

ERATO 中村巨視的量子機械プロジェクト 中間評価報告書

【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）

【評価委員】（敬称略、五十音順）

青木 隆朗（早稲田大学 理工学術院／教授）
伊藤 公平（慶應義塾大学 理工学部／教授）
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）
水野 弘之（日立製作所 研究開発グループ 基礎研究センタ／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いる。幅広い計算問題を効率的に解くことのできる万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可能性を大きく飛躍させることを目指している。

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。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・観測へと重心を移すと予想される。誤り耐性量子プロトコルが実現すれば、究極的には、任意の量子状態に任意の回数の万量子ゲートを施し、任意の時間保持できるようになるなど、非常にインパクトの高い成果が期待されており、万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いる。プロジェクト発足から3年目となる現在までに、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ていると評価できる。

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、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次元実装方式の提案に成功し、知財化した。海外の競合グループに対して優位に研究を進めることができる可能性を秘めており、今後は関連知財の取得も重要となる。

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、伝搬光子の量子非破壊測定に成功した。離れた超伝導量子ビット間を量子的につなぐ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、マイクロ波－表面弾性波－光

など、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。この成果により、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。量子状態の転写を行う他の媒介役としては、強磁性結晶中のマグノンなども扱っている。

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。

本プロジェクトの当初計画にはなかった大きな展開として、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として採択された。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。今後、プロジェクトの後半に差し掛かるにあたり、本プロジェクトの成果が Q-LEAP プロジェクトに発展的に継承され、超伝導量子コンピュータ実現の基盤技術として発展することが望まれる。

本プロジェクトの一連の成果は、2019 年 9 月までに論文 33 報、書籍・総説 18 編、会議発表 363 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、専門分野以外的一般に対しても成果がアピールされている。研究成果の実用化を目指した特許出願は 10 ファミリー (うち PCT 出願 2 件) ある。

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、全体的に順調な進捗にあり、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、ファイマンにより予言された、量子力学という物理の基本法則と互換性を有する万能な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広げることにより、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。

本プロジェクトでは 3 つの研究テーマ

- ① 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
- ② 超伝導回路上のマイクロ波量子光学ネットワーク
- ③ ハイブリッド量子系と量子インターフェイス

について相互補完的に進める戦略をとり、世界的な研究開発競争でトップ集団に位置付けられる研究を展開している。

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あたり避けることの出来ない重要かつ基本的な研究といえる。メディアで量子ビット数が盛んに取り上げられているなかで、数値目標だけを掲げるものではなく、巨視的な量子機械の構築につながる学際的分野の創出と基盤技術の確立を目指しているという点で、国内外の量子情報科学研究を牽引するに相応しい構想である。

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い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、日本は完全に取り残されていたといえる。

その中でも、誤り訂正符号実装に向けた量子制御は、本プロジェクトの先見性を指し示す、極め

て野心的・挑戦的な課題であると同時に、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課題といえる。2019年10月に公表された Google の Quantum Supremacy¹ 実証のデモンストレーションの次のブレイクスルー技術として位置づけられる。本プロジェクトにおける超伝導量子コンピュータの一般的な進捗としては、海外の強力な競合グループのそれらに対して必ずしも先行しているとは言えないものの、競合グループの方式では近い将来に限界を迎えると考えられる超伝導量子回路の大規模化において、挑戦的かつ独創的な技術開発を行っていると評価できる。

超伝導回路上のマイクロ波量子光学ネットワークは、離れた超伝導量子ビット間を量子的に結合し、量子ビット数が増えた場合でもある程度の規模まで対応可能な実装方法を検討するものである。大規模な超伝導量子回路を実現することを見据えた、先見性が高く創造的な構想であり、マイクロ波量子光学の進展が期待される。

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り組み以外にも、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、相図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²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ある。

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。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対しては、光子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。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結ぶ量子インターフェイスを実現する必要がある。ハイブリッド量子系グループでは、超伝導量子ビットと、磁性体などの異種量子系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、極めて創造性が高く融合的なアプローチをとっている。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いて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と期待される。超伝導量子コンピュータを量子通信網に接続してブラインド量子計算などを行うことなども見据えており、先見性の高い構想である。

