

量子技術に関する情報科学科としての取り組み および牧野研究室の研究紹介

牧野 浩典*

Introduction of Makino laboratory

by

Hironori Makino

(Received on Jan. 11, 2024 & accepted on Jan. 12, 2024)

Abstract

This paper describes education and research related to the quantum technology in our department, followed by an introduction to current research topics in Makino laboratory.

Keywords: Quantum Computing, Quantum Annealing

はじめに

量子論の誕生から100年、情報科学は量子論を取り込んだ複合的な学問領域へと発展しました。量子コンピュータや量子テレポーションなど、量子力学の原理を応用した情報技術の研究が世界各国で活発になり、近年では組合せ最適化問題を高速に処理できる量子アニーリング方式のコンピュータや、原理的に破ることのできない量子暗号プロトコルが話題になっています。こうした現在の潮流は、量子論を基盤とする情報科学の新展開が、近い将来に情報化社会の基幹技術を生み出す可能性を示しています。本研究室ではこのような量子技術を支える基礎研究と応用研究をテーマに据え、教育と研究を行っています。特に力を入れて指導しているのは量子アニーリング方式の量子コンピュータで、組み合わせ最適化問題に対する応用手段が確立しています。この方式のコンピュータについてはカナダのD-Wave 社が開発途上の実験機 D-Wave Leap を公開しており、所定の手続きを行えば現在は誰でも利用することができます。

本稿では教育と研究の2つの側面から量子技術に関する情報科学科としての取り組みを紹介します。

本学科における量子コンピュータ教育

情報科学科の学生が量子技術を学ぶ最初の機会は3年次春学期に開講される主専攻科目の「情報数理工学」で、ここでは量子コンピュータの理解に必要な量子論の基礎と量子イジング模型について理解を深めます。続く秋学期の「情報科学ゼミナール」では量子アニーリング方式の発案者である東京工業大学・西森教授らが執筆した専門書を通読し、量子コンピュータの計算原理に関する理論的な知識を身に着けます¹⁾。研究室に入る4年次の春学期では「卒業研究1」の中で、量子コンピュータの計算過程を模擬したシミュレータの構築方法を修得し、実際に手を動かし、構築したシミュレータの動作確認を行います。

より具体的には Python などのプログラミング言語を用いてワークステーション上に量子アニーリングの仮想実行環境を展開し、ごく簡単な事例に対する仮想計算の結果を評価します。続く秋学期の「卒業研究2」では構築したシミュレータを既存の情報処理問題（巡回セールスマン問題やコミュニティ分割問題など）に適用、ノイズの影響を排除した理想的な量子コンピュータの挙動について理解を深めます。

この段階までで、学生は量子論に関する高度な専門知識と、シミュレーションを遂行するために必要な高度なプログラミング技能を身につけることができます。しかし、これだけで飽き足らない学生も多く、日々の研究の中で量子コンピュータを様々な専門分野に導入したり、実験機 D-Wave Leap 上での運用の可能性を評価するなど、実際の活用方法を意識し始めるようになります。専門的な研究を行うには大学院に進学しなければなりません。

大学院では1年次春学期に開講される「基礎物理学特論」にて、量子暗号と量子テレポーションに関する理論的な知識を修得します。また、「研究ゼミナール」において、量子アニーリングや量子状態の制御に関するより専門性の高い研究を行います。以下では研究室で大学院生が取り組んでいる幾つかの研究事例を紹介します。

最適解の検出頻度を向上させる リバース・アニーリング法

量子コンピュータの活用にはハミルトニアンと呼ばれるエネルギー演算子を個々の計算問題に応じて設計する必要があります。この設計においては、計算を安定させ、最適解の検出精度を向上させるノウハウを得ることが重要なテーマとなっています。前者はハミルトニアンに付加するペナルティ項の適切な与え方に関する研究で、国内外の研究者によって数多くの知見が積み上げられています。後者については、近年リバース・ア

ーリングと呼ばれる方法が考案され、解の精度が著しく向上することが話題になっています²⁾。

リバース・アニーリングとは量子コンピュータが通常のアニーリングによる計算過程を終えた後に行う補助的な計算過程です。通常のアニーリングでは最適解への確率的遷移が不十分な場合に、大きな効果を発揮することが確かめられています。通常の計算過程を終えた量子コンピュータのイジングスピンに対して、逆向きのエルミート変換を施すことで、計算過程をいったん途中段階に戻し、一定時間を経た後に順方向のエルミート変換で再び終状態に戻します。このような補助的な過程を付加することで確率的遷移が促進され、最適解の検出確率が著しく向上することが現象論的に示されています。ただし、検出確率の向上に対する理論的な裏付けはなく、現時点では緒についたばかりの研究テーマといえます。本研究の目的はシミュレータを用いて、リバース・アニーリングの効果を最大限引き出す条件を明らかにすることです。

