

研究終了報告書

「持続可能な高度量子技術開発に向けた量子擬似ランダムネスの発展と応用」

研究期間：2018年10月～2022年3月

研究者：中田 芳史

1. 研究のねらい

近年、量子情報技術に対する社会的な期待は急激に高まりつつあり、産学官民が連携した研究開発が世界中で進んでいる。国際的に熾烈化する量子情報技術開発においては、「量子情報処理のポテンシャルを社会に提示するための短期的な応用技術開発」と「将来の大規模量子情報処理へと繋がる堅実な基盤技術開発」の両立が重要なテーマとなっている。

そのような背景において、本さがけ研究のねらいは、量子擬似ランダムネスをコア量子技術として技術シーズ化することで、現在の量子実験技術の向上から将来の新量子情報技術の創出まで、長年に渡って継続的に量子技術開発に貢献できる知的基盤を創成することにある。量子擬似ランダムネスは擬似乱数を量子化したものであり、古典情報処理を遥かに超越する量子技術に直結するリソースとして知られている。本研究では、まず、量子擬似ランダムネスの新しい実装手法の提案を行い、更に、量子擬似ランダムネスを活用した量子技術の開発を行う。量子擬似ランダムネスが情報リソースとして普遍的な価値を有することから、本計画は「短期的に実現可能な量子応用の開発」と「将来へと繋がる基盤技術開発」が両立する研究開発に貢献するものである。

本研究は基礎研究と応用研究に大別される。基礎研究では、数学のデザイン理論を用いた量子擬似ランダムネスの理論発展を目指す。その理論研究を通じて量子擬似ランダムネスをより深く理解した上で、量子擬似ランダムネスの新しい生成プロトコルの提案を目指す。応用研究では、基礎研究で得られた理論的土台に基づき、量子擬似ランダムネスを用いた三つの量子技術に取り組む。一つ目は、randomized benchmarking(以下、RB)と呼ばれる量子ゲートの性能評価手法であり、現在のノイズな量子情報デバイスの性能改善に貢献することを目指す。二つ目は、計算の枠組みにおいて量子の優位性を示す quantum computational supremacy であり、原理実証的証明に向けた理論提案を試みる。三つ目は、量子通信プロトコルの提案であり、通信の枠組みで量子の優位性を示す新規プロトコルの理論提案を目的とする。これらの応用一～三はそれぞれ、量子情報技術の短期～長期的な応用となっている。

このように、本さがけ研究では、量子擬似ランダムネスの基礎理論から応用まで幅広く取り組むことで、現在の量子技術から将来的な量子プロトコルに渡るまで、量子擬似ランダムネスを軸とした長期にわたる量子情報技術の道筋を提案することを目的とする。

2. 研究成果

(1) 概要

本さがけ研究では、「A.量子擬似ランダムネスを生成する量子アルゴリズム」と、「B.量子擬似ランダムネスに基づく量子情報処理技術の開発」の二テーマについての研究を行った。

研究テーマAでは、量子擬似ランダムネスの基礎理論の発展を目指した研究を行い、高次の量子擬似ランダムネスを厳密に生成する新しい量子回路を提案する成果を得た。この成果

は、数学の表現論やデザイン理論の専門家と共同研究を行うことで得られたもので、厳密な量子擬似ランダムネスを用いた量子プロトコルへの道筋を切り拓くだけでなく、数学における長年の未解決問題を解決するものでもある。そのため、本成果は量子情報科学の枠を超えた顕著な成果といえる。

