



ムーンショット目標 6

2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる
誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現

実施状況報告書

2021年度版

2021年4月～2022年3月

誤り耐性型量子コンピュータにおける理論・

ソフトウェアの研究開発

小芦 雅斗

東京大学 大学院工学系研究科



研究開発プロジェクト概要

量子情報、アーキテクチャおよび物理系の研究者を結集し、量子ビットの設計、誤り耐性方式の実装、効率的に計算を実行するためのコンパイラや言語までを包含した協調設計モデルを構築します。それにより、2050年には、大規模な量子コンピュータの実現を目指します。

https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/61_koashi.html

課題推進者一覧

課題推進者	所属	役職
徳永裕己	日本電信電話株式会社 セキュアプラットフォーム研究所	特別研究員
小芦雅斗	東京大学 大学院工学系研究科	教授
都倉康弘	筑波大学 数理物質系	教授
越野和樹	東京医科歯科大学 教養部	准教授
Franco Nori	理化学研究所 開拓研究本部	主任研究員
藤井啓祐	大阪大学 量子情報・量子生命研究センター	教授
根本香絵	情報・システム研究機構 国立情報学研究所	教授
東浩司	日本電信電話株式会社 NTT 先端技術総合研究所	特別研究員
Rodney Van Meter	慶應義塾大学 環境情報学部	教授
森前智行	京都大学 基礎物理学研究所	講師
杉山太香典	東京大学 先端科学技術研究センター	特任助教
田島裕康	電気通信大学 大学院情報理工学研究科	助教
増田俊平	産業技術総合研究所 新原理コンピューティング研究センター	主任研究員

1. 当該年度における研究開発プロジェクトの実施概要

クロスレイヤー協調設計モデルの構築については、研究開発項目1が項目2と連携し、さらに計算機アーキテクチャの研究者やムーンショットプログラムの関連する分野の研究者との議論を重ね、今までにアルゴリズムの提案やオーダーの推定にとどまっていた見積もりを、チップ実装や電力見積もりなどに落としていくことで、実際の開発において量子計算機が現実的に構成できるかを緻密化した。半導体系、超伝導系、光系のハードウェアに関する新手法の提案や既存手法の定量的な解析を進めた。物理系のシミュレートを行う QuTiP ソフトウェアの拡充も計画通りに進められた。

ハードウェアに対する要請を緩和する新たな方式の開発として、項目3では、量子ビットの接続数を表面符号の4から3に低減する新たな量子誤り訂正法の構築を進めた。通常表面符号と2量子ビットのエラー検出符号とを、動的に切り替えつつ組み合わせることによって、次数3のグラフ(最近接量子ビットの数が3)上に配置された量子ビットを用いて量子誤り訂正を構成するというアイデアに基づく。その他にも、複数項目間での協業を通じ、NISQ で用いられている量子誤り抑制法を適用することで中規模の誤り耐性量子計算の物理量子ビット数を大きく削減する手法などの提案を行った。

分散型構造を持つ誤り耐性型量子コンピュータの可能性の開拓については、モジュール間の量子もつれ配信の手法に関して、典型的な分散型 Jaynes-Cummings モデルの相互作用を用いる方式に焦点を当てた。原理限界を理論的に導出できることが特長であり、そうした厳密な手法比較を行うことで、従来想定とは異なり、量子もつれ蒸留を行わないデザインの優位性を示唆する結果を得た。

以上のようなプロジェクトの骨子となる成果の他、誤り耐性型量子コンピュータの応用に関しては、誤り耐性型量子コンピュータが実現してはじめて実装できるような、量子鍵配送よりも高度な暗号プロトコルであるゼロ知識証明のセキュリティを大きく高める提案を行った。セキュリティ応用は、古典計算機とのスピード比較とは無関係の独自の有用性を持つ重要な応用である。

(1) 研究開発項目1: クロスレイヤー協調設計モデルの開発と拡張

令和4年度のミニマルモデルの完成に向けた量子計算機設計の緻密化を進めた。具体的には、計算機アーキテクチャの研究者との協業による量子計算機アーキテクチャ設計の具体化、誤り耐性量子計算機の上での命令セットのたたき台の構築、および、その評価機構の構築などを実施した。また、こうした基礎的な事項の構築に付随して頭わになった、量子計算機の実現に向けた課題を解決する研究についてもムーンショットの理論・ソフトウェアグループの研究者やハードウェアのグループの研究者と協業して実施した。