一方で、誤り耐性を持つ量子情報処理技術実装のためのプラットフォームの確立という大目標ゆえ、三つの研究テーマのうち③に関しては思い切って切り捨て、①と②に注力する構想もあり得るという見方もある。しかし、③は学術上重要であるだけでなく、将来必要になる可能性の高い分散型量子計算のための準備の観点からも重要な研究テーマである。

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はなく、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求めている点にある。この概念に基づき、本プロジェクトの3つの研究テーマ毎に適切な目標を掲げ、綿密に計画している。

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ついては、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ている。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することを目指しており、世界的にも独自性のある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。これらは現実的かつ重要な目標設定であると考えられるが、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かなりハードルの高い目標である。なお、目標とする量子ビット数だけを比較すると海外の競合グループに対して見劣りは否めないものの、並行する Q-LEAP プロジェクトで量子

¹ 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

ビットの高集積化に向けた回路のプロセス技術開発等を担当することを鑑みると、本プロジェクトの目標は適切といえる。

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マイクロ波版の整備を目指しているといえる。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つなぐ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、原理的な可能性から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と量子インターフェイスでは、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を目指した、ハードルが高いが適切な目標設定といえる。

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。ゆえに、ERATO 研究期間内の実現可能性が未知数であるという印象が残るものの、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り、野心的・挑戦的という意味で積極的に評価したい。また、それらの目標に対して、世界の動きをよく理解しながら、新しい着眼点をもって最先端を切り拓いていると評価できる。

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、それぞれ田淵 豊氏（東京大学 先端科学技術研究センター/助教）、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）がグループリーダーを担当している。3つの研究テーマはそれぞれ密接に関連していることから、各グループの独立性よりも横のつながりを重視し、シナジーを高めることを目指している。超伝導量子回路研究グループは、さらに、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されている。各チームにはリーダーが置かれ、当該チームの中心的役割を担っている。また、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、アウトリーチ活動等の開催、他の研究機関・JSTとの連絡調整、研究付帯業務等を担っており、総勢 65 名で構成する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ている。

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ている。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ており、ヘッドクォーターが中心となってサポートしている。

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ような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。多数の研究者が活発に議論しながら、互いに良く連携して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。

また、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、情報

通信研究機構、産業技術総合研究所、東芝、NTT、NEC、ポールウェーブ社などの極めて有力な研究者・技術者との効果的かつ有機的な協力体制が確立しており、産・学、国内外、理論・実験を問わず、広範囲にわたる分野の研究者が適材適所でプロジェクトに参画している。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、常に活気的で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る雰囲気満ちているという点でも大変魅力的なプロジェクトといえる。

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。本プロジェクトはこれまでの計画を変更することなく、要素技術の開発に注力する一方で、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、量子ビットの高集積化に向けた回路のプロセス技術開発等を担当する。なお、本プロジェクトおよびQ-LEAP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等に取り組んでいる。

本プロジェクトでは、既に15名以上の若手研究者が独立して研究室を立ち上げたり、さきかけ等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）人材の育成を今後も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定義するだけでは、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、この課題への挑戦を期待したい。

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・融合的な構想実現を期待させる相互作用を促すとともに、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。

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。これまでの成果としては、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、スケーラビリティに優れた独創的な配線方式として、基板貫通電極と垂直同軸線実装による3次元実装方式の提案に成功した。この実装方式の特許出願を含め、関連する技術的課題を克服するための知財化も着実に進められた。

具体的には、2次元格子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、世界各国で採用されている方式に比して配線への負荷を減らすとともに、格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。ほぼ同一の設計をタイル状に配置して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集積化していく際の最大の難所はその測定・制御に関わる配線技術であり、量子ビットの高いコヒーレンスを維持しつつ配線コストを軽減するのかという点に技術的チャレンジがある。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、シリコン基板の裏面から基盤内部を垂直に導波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（37.5%削減）に成功した。また、基板貫

通電極の導入は、基板内の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の結合の抑制にも寄与し、集積化に伴う懸念（量子ビット数の増大によるコヒーレンス時間の低下等）を本方式により回避できることがわかった。さらに、下部電極に形成される高周波同軸線構造とシリコン基板界面部の詳細な検討により、競合グループに対して優位となる可能性を見出すことができ、今後の大きな進展への期待につながることができた。

