



第7回アドバンス・シミュレーション・セミナー2023 開催報告

国立研究開発法人 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
副研究センター長 川畑 史郎 様

「量子コンピュータと量子アニーリングマシン：基礎から最先端まで」

アドバンス・シミュレーション・ニュースは、アドバンスソフト株式会社が2021年度から、我が国における計算科学技術の振興を目的として、幅広い分野の最先端研究を対象として開催している「アドバンス・シミュレーション・セミナー」の開催報告と今後の開催予定をご案内するサービスです。

本セミナーで紹介される多種多様な最先端研究をきっかけに、企業の研究開発を担う技術者の方が新たな視点を持つこと、最先端研究を産業に応用する起点となること、長期的には計算科学シミュレーション分野の裾野が広がること等を期待しています。

開催概要

- 日時：2023年9月14日（木）14:00～15:30
- 開催方法：オンラインセミナー（Zoomにて開催）
- 主催：アドバンスソフト株式会社 出版事業部
- 講演概要

近年、量子コンピュータと量子アニーリングマシンに対して大きな注目が集められるようになってきた。

量子コンピュータを用いると、機械学習、量子化学計算などの問題を従来コンピュータよりも高速に解くことが可能となる。そのため、世界的大企業が量子コンピュータハードとソフトの開発を行っている。

一方、組合せ最適化問題専用コンピュータであ



る「量子アニーリングマシン」も近未来に社会実装可能な量子ハードウェアとして注目を集めている。

そこで、本講演においては、これらのハードウェアの最新研究開発動向について紹介する。また、計算科学・計算工学への応用についても講演を行う。

ご講演内容

本稿は、2023年9月14日に開催した「アドバンス・シミュレーション・セミナー2023」において、川畑 史郎 様にご講演いただいた内容をアドバンスソフトがまとめたものです。

1. 講演内容

1.1. 量子を用いた新原理コンピュータ

量子力学原理に基づくコンピュータには、量子コンピュータと量子アニーリングマシンの二つがある。これらは同じものと誤解されることもあるが、全く別物である。量子コンピュータはどんな問題でも解ける汎用のコンピュータで、特定の問題を高速に計算可能という点で注目されている。量子アニーリングマシンは組合せ最適化問題専用のコンピュータである。

1.2. 量子コンピュータ入門

量子コンピュータとは情報処理に量子力学現象を利用したコンピュータのことで、厳密な定義では量子チューリングマシンと等価なコンピュータのことである。量子アニーリングマシンはこの定義を満たさない。

量子力学とは電子や原子核などミクロな粒子を記述する物理理論で、ミクロな世界はシュレディンガー方程式によって記述される。ミクロの世界では、トンネル効果、重ね合わせの原理、量子絡み合いといった不可思議な現象が発現する。40年前にこれらの現象をコンピュータのリソースとして情報処理に利用することを考えたのが、天才物理学者ファインマンである。

重ね合わせの原理とは、量子力学的粒子が異なる状態を同時に取りうるということである。状態はシュレディンガー方程式の解として表現され、シュレディンガー方程式は線形のため、解候補の重ね合わせが方程式の解となることに対応している。

普通のデジタルコンピュータが0あるいは1の値をとる古典ビットを使うのに対し、量子コンピュータは0と1の重ね合わせの量子ビットを使う。量子コンピュータとデジタルコンピュータの違いはこの点だけである。量子ビットの作り方の例としては、電子や原子核のスピンの上向きと下向きの重ね合わせなどがある。他の方法で実装されている量子コンピュータも開発されている。

量子コンピュータでは重ね合わせ原理を利用した並列計算が可能である。1つの量子ビットでは古典1ビットの重ね合わせ(2個)の状態を同時に格納できる。N個の量子ビットでは 2^N 個の重ね合わせを表すことができ、これを入力とした量子並列計算ができる。古典コンピュータではそのうちの1つの状態しか格納できない。