(2) 研究開発項目2: 誤り耐性型量子コンピュータのハードウェア制御法の開発とその性能解析

ハードウェアに依存する新手法の提案や既存手法の定量的な解析を進めた。半導体系では、電子スピン量子ビットの測定手法を理論的に扱い、その期待される忠実度の解析を進め、スピンのコヒーレントな操作速度の上限を明らかにした。超伝導系では、単一の導波路から読み出し・ゲート操作の両方を行えることを示した。光系では、GKPコード と cat コードのハイブリッドコードにより、ハードウェアの要求精度を引き下げることが可能であることを示した。

また、物理系のシミュレートを行う QuTiP ソフトウェアの拡充を進め、様々な問題に適用可能な階層的運動方程式 (HEOM)を扱える新しい version をリリースした。

(3) 研究開発項目3: 誤り耐性型量子コンピュータの性能改善のための量子誤り訂正法の開発とその性能解析

量子ビットの接続数を、一般的な表面符号の場合の4から、3に引き下げる新手法を構築し、復号アルゴリズムについての検討を進めた。また、コヒーレントエラーを含む現実的なノイズに対して量子誤り訂正の性能評価を行うためのシミュレーション技術の開発を行った。また、高コストな論理ゲートの実装におけるコストの定量化を行うため、高次元の量子リードソロモン誤り訂正符号を導出し、少ない光子数で量子リードソロモン誤り訂正符号を実装する方法を具体的に示し、それを用いて量子回路の実装効率を定量的に評価した。さらに、誤り耐性型量子コンピュータの表現方法について、一定の制限を加えたモデルについて回路表現と圧縮操作表現を数理的に定式化した。

(4) 研究開発項目4: 分散型構造を持つ誤り耐性型量子コンピュータの研究開発

分散量子計算において基本となる、ノード間への量子もつれの供給手法について、一般性の高いモデルをもとに、効率の理論限界を導出した。本結果は、量子もつれ蒸留ありきの先行研究が与える指針と異なり、量子もつれ生成方式が十分効率的な場合、分散量子計算の設計において必ずしも量子もつれ蒸留を使用する必要がないことを示唆しており、分散型量子計算の設計に対して新しい知見を与える。また、異種ノードタイプの分散メモリ型量子マルチコンピュータを扱う理論の構築を進め、エラーの特性に合わせた符号の設計を行った。

(5) 研究開発項目5: 誤り耐性型量子コンピュータの新規手法・応用の萌芽的研究開発

完全古典通信による量子計算の検証の方法を構築した。さらに、その応用として、everlasting 安全性が達成できるようなゼロ知識証明を初めて構成した。非スタビライザ型量子誤り訂正符号について3種類の符号の解析を行い、符号化回路の構成が見通しやすい構造の重要性が明らかになった。対称性を扱うリソース理論について、近年議論が盛んな non-iid の場合への拡張に大きな進展をもたらした。量子ダイナミクスの加速、減速手法の提案と最適化を行った。

2. 当該年度の研究開発プロジェクトの実施内容

(1) 研究開発項目1: クロスレイヤー協調設計モデルの開発と拡張

研究開発課題1-1: クロスレイヤー協調設計モデルの開発と拡張

当該年度実施内容:

令和3年度は東京大学と協業し、令和4年度のミニマルモデルの完成に向けた量子計算機の設計の緻密化を進めた。具体的には、計算機アーキテクチャの研究者との協業による量子計算機アーキテクチャ設計の具体化、誤り耐性量子計算機の上での命令セットのたたき台の構築、および、その評価機構の構築などを実施した。また、こうした基礎的な事項の構築に付随して顕わになった、量子計算機の実現に向けた課題を解決する研

究についてもムーンショットの理論・ソフトウェアグループの研究者やハードウェアのグループの研究者と協業して実施した。こうしたソフトウェアの開発と研究を通して、令和4年度の目標であるミニマルモデルの実現に向けた研究開発を着実に実施している。