ダイナミカルな性質を利用し 量子素子内の電子の運動を制御する

量子細線の加工技術が進歩し、現在は量子コンピュータで用いる基本素子をナノメートル・オーダーのスケールで設計することが可能です。このような素子では量子効果が強く働き、量子力学的な「重ね合わせの原理」を利用した情報処理が可能になります。現在、商用化が実現している D-Wave 社のコンピュータでは重ね合わせの原理の基づく情報処理が行われており、ある種の組み合わせ最適化問題を従来のコンピュータよりも高速に解くことが可能になっています。ただし、量子力学的なスケールの素子を用いた制御は現在の技術水準では難しく、代わりに同社のコンピュータには超伝導固体素子とジョセフソン接合の組み合わせで実現したマクロスケールの量子ビットが導入されています。この量子ビットに本来必要とされる量子効果が正しく働いているのかは、実のところまだ明らかになっていません。

本研究の目的は将来実現が期待されているミクロスケールの量子ビットにおいて、内部を流れる電子の挙動を理論的に制御する方法を確立することです。共鳴トンネル効果の一種である Chaos-assisted tunnelling を利用し、量子ビット内の電子の運動状態を強制的に変化させることで、これを実現したいと考えています。この方法は量子ビットに横磁場を印加する従来法と異なるアプローチですので、研究が進めばメリット・デメリットがより明らかになるものと期待しています。

量子シェル効果を利用した新しい分岐解析

われわれの社会の諸問題、交通流、経済、ウィルス感染者数、気象現象、心拍などは一定の規則に従って状態が変化することから力学系と見立てることができ、これまで様々な数理モデルが提案されてきました。分岐解析はこうした数理モデルにおける解挙動の理解・制御・予測・最適化のための重要な手段となり、諸問題の解決に繋がる様々な知見を提供しています。分岐解析についてはニュートン・ラプソン法のような目的関数の微係数を評価する方法が古くから知られていますが、目的関数が複雑な場合に解の探索に膨大な時間を要する事が問題となって

いました。この問題に対応するため、近年では数理最適化分野で生み出された PSO (粒子群最適化) や DE (差分進化)、ES (進化戦略) などメタヒューリスティックな方法にも注目が集まっており、目的関数の性質を問わない広範囲の力学系に対応できるようになっています。しかし、いずれにしても力学系の目的関数に頼るため、関数自体が容易に得られない非線形力学系では分岐点群の求解は困難でした。

本研究では量子化則を適用できる力学系に対し、量子系の準位統計の性質を利用して分岐点や固定点の位置などの推定値を与える新しい分岐解析法の実現を目指しています。分岐点上で起こる量子シェル効果と呼ばれる現象に注目することが、これを可能にする糸口を与えています³⁾。

量子アニーリングを利用した デジタルフィルターの瞬時設計

量子コンピュータは現在物理分野への応用が先行しており、工学分野では限られた領域で研究されています。しかしながら、組み合わせ最適化を瞬時に解くことのできる性質が工学分野に広まり利用されれば、革新的なブレイクスルーを起こす可能性があります。本研究の目的は CSD 係数を用いたデジタルフィルターの瞬時設計を量子アニーリングを利用して実現することです。

デジタル信号処理は工学分野における基盤的技術としての地位を確立しており、特にデジタルフィルターは観測信号に重畳されたノイズを除去したり、信号を変換したりと様々な目的に用いられています。フィルターの実装には大量の乗算器が必要となりますが、高性能なフィルターほどその傾向が強く、実装コストが高くなる傾向にあります。この問題に対しては乗算器に CSD 係数を用いることで回路規模を削減し、コストを抑える方法が示されています。しかしながら、その設計には莫大な計算コストが必要で、組み合わせ最適化問題における求解の難しいクラスに属することが知られています。情報科学科の高橋智博先生との共同研究です。

おわりに

本稿では教育と研究の2つの側面から量子技術に関する情報科学科としての取り組みを紹介し、加えて牧野研究室で目下進行中の研究テーマを紹介しました。近い将来より実用性が増すことが期待されている量子技術ですが、情報科学科に入学してくる学生の間でも、量子コンピュータなど量子技術に興味を持つ学生数は年々増加の一途を辿っています。一方で、この分野に精通した研究者・技術者は国内外において極めて少ないのが現状で、こうした状況を解決する事は教育機関に託された一つの大きな使命だと考えています。

参考文献

- 1) 西森秀稔, 大関真之, 「量子アニーリングの基礎」 共立出版
- 2) D-wave white paper series, “Reverse Quantum Annealing for Local Refinement of Solutions.”
- 3) H. Makino, PTEP Volume 2022, Issue 9, 093A02 (2022).