



アドバンス・シミュレーション・ニュース

Vol.2, No.8 (2025年2月6日発行)

第8回アドバンス・シミュレーション・セミナー2024 開催報告

九州大学 大学院システム情報科学研究所

情報知能工学部門 主幹教授 井上 弘士 様

「極低温超伝導コンピュータ・アーキテクチャ技術とその新展開」

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：2024年11月22日（金）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

コンピュータの発展を支えてきた半導体の微細化がついに終焉を迎えつつある。いわゆる、ポストムーア時代の到来である。その一方、ニーズ面ではビッグデータやAI処理に代表されるように高度かつ複雑なアプリケーションが爆発的に普及しており、持続可能な高度情報化社会を実現するには更なる情報処

理能力の向上が求められる。この問題を根本から解決するには、半導体微細化に頼らない新たなコンピュータ・システム構成法を開拓しなければならない。本講演では、世界最先端を走り続けている極低温超伝導コンピュータ・アーキテクチャ技術を紹介し、今後のコンピューティング技術の方向性を議論する。

本稿は、2024年11月22日に開催した「アドバンス・シミュレーション・セミナー2024」において、井上 弘士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。

ご講演内容

1. 講演内容（井上先生）

1.1. はじめに

今回の講演では、最初にコンピュータの動作原理とその歴史を簡単に振り返りながら、それを受けて次の世代の新しいコンピュータの姿とはどのようなものかという観点で、我々が現在進めている極低温超伝導コンピュータというものの研究内容を紹介し、今後の展開を紹介する。



1.2.5 分で分かるコンピュータの動作原理

コンピュータではマイクロプロセッサと言われる頭脳の部分と情報を記憶するメモリの部分がある。このメモリ部分にプログラムコードと入力データが保存されており、このプログラムにはこのマイクロプロセッサが処理すべき手順が書かれている。このコンピュータの頭脳であるマイクロプロセッサでは単純な基本的な演算、例えば足し算、引き算、掛け算、割り算という四則演算であったり、ある種の論理演算であったりと、非常に単純な計算しかできない。一方で、このプログラムにおいては、我々はもっと高度で複雑な機能を書き下す必要がある。プログラムで記述された高度な機能は、実際には、この足し算、引き算、掛け算、論理演算、といったような簡単な演算、つまりマイクロプロセッサが直接計算できる演算の組み合わせに置き換えてメモリに格納されているということになる。そして、このマイクロプロセッサは、高度な機能が書かれた手順書であるプログラムをマイクロプロセッサ自身が実行できる単純な処理の組み合わせ（命令セットで定義された命令の組み合わせ）に置き換わったものに対して、一つずつ、その処理を順に進めていく。これがコンピュータの基本動作原理である。

1.3. コンピュータ・アーキテクチャ研究動向

このように、コンピュータではプログラムで書かれた内容を命令の組み合わせに置き換えて、それを一つずつ処理していくことであり、コンピュータの性能が高いというのは、単位時間当たりで処理可能なプリミティブな操作（命令の実行）が多いということである。コンピュータは、この50年間非常な速度で発展を遂げてきているが、その過程でいろんなボトルネックが出てきた。大きなボトルネックが出てきたのは2000年頃の消費電力の問題である。従来クロック周波数というのは処理速度を求めて常に上がってきたがそれが飽和してきた。そこで動作周波数を上げる代わりに並列処理を行うというマルチコア／メニーコアという時代になった。利用可能なトランジスタ数は微細化によって順調に増え続けてきたが、2030年から2040年ごろには限界がくると言われている。コンピューティング能力を提供するシーズとしては、これ以上コンピュータの性能を上げることが難しい時代になる。その一方で、社会からはより高度な複雑なシミュレーションを高速に問題が解きたいというニーズがある。この間のギャップをどうやって埋めるかという話になってくるが、その一つの方向性として新しいデバイスを使ったコンピューティングを我々は探索している。このときのポイントは、コンピュータをどうやって作るかというコンピュータサイエンスと、デバイスをどうやって作るかというデバイスサイエンスの両者がタッグを組んで連携して研究を進めていく事が非常に重要になってくると考えている。今まで、半導体チップの中のトランジスタ数を増やし、増えた圧倒的な量をコン