とくに、量子計算機の実現に向けた課題を解決する研究として、量子誤り抑制法の一つである擬似確率法を用いて、誤り耐性量子計算に起こる誤りを抑制することにより、必要な量子ビット数を大きく削減する手法を提案した。この手法は復号エラーやアルゴリズムエラーなど誤り耐性量子計算中に起こりうる幅広いエラーの抑制に対応でき、実効的に必要な符号長を短くする効果がある。復号アルゴリズムの処理スピードは古典処理能力にも課題があることが指摘されているため本手法により符号長を実効的に短くできる効果は大きい。

課題推進者： 徳永裕己(日本電信電話株式会社)

研究開発課題1-2: クロスレイヤー協調設計モデルの開発と拡張

当該年度実施内容:

令和3年度はNTTと協業し、令和4年度のミニマルモデルの完成に向けた量子計算機的设计の緻密化を進めた。誤り耐性量子計算の実現において最大のボトルネックとなると予想される、誤り訂正においてシンドローム値から誤りの推定を行う機構の構築と最適化について重点的に取り組んだ。超伝導量子ビットに焦点を絞り、実機における誤り率のばらつきなどの特徴に最適化された誤り訂正手法の提案を行った。また、誤り耐性量子計算における量子回路の設計のためのソフトウェアの構築と、これらを活用した量子回路の最適化にも取り組んだ。誤り耐性量子計算で重要となるサブルーチンを効率的に記述するためのソフトウェアを構築した。また、この過程で今後応用が見込まれるアルゴリズムである量子特異値変形においてボトルネックとなるモジュールである Quantum read-only memory (QROM)について、供給可能な魔法状態の数に応じて設計を最適化する手法を提案した。

課題推進者： 小芦雅斗(東京大学)

(2) 研究開発項目2: 誤り耐性型量子コンピュータのハードウェア制御法の開発とその性能解析

研究開発課題1-1: 量子ビットをベースとする要素技術の研究開発

当該年度実施内容:

電子スピン量子ビットの測定手法を理論的に扱い、期待される忠実度の解析を進めた。とくに、パウリスピン閉塞を用いる手法に注目し、励起状態の影響や複数のトンネル経路の効果を調べた。また、スピンのコヒーレントな操作速度の上限に関して、断熱的パラメータ変調による手法と高周波パルスによる共鳴的手法についてそれぞれ検討を加えた。また熱浴との超吸収現象による高速な熱サイクル現象を報告した。

課題推進者： 都倉康弘(筑波大学)

研究開発課題1-2:量子ビットをベースとする要素技術の研究開発

当該年度実施内容:

量子コンピュータの構成要素である個々の量子ビットには、読み出し用・ゲート操作の二種類の導波路を結合させる必要があるが、量子コンピュータでは多数の量子ビットを集積化する必要があり、配線数を極力減らすことが望ましい。本年度は「量子ビット—読み出し用共振器—導波路」という構成において、導波路に量子フィルタを結合させる系について理論解析を行い、寿命とゲート時間のトレードオフ関係を克服しつつ、単一の導波路から読み出し・ゲート操作の両方を行えることを数値シミュレーションにより示した。

課題推進者: 越野和樹(東京医科歯科大学)

研究開発課題2:調和振動子モードをベースとする要素技術の研究開発

当該年度実施内容:

GKP code と cat code のハイブリッド code を考案した。GKP code のみを用いた量子計算では、GKP code 間の量子もつれ生成におけるノイズが伝搬することで GKP code の精度が下がる。ハイブリッド code では GKP code 間に直接量子ゲートを作用させないため、GKP code 固有のノイズが伝搬せずに量子もつれを生成させることができる。GKP code のみを用いる量子計算に対する要求精度が 8~10dB 程度であるのに対し、ハイブリッド code を用いた場合に GKP code の精度を 5~6 dB 程度に緩和できることを示した。また、ハイブリッド化により光子損失への耐性も向上することを示した。

課題推進者: 小芦雅斗(東京大学)

研究開発課題3:デバイス研究推進のためのソフトウェア技術開発

当該年度実施内容:

階層的運動方程式 (HEOM)は対象とする物理系が環境系と非摂動的、非マルコフ的相互作用する場合の研究に役立つ強力な手法であり、量子情報、量子輸送、物理化学、量子制御などの問題に適用できる。HOEM を実行するコードを実装し、他にも様々な改良を加えた QuTiP の新 version (4.7)をリリースした。

ソフトウェア開発とは別に、ムーンショット目標に資する理論研究として、ディープニューラルネットワークを用いて光の量子状態の分類と再構成を行う手法の提案、条件付き敵対的生成ネットワークを用いた量子状態トモグラフィの提案、原子-キャビティ系で光子損失エラーを訂正できる量子誤り訂正符号を用いて高速にゲート操作を行う提案、非エルミート量子センシングの原理限界の導出と reciprocity の有無が量子センシングの性能に与える影響の解明などを行った。

課題推進者: Franco Nori(理化学研究所)

(3) 研究開発項目3: 誤り耐性型量子コンピュータの性能改善のための量子誤り訂正法の開発とその性能解析

研究開発課題1:新たな量子誤り訂正方式の開発

当該年度実施内容:

現在最も有力な候補として研究開発が進められている2次元正方格子配列の表面符

号方式は、1つの量子ビットから4つの量子ビットへと2量子ビット演算を実行する必要があり、各量子ビットへの周波数の割り当てやクロストークによる忠実度の低下など、ハードウェアレベルでの問題点も明らかになりつつある。このような問題を解決するために、前年度から引き続き、補助量子ビットを用いた新たなシンドローム測定ガジェットを構築し、また符号距離の小さな符号との接続符号化などの新たなアプローチを導入することで、量子ビット間の接続性を4から3に低減する新たな量子誤り訂正符号を構築した。また、新たな手法に適用できる復号アルゴリズムを検討した。その他、コヒーレントエラーを含む現実的なノイズに対して量子誤り訂正の性能評価を行うためのシミュレーション技術の開発を行った。

課題推進者： 藤井啓祐(大阪大学)

研究開発課題2: 誤り耐性量子計算に必要なミドルウェアの設計

当該年度実施内容:

高コストな論理ゲートの実装におけるコストの定量化を行うため、高次元の量子リードソロモン誤り訂正符号を導出し、少ない光子数で量子リードソロモン誤り訂正符号を実装する方法を具体的に示し、それを用いて量子回路の実装効率を定量的に評価した。また、誤り耐性型量子コンピュータ上の表現方法について、一定の制限を加えたモデルについて回路表現と圧縮操作表現を数理的に定式化した。

課題推進者： 根本香絵(情報・システム研究機構)

(4) 研究開発項目4: 分散型構造を持つ誤り耐性型量子コンピュータの研究開発

研究開発課題1: 分散型構造を持つ誤り耐性型量子コンピュータの研究開発

当該年度実施内容:

分散量子計算の基本スキームとして、離れた量子ビットへの CNOT 演算について考察を進めた。この CNOT 演算は、被演算量子ビットに、忠実度の高い Bell ペアを供給すれば実装可能となるため、結局のところ、被演算量子ビットに、できる限り高いクロックレートで量子もつれを供給する「量子もつれ生成」の設計が重要となる。今年度は特に、損失のある通信路を介したコヒーレント状態の伝送に基づき、一種類のエラーしかもたない量子もつれを、離れた量子ビットに供給する量子もつれ生成方式の集合を考え、それらが与え得る高忠実度 Bell ペアの産出効率の理論限界を導出した。この理論限界は、量子もつれの Singlet fraction に対し単調非減少である産出効率関数（これは2方向蒸留可能量子もつれを含む）に対し、遠隔非破壊パリティ測定 [K. Azuma et al., Phys. Rev. A 85, 062309 (2012)] に基づく量子もつれ生成が最適だと結論する。本結果は、量子もつれ蒸留ありきの先行研究が与える指針と異なり、量子もつれ生成方式が十分効率的な場合、分散量子計算の設計において必ずしも量子もつれ蒸留を使用する必要がないことを示唆しており、分散型量子計算の設計に対して新しい知見を与える。

課題推進者： 東浩司(日本電信電話株式会社)