研究テーマ B では、量子擬似ランダムネスを用いた「RB プロトコル」、「quantum computational supremacy」、「新規量子通信プロトコル」に関する研究を試みた。一つ目の応用では、実装された量子ゲートの性能評価を行う標準的手法である RB プロトコルの改善を行った。まず、高次の量子擬似ランダムネスを用いることでノイズの高次の特徴量を実験的に評価する手法を提案し、中村研究室（東京大学・理研）の協力の下、超伝導量子情報デバイス上で実装した。二つ目の quantum computational supremacy については、本さがけ研究開始直後に Google が実験的に quantum computational supremacy を証明することに成功したため、研究の重要性が相対的に低下した。このことから、本さがけ研究では本応用以外の研究に注力することとした。最後に三つ目の応用では、量子擬似ランダムネスを用いた新規量子通信プロトコルの提案を行い、その理論基盤となる定理と、プロトコルの性能限界を与える定理を証明した。更に、その副次的な成果として、我々の定理を用いた量子ブラックホールや量子カオスの研究を行い、量子シミュレーションの新たな応用についての理論提案も行った。近年、量子通信の解析技術を用いた理論物理の発展が著しいが、本成果はその研究の方向性を加速させるもので、純粋科学的に高い価値を持つものである。

本研究期間中に計 9 本の論文を執筆し、現時点で 7 本が PRX Quantum や Communications in Mathematical Physics 等のトップジャーナルから出版されている。また、量子情報科学のみならず、素粒子物理学や数学などの国際会議・研究会に招待されるなど、分野の枠組みを超えて国際的にも高い評価を得ることができた。

これらの一連の成果は、量子擬似ランダムネスの理論発展に貢献した上でその応用可能性を広げるものである。特に、RB によって現在のノイズな量子情報デバイスの改善手法を与えたこと、新規量子通信プロトコルの提案とその理論物理学への応用によって、新しい視点から量子情報技術の応用を与えたことは、今後の科学技術発展において意義深い成果である。以上より、本さがけ研究のねらいである「量子擬似ランダムネスを軸とした、長期にわたる量子情報技術の研究開発の道筋の提案」を達成できたと考えている。

(2) 詳細

量子擬似ランダムネスの理論発展と用を目指す本さがけ研究では、以下の二テーマを設定した。

研究テーマ A「量子擬似ランダムネスを生成する量子アルゴリズムの開拓」

研究テーマ B「量子擬似ランダムネスに基づく量子情報処理技術の開発」

研究テーマ A は量子擬似ランダムネスの理論発展と、新生成手法の提案を目指すものであり、研究テーマ B は量子擬似ランダムネスの量子プロトコル等への応用を試みるものである。以下では各テーマの研究成果と研究目的の達成状況についてまとめる。

研究テーマ A「量子擬似ランダムネスを生成する量子アルゴリズムの開拓」

研究テーマ A では、量子擬似ランダムネスの理論研究を通じて、その生成手法に関する研

究を行った。量子擬似ランダムネスを応用するためには、生成アルゴリズムが不可欠であるため、本研究テーマは本さきがけ研究の基盤をなすものである。

既存の研究として、低次の量子擬似ランダムネスはクリフォード・ゲートを用いて実装可能であること、高次の量子擬似ランダムネスはランダム量子回路やランダム対角回路を用いて近似的に生成可能であることが知られていた。しかし、高次の量子擬似ランダムネスを厳密に生成する量子回路はこれまで知られておらず、数学の一分野では未解決問題として知られていた。

本研究では、この未解決問題を解決し、任意次数の量子擬似ランダムネスを厳密に生成可能な量子回路の提案に成功した。提案した量子回路は量子ビットの数に対して帰納的な生成手法になっており、任意の量子ビット数上での生成が可能である。この手法は数学の表現論やデザイン理論を駆使したものであり、量子情報科学と数学の融合研究を促進したという意義も併せ持つものである。本結果は、数学のデザイン理論の大家である坂内名誉教授(九州大学)や表現論に精通する奥田准教授(広島大学)らと共同して得られたものである。

本結果は、数学の未解決問題を解決すると同時に量子情報科学にも貢献するものとして、顕著な成果といえる。数学及び物理の論文を一本ずつ執筆し、後者は PRX Quantum から出版された(5. 主な研究成果リスト(1)の1)。その重要性が認められ、本結果とその応用(下記研究テーマ B1 を参照のこと)を併せて、TQC2021 や AQIS2021 における口頭発表に採択された(5. 主な研究成果リスト(3)の4と5)。特に、AQIS2021 では少数の顕著な成果だけが選ばれるロング・トークに選出された。その他にも、ハノーバー大学(ドイツ)、鴻海精密工業(中国)、ブリストル大学(イギリス)からセミナーを依頼されるなど、国際的に高い評価を受けた。