世界のグループがしのぎを削るなかで、Google は可変量子ビットを可変結合回路で接合することで高い制御性を達成している。IBM はエネルギー固定量子ビットを用いることで高いコヒーレンスを達成しているが回路の接続性に課題があるといわれている。本プロジェクトの方式は両者のハイブリット型ともいべきもので、エネルギー固定量子ビットで高いコヒーレンスを確保すると同時に、3次元縦型配線方式で Google と同程度の接続性を狙っている点に著しい特長がある。難易度の高い制御系の開発などがスムーズに進行すれば、量子コンピュータとしての性能の飛躍的向上が期待できる。

このように、量子ビット数で先行している競合グループの方式よりも拡張性の高い独自の方式を発明し、 $4 \times 4 = 16$ 量子ビット系を開発したことは高く評価できる。量子ビット基板の電極パターンを反映した上部電極構造、量子ビットの制御導波部分に採用するフィルタ構造、量子ビット形状最適化による寄生電磁輻射モードからの遮蔽構造などの新規技術を開発し、知財化した点も評価できる。

シリコン基板上に集積化された量子ビット素子を拡張しさらに高機能化するためには、マイクロ波光子によるモジュール間接続が必要となる。本グループでは、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% のマイクロ波単一光子検出を実現した。光領域では類似の原理に基づいた手法がすでに実現されているが、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模型の普遍性を実証し、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。

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 $7 \times 7 = 49$ または $8 \times 8 = 64$ 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・開発を継続している。

両プロジェクトの達成目標については、2021 年度末に終了する本プロジェクトは 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である。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効率的に共有しながら進めている。なお、本プロジェクトの目標を達成する上で、これに特化したハードウェア基盤と比較して、Q-LEAP プロジェクトの目標である近似型量子計算を統合することが不利にならないよう、引き続き注意が必要である。また、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 プロジェクトより先を見ているともいえる。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が将来的に融合し、発展することを希望する。

このように、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ていると判断できる。なお、これら 2 つの大型プロジェクトが一定期間に渡り並走することの妥当性や効果については、両機関で適切に検証することはもとより、研究者コミュニティでも広く議論されることが

望まれる。

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との間を量子的に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いる。

本グループの代表的な成果として、ハイブリッド量子系で扱う物理系の一つである表面弾性波の超伝導量子ビットを用いた超高感度の量子測定に成功した。具体的には、マイクロ波共振器内の光子と表面弾性波共振器内のフォノンを結合させるエレクトロメカニクスと呼ばれるハイブリッド量子技術を応用し、マイクロ波共振器と表面弾性波共振器を、超伝導量子ビットを介して組み込み、超伝導量子ビットの非線形性を利用した。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。

また、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) の検出法の開発・実証に成功した。NMR は、物理的・化学的・生物学的に関心のある液体および固体材料の構造および動力学の情報を提供する強力な分析ツールである。しかし、信号が微弱であることが弱みであり、測定の信号対雑音比を改善するためのさまざまな試みが行われてきた。電気信号の検出に比べて、光の測定は非常に低雑音で行うことができる。電気-機械-光のハイブリッド量子系により、電気信号を光に変換する技術が実現すれば、電気信号を扱うさまざまな分野において、計測感度の劇的な向上が期待される。

具体的には、窒化シリコン膜を電気回路のコンデンサー電極および光学干渉計のミラーとして用いることにより、電気回路に発生した NMR 信号を窒化シリコン膜の機械的振動に変換し、この振動変位を光共振器で読み出すことで、光信号に変換した。この原理を用いて、水に含まれる水素原子核の NMR 信号を光に変換する実験に初めて成功した。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。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な測定も期待され、高い学術的成果といえる。また、NMR 信号の機械的なパラメトリック増幅や核スピンの冷却の可能性も示唆されたことにより、ハイブリッド量子技術の応用範囲がさらに広がることが期待される。

本グループにおける新たな展開の一つとしては、量子インターフェイス技術につながるマグノン-励起子-光という新規のハイブリッド量子系の可能性が見出されたことが挙げられる。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との間を量子的に双方向に変換する量子トランスデューサの実現が期待されている。2011年に理論的な提案がされたが、いまだその実現には至っていない。強磁性体中のマグノンを媒体とした光-マイクロ波結合を提案してきたが、光領域の光子との相互作用の弱さがボトルネックとなり、量子領域での変換には至らなかった。光共振器を導入するなどの相互作用の増強を試したが、問題はより根本的な物質科学にあるという結論に至り、様々な材料を検討してきた。