研究開発課題2:異種量子システムエリアネットワークの分散型誤り訂正の研究開発

当該年度実施内容:

異種ノードタイプの分散メモリ型量子マルチコンピュータでは、アプリケーションのワークロードや起こりうるエラーの特性に注意を払いながら分散量子誤り訂正手法を設計することが重要である。課題の初年度である本年度は、このようなコードの設計に着手した。当初は Steane 符号を想定したが、宇宙線による誤り発生の影響を指摘する最近の報告を踏まえ、erasure 符号を用いた設計を行った。さらに、誤り訂正操作を限られたノードだけで実行できる locally recoverable 符号の設計を行った。この符号について、計算、保存、データ入出力などの様々なノードタイプの役割を定義し、分散誤り訂正を実行するための RuleSet と呼ばれる分散アクションのセットの設計を行った。

課題推進者: Rodney Van Meter (慶応大学)

(5) 研究開発項目5: 誤り耐性型量子コンピュータの新規手法・応用の萌芽的研究開発 研究開発課題1-1: 誤り耐性型量子コンピュータの新規手法・応用の萌芽的研究開発

当該年度実施内容:

令和2年度に構築した Trusted center による量子計算検証プロトコルをもとに、その Trusted center を Remote state preparation に置き換えることにより、完全古典通信による量子計算の検証の方法を構築した。その応用として、LWEに基づく古典 certified deletion を構成した。さらに、certified deletion をQMAに対するゼロ知識証明に組み込むことにより、certified everlasting なゼロ知識証明の構成も行った。従来のゼロ知識証明においては binding を statistical にすると、hiding が computational なものになってしまうため、everlasting 安全性は達成できないが、certified deletion を組み合わせることにより、削除の証明ができた場合には everlasting 安全性が達成できるようなゼロ知識証明を初めて構成することができた。

課題推進者: 森前智行(京都大学)

研究開発課題1-2: 誤り耐性型量子コンピュータの新規手法・応用の萌芽的研究開発

当該年度実施内容:

令和3年度は、符号構造と性能の関係の解明に向けて、既知の非スタビライザ型量子誤り訂正符号である RHSS 符号、SSW 符号、SSSZ 符号の3つ符号の性能検証を行った。大規模量子計算において補助量子ビットの状態準備での利用が考えられる SSW 符号については、既知の符号化回路をもとに検証を進め、必要な物理量子ビット数などを算出した。一方、他の二つの符号については、符号化回路が知られておらず、その構成に取り組んだものの、成功しなかった。今年度の解析を通じて得られた知見として、実用的な非スタビライザ型符号の開発において、符号空間には、SSW 符号が持つ自己相補性のような、符号化回路の構成が見通しやすい構造が必要であることが分かり、今後の開発において検討すべき符号構造の指針が得られたと言える。

課題推進者: 杉山太香典(東京大学)

研究開発課題1-3:誤り耐性型量子コンピュータの新規手法・応用の萌芽的研究開発
当該年度実施内容:

当該年度の計画として、最適輸送理論を応用し、Wassestein 距離ベースでのリソース指標の定式化や、HWI 不等式に基づくトレードオフ関係の導出を目指したが、古典では既に構成されている最適輸送理論の量子対応物を構成することが当初予想していたよりも困難で、様々に理解は深まりつつあるものの、現在の所特筆すべき成果が得られていない。この問題が解決しないとしても、全体の計画目標の達成にそれほど影響はないが、今後も引き続いて考察を進める予定である。

一方で、Resource theory of asymmetry (RToA)の整備を行い、非常に大きな進展があった。具体的には本年度、non-iid の RToA の状態変換可能性の理論を、保存量が1つであり、かつ純粋状態の場合について完全に完成させた。これは、令和4年度のマイルストーンに設定していた目標を、限定されたケースについて成し遂げたことを意味する。

その他に、解放量子系での熱の流れにおいて、コヒーレンスとエントロピー生成がどう関係するか、という問題について論文を出版した。保存量(この場合はエネルギー)の流れとコヒーレンス、そして散逸の間の関連を明らかにするという点で、本計画の目標と関連がある。この論文は PRL editor's suggestion と Featured in Physics に選ばれた。