歴史的にも重要な成果を挙げることに成功した本研究テーマであるが、今回提案した生成手法は量子ビット数に対して非効率的という欠点を持つ。従って、量子情報プロトコルへの応用に向けて、効率性を向上することが将来的な課題といえる。

研究テーマ B「量子擬似ランダムネスに基づく量子情報処理技術の開発」

研究テーマ B では、量子擬似ランダムネスの関連技術の開発を通じて、実際の応用に繋げることを目指した。具体的には、以下の三つの課題を設定し、研究を遂行した。

B1: ノイジーな量子情報デバイスの検証手法の高速化・高性能化

B2: 中～大規模量子系での quantum computational supremacy の実証

B3: 量子通信アルゴリズムの基礎技術開発と、通信の枠組みにおける量子優位性の実証

B1、B2、B3 はそれぞれ、直近・短期・長期の量子技術発展に貢献することを目的とするものである。以下では、各々について述べる。

課題 B1: RB の高速化・高性能化について

近年の量子情報技術の飛躍的な進歩の中で、ノイジーな量子情報デバイスの検証手法の重要性が増している。その最も標準的な手法が、低次の量子擬似ランダムネスを用いた randomized benchmarking (以下、RB) と呼ばれるプロトコルである。RB プロトコルを実行することで、実装されたノイジーな量子ゲートの平均忠実度を実験的に容易に測定することが可能であるが、従来の RB ではノイズの詳細な特徴は分からないという欠点があった。

本研究課題では、高次の量子擬似ランダムネスを用いた新しい RB 型プロトコルを提案し、そのプロトコルの解析を行うことで以下を示した。

- 量子情報デバイス上のノイズをより精緻に推定可能であること
- ノイズの量子誤り訂正可能性に関連する特徴量を実験的に推定可能であること

ここで、高次の量子擬似ランダムネスは研究テーマ A の研究成果を用いることで、実験的にも実装可能であることに注意されたい。

更に、この理論的な成果を実験的に実証すべく、中村研究室(東京大学・理研)と共同して、超伝導量子デバイス上で新 RB を実装した。結果として、超伝導量子デバイス上の背景ノイズの高次の特徴量を見積もることに成功し、今後の量子情報技術の発展において、隣接する超伝導量子ビットとの制御不能な相互作用が大きな障害になることが判明した。これらの結果は、今後の量子情報デバイスの改良の手がかりを与えるものと考えている。

これらの研究成果と上記研究テーマ A を併せて論文にまとめ、PRX Quantum より出版された(5. 主な研究成果リスト(1)の1)。更に、上述の通り TQC2021 や AQIS2021 等の国際会議でも高い評価を受けて口頭発表を行い、ハノーバー大学(ドイツ)、鴻海精密工業(中国)、ブリストル大学(イギリス)のセミナーにも招待された。

本課題 B1 では想定通りの成果を挙げることに成功し、「現在の量子情報デバイスの性能向上に向けた理論的貢献」という目的を達成できたと考える。

課題 B2: 中～大規模量子系での quantum computational supremacy の実証

Quantum computational supremacy とは、古典計算機上で実行すると非効率だが量子計算機だと効率的に解くことが可能な計算問題を見つけ出すことで、量子が古典よりも強い計算能力を持つことを示さんとする研究テーマである。2017 年前後には大きな研究テーマであったが、2019 年に Google が 53 量子ビット上の量子擬似ランダムネスを生成する量子回路を用いて quantum computational supremacy を達成したと発表し、その後、研究は下火となった。

本課題では、量子擬似ランダムネスのより詳細な性質を用いることで、より実験的に易しい quantum computational supremacy の枠組みを提唱することを目的としていた。しかし、上述の通り、2019 年に従来の枠組みの中で quantum computational supremacy が実験実証されてしまったことにより、本課題の重要性が著しく低下した。更に、研究課題 B3 において当初の予定を超えた研究進展を得ることに成功したため、本さきがけ研究全体の成果の最大化を目指し、課題 B2 に割く予定であった研究時間を課題 B3 に振り分けることにした。以上のことから、研究の重要性が低下した課題 B2 は、より成果が見込める課題に方向転換したという結果に終わった。