しかしながら、量子コンピュータはどんな問題でも高速に解けるわけではなく、指数関数的高速性〔量子加速〕が保証されているのは数多ある数学的問題のうちわずかに100個程度である。ただし、この100個の問題には、素因数分解、機械学習、量子科学計算、金融、量子多体系シミュレーション、連立方程式などが含まれ、人工知能、創薬、運輸、新材料開発、金融、計算工学などの分野で大いに役立つことが期待されている。

量子化学計算で解くべきシュレディンガー方程式は、量子コンピュータでは高速計算できて、創薬、触媒、新材料開発などがキラーアプリになると期待されている。機械学習では、古典データの量子機械学習のアルゴリズムが開発されていて、人工知能がキラーアプリになると期待されている。ただし、古典データをどのように効率的に波動関数に埋め込むかという問題(QRAM問題)があり、そこはまだ解決していない。量子多体系のシミュレーションも量子コンピュータで高速計算できることが知られている。

計算工学の分野では、HHL (Harrow-Hassidim-Lloyd) アルゴリズムが注目されている。これは疎な線形連立1次方程式を解くための量子アルゴリズムで、指数加速的に高速に解くことができる。これは汎用性が高く、流体力学、制御工学、弾性体力学、熱工学、電磁波工学、プラズマ工学など疎行列を解く問題

に帰着される分野すべてに応用することができる。ただし、HHL アルゴリズムは誤り耐性汎用量子コンピュータが必要である。また、量子機械学習と同様、QRAM問題がある。

意外な分野としては金融での応用も注目されている。量子コンピュータの HHL アルゴリズムがポートフォリオ最適化に、振幅推定アルゴリズムがオプション取引に適用できることが知られていて、高速取引などがキラーアプリになると考えられている。

1.3. 量子コンピュータ最新動向

超伝導を用いた量子コンピュータでは、近年量子ビットの数が指数関数的に増大している。2022年 IBM が433量子ビットの量子コンピュータを開発した。100万量子ビットに到達すると、誤り耐性汎用量子コンピュータが実用化する。現在のペースで増えていくと2035年ごろに到達することが期待されるが、ハードウェアの実装面では1000量子ビットの壁、10000量子ビットの壁が存在し、まだ解決方法は見つかっていない。日本では理化学研究所と富士通が53量子ビットの国産量子コンピュータを開発している。世界ではアメリカと中国が激しく競争している。

超伝導以外に原子、光、イオン、半導体 CMOSなどを量子ビットとして利用する量子コンピュータの開発も行われている。

超伝導量子コンピュータのハードウェア実装には最先端のエレクトロニクス技術が使われている。半導体の3次元実装、マイクロ波信号処理LSI、低温動作CMOS、素子ばらつき評価、大型希釈冷凍機、フレキシブル高密度ケーブルなどが技術トレンドである。

超伝導量子ビットとは、超伝導体から構成される電気回路で、トランズモン(非線形LC共振回路)が使われている。トランズモンの非線形インダクタンスに超伝導体のジョセフソン接合が使われている。回路は1mm平方の大きさで実装され、これら先端エレクトロニクス技術を活用して集積化する。

量子コンピュータ実機へのアクセスは、Microsoft の Azure Quantum、Amazon Braket などクラウドサービスとして提供されている。まだ実証実験のレベルであるが、化学、自動車、電力、金融などの領域で活用されている。日本においても、理研、東大、NTT、阪大、NICT、産総研、東工大、富士通、日立、NECなどが国産量子コンピュータの開発を行っている。

1.4. 量子アニーリングマシン入門

量子アニーリングとは、東京工業大学の西森先生、デンソー及び産総研の門脇さんが1998年に提唱した組合せ最適化問題を解くための計算処理である。組合せ最適化問題は、例えば巡回セールスマン問題やカーナビの最短経路問題、半導体の配線問題、従業員のシフト計画など様々な場面に現れる。

量子アニーリングにおいては、組合せ最適化問題をイジングモデルの最低エネルギー状態探索問題に対応付けることが必要である。これはお互いに相互作用する磁石の配置で決まるエネルギー関数を最小化