課題推進者: 田島裕康(電気通信大学)

研究開発課題1-4:誤り耐性型量子コンピュータの新規手法・応用の萌芽的研究開発
当該年度実施内容:

量子ダイナミクスの減速による Level crowding 問題の解決に向けた研究として、1量子ビット系において、FF-protocol を使い量子ダイナミクスを減速する方法を開発した。そして、どのパラメータ領域で量子ダイナミクスの減速が可能かを明らかにした。

また、量子ダイナミクスの加速理論を用いた高精度量子ビット制御の提案について、FF-protocol を使って高速制御に必要な制御パラメータの時間依存性を導出し、高速制御の最適化を行った。さらに、量子断熱過程の加速である shortcuts to adiabaticity の手法を開発した。

課題推進者: 増田俊平 (産業技術総合研究所)

3. 当該年度のプロジェクトマネジメント実施内容

(1) 研究開発プロジェクトのガバナンス

進捗状況の把握

- ・東京大学工学系研究科に PM 支援体制チームを構築している。事務系統は研究科の支援を受けている。
- ・研究開発プロジェクトの推進に関する重要事項について必要な連絡及び調整を行うため、運営会議を設置している。運営会議の構成は、PM を議長とし、参加機関等(代表機関、研究開発機関および JST) を参加者とする。12月に運営会議を開催し、実施規約の改訂についての合意と、令和4年度からの新たな課題推進者/研究開発機関についての承認を行った。
- ・課題推進者の研究の進捗状況の把握に努めた。

研究開発プロジェクトの展開

- ・令和3年度4月から新たに課題推進者3名を加え、本プロジェクトの研究開発体制を整えた。
- ・項目4の強化のため、令和4年度からの課題推進者の追加を検討し、1名を決定した。
- ・本プロジェクトとは別枠の予算で、ムーンショット目標6を明示した形の数理科学的アプローチを用いた研究開発の公募(横断的支援(数理科学)研究開発課題公募)が行われ、1名が採用された。この公募については、本プロジェクトとの相乗効果が期待できる形になるよう、企画段階から助言を行った。

(2) 研究成果の展開

- ・知的財産権の運用について協議する場として、必要があれば、知財運用会議を設置することとしていた。知財運用会議の構成は、PMを議長とし、協議の対象となる知的財産権に直接的または間接的に利害関係を有する研究開発機関等の一部または全部、およびJSTを参加者とする。今年度は、知財運用会議を開催する案件は生じなかった。
- ・ムーンショットプログラム目標6全体の特許調査のため、課題推進者から情報の収集を行った。
- ・最新の技術動向の把握に務めた。