課題 B3: 量子通信アルゴリズムの基礎技術開発と、通信における量子優位性の実証

本課題では、量子擬似ランダムネスを量子通信技術へと応用することを目的とした研究を行った。量子擬似ランダムネスは量子通信技術の発展の歴史の中で、古くから解析の一手法として使用されてきた。本研究では、「解析の一手法」を超えた新たなパラダイムとして、量子擬似ランダムネスを用いた量子通信技術を模索した。

本課題の成果は大きく二つに分けられる。一つは、量子通信技術の基盤を為す理論的枠組みの拡張、もう一つはその理論拡張に基づく量子通信技術の解析と応用である。前者では、「One-shot partial decoupling 定理」を数学的に証明することに成功した。これは特殊な構造を持った量子擬似ランダムネスを情報処理プロトコルへの応用へとつなぐ普遍的な定

理である。本成果は数理物理学におけるトップジャーナルである Communications in Mathematical Physics から出版された(5. 主な研究成果リスト(1)の2)。

後者の成果に関しては、one-shot partial decoupling 定理を用いた新規量子通信技術の提案、および、量子多体系における新奇物理現象の解明を行った。より具体的には、

1. 古典と量子を結ぶ新規性の高い量子通信プロトコルの理論提案
2. ノイジーなランダム量子回路を用いた量子誤り訂正符号の原理的実証実験の提案
3. 量子ブラックホールの情報漏出パラドクスの解析

についての成果を挙げた。

1では、ノイジーな量子通信路を用いて古典情報と量子情報を同時に送信する通信プロトコルを解析し、その送信限界を与える定理を極めて一般的な形で証明することに成功した。この結果は、量子通信路が実現した暁に、その性能限界を解析する基礎となるものである。2では1の応用として、「ハイブリッド誤り訂正符号」の提唱を提唱し、現在のノイジーな量子回路を用いて実装可能であることを示した。1と2の結果は二本の論文にまとめ、一本は現在 IEEE に投稿中、もう一本は Physical Review A から出版された(5. 主な研究成果リスト(1)の3)。

3では近年、「量子通信の手法を用いた基礎物理の研究」に取り組んだ。特に、one-shot partial decoupling 定理を用いて、素粒子物理学の長年の未解決問題である「量子ブラックホールの情報漏出パラドクス」に重要な知見を与えた。この研究は、冷却原子系等を用いて量子ブラックホールの情報漏出現象をシミュレート可能であるということを示唆しており、量子シミュレーションの新応用の提案という意味で、量子技術の発展を目指す本さがけ領域に資するものである。この成果は素粒子・強相関係物理で特に高い評価を受けており、それらの分野での国際会議やセミナーにも多数招待された(5. 主な研究成果リスト(3)の1と3)。また、この成果の意義が認められ、日本学術振興会等主催の日米独科学シンポジウムに日本代表として招待され、講演を行った(5. 主な研究成果リスト(3)の2)。現在、PRX Quantum に論文を投稿中である。

以上、研究課題 B3 を総括すると、当初の想定以上の幅広い研究展開をもたらすことに成功したといえる。今後、これらの理論的な成果を社会実装および量子シミュレーション実装に繋げていくためには、最後のピースとして量子誤り訂正符号の復号手法を開発する必要がある。その研究についても順調に進んでいる状況であるため、目的はほぼ達成できたと考えている。

3. 今後の展開

国際的にも研究開発が加速している量子情報技術だが、「量子応用によるブレークスルー技術」を実現するためには、今後十年単位での技術発展が必要と考えられる。そのような長期の技術発展を成し遂げるためには、社会の短期的ニーズを汲みつつも量子情報科学の裾野を広げ、量子技術を着実に発展させることが重要である。そのためには、現在進行形で開発が進む「量子エンジニアリングの基礎技術向上」と、「NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) デバイスを用いた応用プロトコルの研究」だけに注力するのではなく、量子情報デバイスの可能性を押し広げる多角的なアプローチの重要性が増すと考えられる。

