて、後続するQ-LEAPプロジェクトで本プロジェクトの成果が最大限に活かされることを期待したい。また、64量子ビットあるいはそれ以上の規模での量子誤り検出・訂正符号実装に向けた課題抽出と実行可能なロードマップの提示も期待したい。ハイブリッド量子系のグループについては、一見全く異なる分野の研究者が集まって新しい可

能性を開拓しており、独創性のある学術的にもレベルの高い成果が多く創出されている。超伝導量子ビットとハイブリッド量子系を同一のチームで推進する例は世界的にも稀であり、高いシナジー効果を持つ成果が生み出されている。今後は、それらの成果をつなぐデモンストレーションとなる実証実験が増えていくことを期待する。

以上を総合すると、本プロジェクトは、超伝導量子ビットを中心とした量子状態の高度制御・観測技術の実現に向けて、多数の量子ビットからなる人工的な量子系を構築し、その量子状態に対する高精度の制御・観測技術を確立している。全体的に大幅な進捗が見られ、多数の顕著な成果が生み出されていることから、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」の達成に資する十分な成果が得られていると評価する。

〔総合評価〕 **A+** (十分な成果が得られている)

以上