する問題である。これも組合せ最適化問題の一種であり、NP 困難問題である。元の最適化問題の情報は、エネルギー関数の係数の情報に埋め込まれる。

イジングモデルを解くには、熱揺らぎを徐々に減らすシミュレートドアニーリングでエネルギーの低いところを探す方法がこれまで用いられてきたが、量子アニーリングでは、すべての解の重ね合わせを考えて量子揺らぎを徐々に減らすことで、エネルギーの低いところを探している。どちらが優れているかは問題に応じて異なる。

D-Wave Systems はスピンに超伝導磁束量子ビットを用いてイジングモデルをハードウェア化した。超伝導では電気抵抗が 0 なので電流が永久に流れ続ける性質を用いている。時計（反時計）回りの永久電流がビットの 0（1）に対応する。

1.5. 量子アニーリングマシン最新動向

量子アニーリングマシンは、2011 年に D-Wave Systems により既に商用化されている。現在 5600 量子ビットの商品 D-Wave Advantage が販売されている。D-Wave Systems 以外では MIT (25 量子ビット)、産総研 (32 量子ビット)、NEC (8 量子ビット) で超伝導量子アニーリングマシンの開発が行われている。産総研は日本初の国産量子アニーリングマシン AQUA を開発し、NEC は量子パラメロン方式で高い量子コヒーレンス性能を持っている。量子アニーリングマシン実機に対するクラウドサービスが Fixstars によって提供されている。このクラウドサービスを用いることで、D-Wave Systems 量子アニーリングマシンだけでなく、国内ベンダーが提供する各種古典的アニーリングマシン（日立、NEC、富士通、東芝）、IBM 量子コンピュータ、商用数理最適化ソフト Gurobi、量子コンピュータ回路シミュレータ Qulacs を使って組合せ最適化問題を解くことが可能となる。

組合せ最適化問題は様々な産業分野において重要な例がいくつもある。有名な例としてフォルクスワーゲンが、北京のタクシーが街の中心部から空港に行く際、渋滞を防ぎながら最短時間で到着するルートをと、D-Wave Systems の量子アニーリングマシンを使って数秒で導き出した例が知られている。三井住友銀行では従業員のシフト計画に量子アニーリングマシンを使って、実務で使いやすい解を得ることができている。

しかしながら、量子アニーリングが古典アニーリングや古典アルゴリズムより高速になるという理論的な証明はなく、ノーフリーランチ定理が成り立つのではと考えている研究者は多い。実際に D-Wave Systems の量子アニーリングマシンを使ったベンチマーキングにおいても、古典コンピュータより早くなるケースもあれば遅くなるケースもある。特に、高速化されると期待される例として、量子スピン系、スピングラスなどの物性系のシミュレーションが最近注目を集めている。

2. 聴講における感想（アドバンスソフト）

量子コンピュータについて、その定義、現在の状況、抱えている課題、今後の展望について、正しく理

解するために必要な情報が網羅されている貴重な講演であった。計算機を利用する立場としては、実用的な量子コンピュータ、量子アニーリングマシンの出現を心待ちにしている。同時に課題となる要素技術については、現在のシミュレーション技術で我々も微力ながら解決のために貢献し、この分野がさらに発展することを期待したい。

【ご経歴】

1998 年 大阪市立大学 工学研究科 博士課程修了（工学博士）。

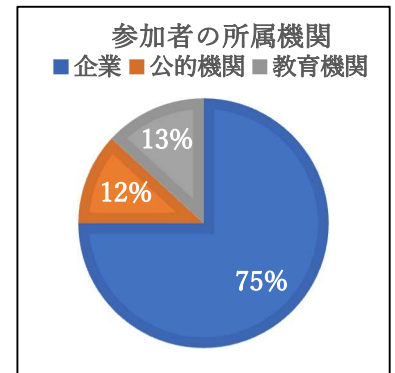
1998 年 通産省 電子技術総合研究所 研究員。

2001 年 産業技術総合研究所 研究員。

現在 同副研究センター長。その間、2018 年より、光・量子飛躍フラッグシッププログラム Q-LEAP SPD。2019 年より、量子 ICT フォーラム理事。2020 年より、ムーンショット型研究開発事業 目標 6 アドバイザー。