このような見通しの中で、本さがけ研究の成果である「1. ノイジーな量子情報デバイスの

検証手法」と「2. 量子情報デバイスを用いた複雑な量子系における新奇物理の探索」は特に高い可能性を有するものとする。

成果1については、量子エンジニアリングの基礎技術向上に資するものである。今後、本さがけ研究で得られた量子擬似ランダムネスを用いた randomized benchmarking の手法を更に拡張することによって、数十量子ビット程度の中規模系のノイズを全体的に評価する手法の提案を目指す研究展開が望まれる。

成果2は、本さがけ研究の研究課題 B3 で得られた副次的な成果として得られたものであるが、量子情報の純粋科学的価値を高めることで、量子情報科学の裾野を広げる意義を持つと考えている。特に、近年、理論物理学では、量子通信の視点からの量子カオスや量子ブラックホールの解析や、量子擬似ランダムネスを用いた非平衡相転移の研究など、量子物理の新時代を切り拓く新しい物理現象が精力的に研究されている。そのような物理現象は、「量子情報デバイス上の新奇物理」として捉えることができるが、その実験実装は純粋科学の発展という意義を持つだけでなく、量子情報デバイスの技術向上という意味で高い工学的価値も併せ持つ。従って、本さがけ研究で提案した量子通信と量子ブラックホール、量子カオスに関する研究を更に推進し、実験実装に向けた研究を行うことで、物理学への純粋科学的貢献と量子情報処理技術が両輪となった、短期的応用に偏らない骨太の研究開発を展開できると見込んでいる。

このような継続研究を行うタイムスパンは数年～十年弱と考えられる。事実、Google は既に、量子擬似ランダムネスを生成する量子回路を用いて量子ブラックホールを量子シミュレートする研究の端緒を開いている。同時に、「quantum gravity in the lab」という理論提案もされるなど、上記の2の方向性の機運は十二分に高まりつつある。この機運を掴み、また、1の基礎技術向上とも組み合わせることで、近い将来に「量子情報デバイス上での新奇物理現象の探索」を達成し、その延長として、「量子によるブレークスルー技術」の社会実装が今後十年単位で実現されることが期待される。

4. 自己評価

本さがけ研究では、量子擬似ランダムネスをメインテーマとし、その基礎となる理論発展と量子情報処理への応用を二つの軸として研究を推進した。その結果として、理論発展においては分野を超えた顕著な成果を得ることに成功し、応用に関しても幾つかの応用プロトコルを提案した上で、その中の一つについては実験的に実証することにも成功した。このことから、本さがけ研究開始時に目的と定めた「量子擬似ランダムネスを軸とした、長期にわたる量子情報技術の研究開発の道筋の提案」を大筋で達成できたと考えている。

しかし、Google をはじめとした量子技術が予想を遥かに超えて進展したという事情もあり、quantum computational supremacy の研究計画に関しては大幅に方針転換せざるを得なかった。幸いにも研究目的の大筋に影響はなかったものの、計画立案当初の見通しの甘さは大きな反省点であった。この反省をいかし、今後は想定を上回る研究発展がなされた事態も想定した上での研究計画作りを試みたい。

方針転換を余儀なくされた研究課題がある一方で、想定以上の研究進展を得られた研究課題もあった。特に、量子通信の研究過程において副次的に得られた複雑な量子多体系における新奇物理現象に関する成果は量子情報科学の枠を超えた成果である。この成果が高く評

働され、日本学術会議等が主催する日米独先端科学シンポジウムにおける招待講演や、素粒子物理の国際会議での招待講演を依頼され、研究の幅が大きく広がった。そのきっかけから、2021 年度に始まった科研費新学術変革(A)に携わることにもなったため、今後は量子情報科学の発展のために広い視野から研究を行い、量子擬似ランダムネスに基づく新たな物理学の創造を目指したい。