ピュータの性能に変換するという量的イノベーションを続けてきたわけであるが、今後は新しい質的なイノベーションを見出す必要がある。皆さんご存知のキーワードの中で言うと、量子コンピュータというのが一つのこの方向性だと私は考えている。今の半導体集積回路とは異なる新しいデバイスを用いて新しい計算モデルを作っていくという方向である。これはコンピュータサイエンスやっている者、特に計算機工学と言われる分野にいる研究者にとっては、新しいコンピューティングプラットフォームを探索していくという、非常にエキサイティングなところであるが、逆にコンピュータを使うユーザーもしくは皆さんのようにシミュレーターを作ってそれを提供する、あるいはシミュレーターを使うという観点から見るとこれまでの連続的なコンピュータの発展ではない急激なジャンプをコンピュータのハードウェア・プラットフォームが行う可能性があるということになる。そうなった時に、ではこれまでのソフトウェア資産はどうなるのかとか、これまで計算した結果を再利用できるのかといったようなことも、もしかすると考えなければいけない時代がやってくるかもしれない。まとめると、今後は新しいデバイスの利用を見越したコンピューティングプラットフォームを考えていかなければいけない。そこでは、新しいデバイスをどうやってうまく使うのか、どうやってコンピューティングにつなげるのかというのをソフトウェアとハードウェアの双方向から探索していかなければいけないということになってくる。

1.4. 超伝導コンピューティングの場合

このような歴史的背景の元、我々は一つの新しいデバイスを用いた技術として超伝導コンピューティングの研究を行っている。単一磁束量子(SFQ)回路というものがあり、このデバイスの特徴は4Kという極低温環境下で動作する超伝導体デバイスであり、概念的には、リングに電流が流れた際にできる一本の磁束をデジタル的に1、周回電流がない時を0というように考えると情報を記憶できる素子となり、このデバイスを使って情報を伝達するときにはパルス幅は1ピコ秒、電圧は1mV程度の非常に微弱なパルス信号を使うことができる。超伝導状態で動作するために抵抗はほぼ0なので理論上は光と同じ程度の高速度を実現しつつ消費電力に関しては今のコンピュータ等のデバイスの2~3桁削減を実現できるポテンシャルを持っている。このSFQ回路を用いたプロセッサを作るという研究は古くからあったが、動作速度だけみると非常に高パフォーマンスなのだが、残念なことにプログラムとしての手順通りの演算を連続的に実行するという観点から見ると全く性能が出ない事が判っていた。しかし、過去の設計というのは、目的が回路動作の実証にあったので、いわゆるビットシリアルな計算をしており、それでは性能が出ていなかったのである。そこで我々はビットパラレルにすべきだという提案をし、また従来のプロ

セッサで行われてきたパイプライン処理とは粒度が全く違うSFQ向けビットパラレル型ゲートレベルパイプラインアーキテクチャを考案した。当初否定的な意見が多数あったが、実際に50GHzという極めて高速で動作する回路を作成し、コンセプト検証(2017)から始まり、掛け算回路(2019)、小規模ながらAI処理のプロトタイプ(2020)まで実証する事ができた。この過程で重要となるのが、①「SFQ デバイスを用いたゲートレベルのモデリング」、ゲートを組み合わせることで何かのファンクションを作る②「マイクロアーキテクチャモデリング」、次にファンクションを組み合わせる事でシステムを作る③「アーキテクチャモデリング」といった3段階のモデリングを行い、シミュレーションを行うことで全体を回して最適化を行うという環境を作る事ができたという事であり、このことが大きなブレークスルーとなった。現在ではさらに研究が進み、100GHzを超えるような回路をも作れるようになってきている。

1.5. 量子コンピューティングへ

最後に、量子コンピューティングへの応用展開について触れたい。ニュース等で理化学研究所が国産初の量子コンピュータを作成したという話題があるが、将来的には、極低温環境下で極めて低消費電力で動作する回路を使ったマイクロプロセッサのようなものが必要になってくる。ここに先ほど説明した単一磁束量子回路SFQを使ったプロセッサが使えるのではないかという考えが出てくる。現在SFQ技術を使った量子コンピュータの制御に関する研究が進行中である。誤り訂正技術等の制御機能の一部を冷凍機の中に入れる可能性等、冷凍機内での極低温環境下でのコンピューティング能力を上げることによる多量子ビットの配置可能性の提案等を考えている。今後の展望ということでは、デバイスの研究だけとかアプリケーションソフトウェアの研究だけではダメで両方見る事が必要である。これを我々はCSDS (Computer Science×Device Science) サイクルと呼んでいる。最後になるが、コンピューティング力は国力である。求められる制約が変わればコンピュータのあるべき姿も変わる。このような変化を世界に先駆けて察知予測して、最先端のコンピューティング技術を開拓し続けていくというのが必要になってくる。そのためには、デバイス技術だけでなく、設計技術、ソフトウェア技術、応用展開技術といったようなところを含めたCSDS サイクルというものを回すという事が非常に重要になってくる。現時点では、残念ながらこういうことをできるツールやシミュレーションフレームワークというものはまだ存在しないが、これを実現していくための様々なシミュレーション技術といったようなところも今後見ていく必要があると思われるし、その発展にも期待しているところである。

1.6. 聴講における感想 (アドバンスソフト)