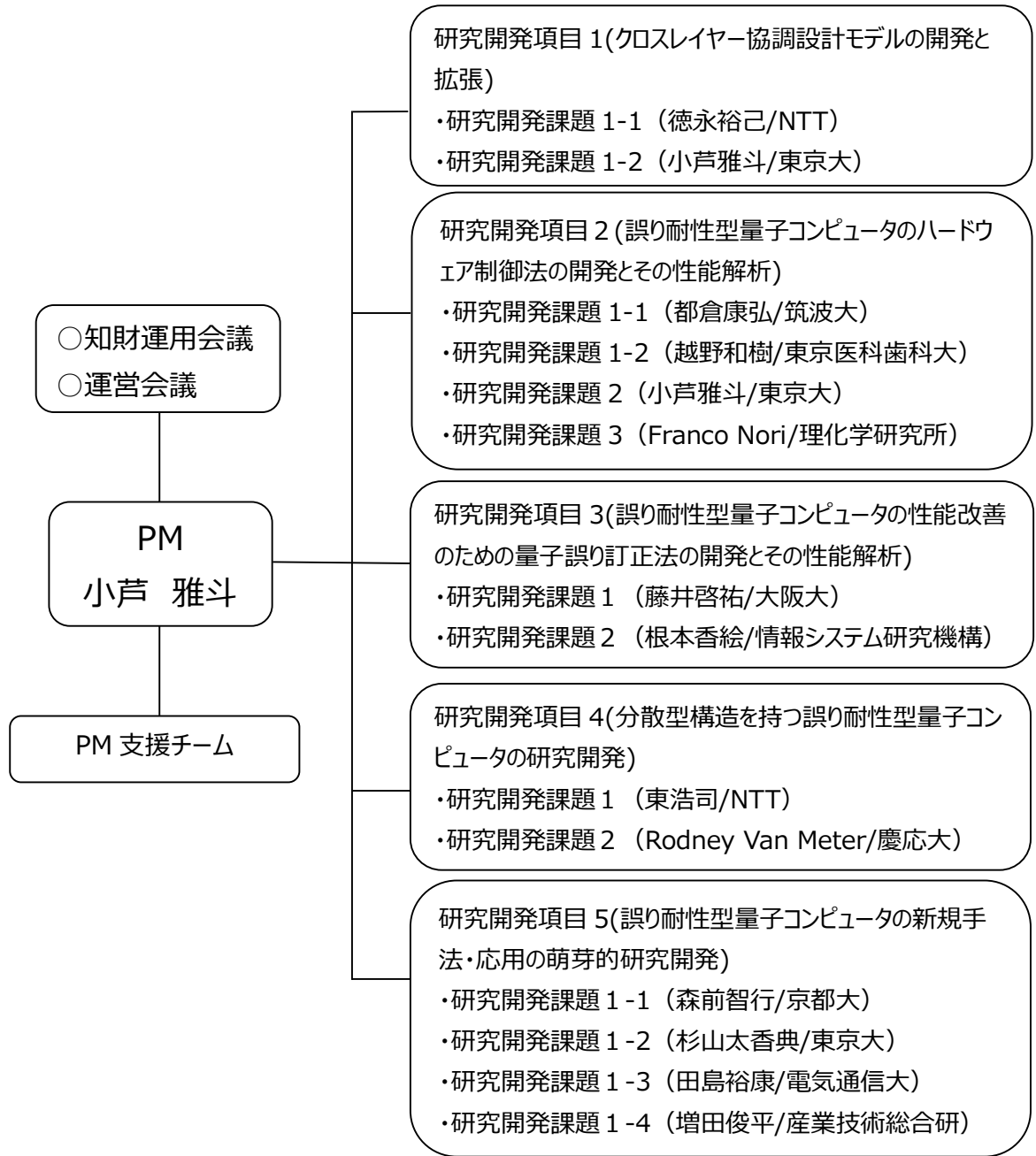
(3) 広報、アウトリーチ

- ・10月に「誤り耐性型汎用量子コンピュータを支える理論と数理科学の視点」をテーマにオンラインのワークショップを主催し、本プロジェクトの課題推進者・参加研究者4名が数理科学的な視点を交えて量子コンピュータに関連する理論研究についての講演を行った。同時期に開始された数理科学の研究提案の公募に合わせたものであるが、講演の中にチュートリアルを設けて、広範囲の参加者を想定したプログラムとした。100名を超える参加があり、公募に関連して参加した方の割合は約3割であった。

(4) データマネジメントに関する取り組み

- ・データマネジメントプランに基づき、適切なデータ管理に務めた。報告すべき事項を課題推進者に周知し、年次計画開始時のプランに基づき、申告された案件の状況把握を行った。

4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図



知財運用会議 構成機関と実施内容

議長:PM、参加者：JST および協議の対象となる知的財産権に直接的または間接的に利害関係を有する研究開発機関等の一部または全部。当該年度は該当案件なし。

運営会議 実施内容

1 2月に開催 実施規約の改正と、令和4年度からの新たな課題推進者/研究開発機関について承認した。

5. 当該年度の成果データ集計

知的財産権件数				
	特許		その他産業財産権	
	国内	国際(PCT含む)	国内	国際
未登録件数	0	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	0	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	10	16	26
口頭発表	31	13	44
ポスター発表	2	14	16
合計	43	43	86

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	52	52
(うち、査読有)	0	52	52

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	1	0	1
書籍	0	0	0
その他	0	0	0
合計	1	0	1

受賞件数		
国内	国際	総数
1	0	1

プレスリリース件数
2

報道件数
5

ワークショップ等、アウトリーチ件数
2