さきがけ研究は個人を主体とするプログラムであるが、その研究を推進する中で、量子情報の専門家のみならず、数多くの純粋数学者や素粒子理論及び競争関係物理の研究者、実験家と共同することができた。このような人との繋がりは今後の研究の幅を広げ、革新的な変革をもたらす科学イノベーションの礎になるものである。重要な出会いに繋がったさきがけプロジェクトには感謝したい。

以上、本さきがけ研究では当初の計画を大筋では達成し、量子情報科学のみならず、数学・理論物理学を含む多方面に影響を与える成果を挙げることができたと考えている。さきがけ研究を通じて知り合った多様な研究者との密な研究交流を通じて、今後、一連の研究成果を更に発展させ、量子情報科学の今後十年の研究をリードするような大きな潮流を創成していきたい。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 7件

1. Y. Nakata, D. Zhao, T. Okuda, E. Bannai, Y. Suzuki, S. Tamiya, K. Heya, Z. Yan, K. Zuo, S. Tamate, Y. Tabuchi, and Y. Nakamura, “Quantum circuits for exact unitary t-designs and applications to higher-order randomized benchmarking”, PRX Quantum 2, 030339 (2021).

本論文では、高次の量子擬似ランダムネスを厳密に生成する量子回路を提案し、その応用として、ノイズな量子情報デバイスを検証する randomized benchmarking (RB) プロトコルの改善を行った。前者は数学の一分野における未解決問題を解決した点で量子情報の枠を超えた顕著な成果である。後者は現在のノイズな量子情報デバイスの改善に向けた実験手法を提案し、実際に実験実装したものであり、量子情報技術の堅実な発展に資するものである。

2. E. Wakakuwa and Y. Nakata, “One-Shot Randomized and Nonrandomized Partial Decoupling”, Commun. Math. Phys. 386, 589 – 649 (2021).

本論文では、量子情報通信の理論的な基盤である one-shot decoupling 定理を大幅に拡張し、one-shot partial decoupling 定理を導出した。One-shot decoupling 定理は量子情報科学の中でも最も重要な定理の一つであり、量子通信から量子誤り訂正符号、更には理論物理に至るまで数多くの応用が知られている。その定理の理論的拡張に成功した本成果は理論的には極めて高い価値を持つものである。その応用については、他の論文三本において言及している。

3. Y. Nakata, E. Wakakuwa, and H. Yamasaki, “One-shot quantum error correction of classical and quantum information: towards demonstration of quantum channel coding”, Phys. Rev. A 104, 012408 (2021).

本論文では、上記の one-shot partial decoupling 定理の応用として、ノイズな量子通信路を用いて量子情報と古典情報を同時に送信する「ハイブリッド通信」の原理限界を与えた。得られた結果は量子通信の性能評価の基盤を為すものであり、将来的な量子通信技術を支える成果といえる。更に、現在の量子技術でハイブリッド誤り訂正符号の原理実証が可能であることも示すことにも成功しており、現在のノイズな量子情報デバイスの応用にも貢献している。

(2)特許出願: なし

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. (国際会議招待講演)Y. Nakata, “Information leakage from black holes with symmetry”, Quantum Information and String Theory 2019, Kyoto, Japan, June 2019.
2. (国際シンポジウム招待講演)Y. Nakata, “Entanglement and Information Retrieval from Black Holes”, JAGFoS2019, Kyoto, Japan, September 2019.
3. (国際研究会招待講演) Y. Nakata, “Exact and approximate constructions of t -designs, and their applications”, Workshop on Quantum t -Designs and Applications in Quantum Computing, Edinburgh (online), UK, March 2022.
4. (国際研究会招待講演) Y. Nakata, “Information scrambling, quantum error correction, and information paradox with symmetry”, Recent progress in theoretical physics based on quantum information theory, Kyoto (online), Japan, March 2021.
5. (国際会議ロング・トーク)Y. Nakata et al, “Explicit constructions of exact unitary t -designs and applications to higher-order randomized benchmarking”, AQIS2021, Tokyo, Japan, September 2021.