転機となったのが、宇佐見グループリーダーが 2018 年 9 月にスイスのチューリッヒ工科大学 (ETH) の Atac Imamoglu 教授を訪問した際の議論だった。遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD) をイットリウム・鉄・ガーネット (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見出した。これにより、マグノン-励起子-光という新しいタイプのハイブリッド量子系の開発が期待される。得られた成果については外部へのアピールを積極的に行い、量子コンピュータの開発にこれらの知見を活かしてほしい。

本プロジェクトは研究成果の実用化を目指した知財戦略も極めて重要である。現在は、本プロジェクトのヘッドクォーターにおいて、科学技術振興機構との協力体制による戦略的な知財支援活動により、知財の確保は順調に行われている。今後は本プロジェクトおよび Q-LEAP プロジェクト

横断の知財創出・管理・活用体制を構築し、両プロジェクトで取得した特許が最大限に活用されることが望まれる。

万能量子コンピュータ実現に向けた知財戦略としては、プロジェクト内のマネジメントのみでは困難であり、他組織と協力し、より大きな視点からバックアップしていく体制の確立が期待される。他の量子科学技術全般の知財戦略との統合も視野に入れ、文部科学省などの関連省庁とも協力してオールジャパン体制で進めることが望ましい。

プロジェクト全体としては、既に中間評価時点で前述に代表される、世界のトップを先導する顕著な成果が多岐的に生み出され、当初の計画どおりに順調に進捗しており、なおかつ今後の発展も期待できると評価できる。

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

本プロジェクトは、万能量子コンピュータ実現に向けて、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。これまでの成果として、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、スケーラビリティに優れた独創的な配線方式として、基板貫通電極と垂直同軸線実装による3次元実装方式の提案に成功した。超伝導量子ビットの2次元集積化と3次元パッケージングを組み合わせることで、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、量子ビットあたりの必要配線数、量子ビット周辺部の性能などにおいて世界最高レベルの優位性を示している。量子ビット数を増やした場合、他の方式が抱える配線密度の問題を解決するシンプルで独創的な手法でもあり、将来性が高く、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。量子ビット数で先行している競合グループに対しても、将来、集積化がより進んだ段階で優位性を発揮することが期待される。

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、リウ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。

全体として、世界トップの成果を先駆的に次々に出し続けており、学術面でも申し分がなく、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おり、国際的にも高く評価されている。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。

3-2. 社会・経済への貢献

量子コンピュータは、GoogleやIBMなどが既にその開発に乗り出していることからわかるように、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、金融分野等の多岐にわたる展開が期待されており、この趨勢は今後飛躍的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等が予想され、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いる。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ている。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思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、生物が行う窒素固定や光合成を人工的に模倣することが可能となり、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。

4. その他特記すべき事項

4-1. 若手研究者支援

本プロジェクト開始からわずか3年の間に、多くの若手の参画研究者がプロモートされたポジションを様々な研究機関で得て活躍しており、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といえる。

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。

本プロジェクトでは、Q-LEAPプロジェクトとの連携を活用し、プロジェクト終了後も技術開発を継続的にスムーズに発展させられるような仕組みを整えつつある。今後はQ-LEAPプロジェクトのテーマにはないハイブリッド量子系を本プロジェクト終了後にどのように展開するかを検討が必要と思われる、有望な若手研究者が成長していることから彼らのスムーズな栄転が引き続き維持されることを期待したい。

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月の超伝導量子ビット20周年記念の国際シンポジウム(Superconducting Qubits:SQ20th)の開催は、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、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等のイベントも数多く開催し(2019年9月までに8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

組んでいる。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、関連分野の研究會幹事、集中講義等も担っており、当該分野の普及活動にも積極的である。

なお、超伝導量子ビット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。この点を克服する 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、活発化すべきである。例えば、超伝導量子ビットの発明者という意味においても、中村研究総括の功績を前面に出した PR が望ましい。

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我が国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、アルゴリズム等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すことを期待したい。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。

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。全体的に順調な進捗にあり、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。

以上