ポストムーア時代を迎え、半導体の微細化に頼ら

ない新たなコンピュータシステム構成法として提唱されているCSDS サイクルという考え方は非常に興味深いものであり、シミュレーション技術を開発しているものとしては、コンピュータ・アーキテクチャそのものが変化するかもしれないということも考慮して開発を進めて行かなければならないと感じた。

【ご経歴】

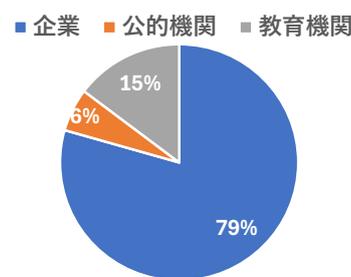
1996年に九州工業大学 博士課程(前期)、2001年に九州大学 博士課程(後期)を修了。博士(工学)。2001年より福岡大学 工学部電子情報工学科 助手。2004年より九州大学 大学院システム情報科学研究科 助教授、2015年より同大教授、現在に至る。コンピュータ・アーキテクチャ、特に、超伝導コンピュータ、AI アクセラレータ、IoT プラットフォーム、スパコン、量子コンピュータなどの研究に従事。

参加者のご意見

申込者は56名、当日の参加者(視聴者)(社外)は34名でした。参加者(視聴者)の内訳は、企業が27名、公的機関が2名、教育機関が5名でした。主な業種は、「材料/素材」、「ソフトウェア/システム」、「電機/精密機器/IT機器」、「建築/土木」でした。主な職種は、「研究/開発」、「技術/設計」でした。

感想では、「コンピュータの未来像が見えた」や「最先端研究と今後の動向に関して、知識を深めることができた」「意外な所で古典コンピュータで検討した技術と量子コンピュータが繋がった点に驚きました」等の回答をいただきました。

参加者の所属機関



公開資料

ご講演のYouTube動画は、右のQRコードからご覧いただくことができます。



ご講演の資料は、右のQRコードの「資料をダウンロードする」からログイン後、ダウンロードすることができます。ログインアカウントをお持ちでない方は、「資料をダウンロードする」から新規メンバー登録後、ログインしてダウンロードすることができます。



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動画をご覧いただくことができます。



今後の開催予定

アドバンス・シミュレーション・セミナー

2024 の開催要領

<https://www.advancesoft.jp/seminar/20299/>

No.	日程 受付状況	内容	テーマ
第1回	4月19日(金) 終了	「 ロケットと宇宙機に係るさまざまな自由表面流 」 東京大学大学院 工学系研究科 航空宇宙工学専攻 教授 姫野 武洋 様	自由表面流の予測 と管理
第2回	5月17日(金) 終了	「 ペプチド創薬を加速する分子動力学シミュレーションと深層学習 」 東京工業大学 情報理工学院 情報工学系 教授 秋山 泰 様	バイオ・計算科学
第3回	6月28日(金) 終了	「 デトネーションエンジン開発状況とシミュレーション事例の紹介 」 慶應義塾大学 理工学部 機械工学科 教授 松尾 亜紀子 様	航空宇宙エンジン
第4回	7月12日(金) 終了	「 シミュレーションのための情報可視化 」 お茶の水女子大学大学院 人間文化創成科学研究科(兼) 文理融合 AI・データサイエンスセンター長 教授 伊藤 貴之 様	可視化・AI
第5回	8月23日(金) 終了	「 シミュレーション技術のリスク評価への適用 」 東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻 教授 高田 孝 様	原子力・リスク評価
第6回	9月20日(金) 終了	「 ポスト・エクサ、ポストムーア時代の HPC と AI 」 神戸大学大学院 理学研究科 惑星学専攻 特命教授 牧野 淳一郎 様	HPC・AI
第7回	10月11日(金) 終了	「 建築・都市の新たな風環境デザイン 」 千葉工業大学 創造工学部 建築学科 元教授 森川 泰成 様	建築・都市の新たな 風環境デザイン
第8回	11月22日(金) 終了	「 極低温超伝導コンピュータキテクチャ技術とその新展開 」 九州大学大学院 システム情報科学研究院 情報知能工学部門 主幹教授 井上 弘士 様	計算機アーキテク チャ
第9回	12月17日(火) 終了	「 スマートエネルギーマネジメントシステムのデザイン 」 東京科学大学 総合研究院 ゼロカーボンエネルギー研究所 特任教授 浅野 浩志 様	エネルギーシステ ム、GX
第10回	2025年 1月17日(金) 終了	「 AI や電気自動車用半導体単結晶育成のための数値解析と実験 」 東北大学 未来科学技術共同研究センター 特任教授 柿本 浩一 様	材料科学・AI

【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/>



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



Copyright © 2025 AdvanceSoft Corporation. All right reserved.