参加者

申込者は 195 名、当日の参加者は 160 名であった。参加者の内訳は、企業が 120 名、公的機関が 19 名、教育機関が 21 名であった。主な業種は、「材料/素材」、「大学/教育機関」、「自動車/自動車部品」、「官公庁/公的機関」であった。主な職種は、「研究/開発」であった。



参加者のご意見

- 基礎から最先端事例まで非常にわかりやすくかつ整理してまとめられていて分かりやすかった。本講演は同等の内容で今後もやっていただくと、量子コンピュータ初学者の助けになると思う。
- 量子コンピュータと量子アニーリングの違いを明快に教えていただいた上で、最新状況を教えていただいた流れがとても良かったです。

公開資料

今回のご講演の YouTube 動画は非公開です。ご講演の資料は、事前登録された方に事前配付したのみです。

右の QR コードから過去のアドバンス・シミュレーション・セミナーの YouTube 動画をご覧ください。



今後の開催予定

アドバンス・シミュレーション・セミナー

2023 の開催予定

<https://www.advancesoft.jp/seminar/11637/>

No	日程 受付状況	内容	テーマ
第1回	4月21日(金) 終了	「 防災・インフラ分野でのシミュレーションへの期待と課題 」 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 部門長 堀 宗朗 様	防災・インフラ
第2回	5月19日(金) 終了	「 半導体デバイスの歴史と展望 」 IEEE LIFE FELLOW 広島大学 名誉教授 角南 英夫 様	半導体
第3回	6月22日(木) 終了	特別セミナー 「 複雑流動現象の数値シミュレーション 」 大阪大学 基礎工学研究科 機能創成専攻 教授 後藤 晋 様 ----- 「 機械学習による流体解析の拡張 」 University of California, Los Angeles (UCLA) 教授 平 邦彦 様	複雑流動・機械学習
第4回	7月21日(金) 終了	「 GPU スパコンによる混相流シミュレーション・流体構造連成のシミュレーション 」 東京工業大学 学術国際情報センター 教授 青木 尊之 様	流体・HPC
第5回	8月3日(木) 終了	「 原子力安全に必要となる計算科学技術への期待 」 東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻 教授 笠原 直人 様	原子力安全
第6回	8月28日(月) 終了	「 サイバー空間の脆弱性と AI: エコーチェンバー、ディープフェイク、ChatGPT の社会的影響 」 東京工業大学 環境・社会理工学院 イノベーション科学系 准教授 笹原 和俊 様	生成 AI
第7回	9月14日(木) 終了	「 量子コンピュータと量子アニーリングマシン: 基礎から最先端まで 」 国立研究開発法人 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 副研究センター長 川畑 史郎 様	量子コンピュータ
第8回	10月6日(金) 終了	「 爆轟から見える CAE の方向性 」 青山学院大学 理工学部 名誉教授 林 光一 様	爆轟
第9回	11月10日(金) 終了	「 都市のデジタルツイン 」 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 デジタルアーキテクチャ研究センター 総括研究主幹 中村 良介 様	デジタルツイン
第10回	12月15日(金) 受付中 	「 計算物質科学による 2.5 次元物質科学研究: 原子層物質複合構造体と外場 」 筑波大学 数理物質系 教授 岡田 晋 様	ナノ

【お問い合わせ先】

アドバンスソフト株式会社 出版事業部
〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台四丁目3番地 新お茶の水ビルディング 17階西
TEL: 03-6826-3971 FAX: 03-5283-6580 E-mail: office@advancesoft.jp
<https://www.advancesoft.jp/>

Advancesoft



当社では随時人材の募集も行っております。
<https://www.advancesoft.jp/recruit/>