

[面白いぞ量子技術]

3 量子技術を利用した 次世代アクセラレータの活用

基
般

多和田雅師 | 早稲田大学

松田佳希 | (株) フィックスターズ

田中 宗 | 慶應義塾大学

楊 天任 | (株) QunaSys

量子技術を用いた 次世代アクセラレータの紹介

近年、量子技術を用いて計算を高速化する専用計算機の研究開発は大きな盛り上がりを見せている。専用計算機は次世代アクセラレータと呼ばれ、量子技術として量子アニーリング、Noisy Intermediate-Scale Quantum technology (NISQ)、誤り耐性量子計算 (Fault-Tolerant Quantum Computation, FTQC) の適用が期待されている。量子技術を用いた次世代アクセラレータの研究開発の盛り上がりの理由として大きく分けて社会ニーズと技術シーズの2つが挙げられる。第一に、社会ニーズ側の観点からの注目度の高まりである。Internet of Things (IoT) 技術をはじめとしたデータ収集の技術により、データの種類や量が膨大に増加している現在において、大規模データの高速高精度処理の実現が喫緊の課題である。その状況の中で、量子技術を用いた次世代アクセラレータが大規模データの高速高精度処理に資すると期待されているという側面がある。第二に、技術シーズ側の観点からの量子技術を用いた次世代アクセラレータ設計の現実感の高まりが挙げられる。量子技術を用いたアクセラレータ開発の基盤となる設計技術が着々と進化しており、実際に動作させることが可能な量子アニーリングマシンや NISQ デバイスが出て

きつつあるという側面がある。

量子技術を用いた代表的な次世代アクセラレータとして、量子アニーリングを用いるイジングマシン、NISQ デバイス、誤り耐性量子コンピュータについて、以下、簡単に概略を紹介する。

イジングマシンは、組合せ最適化問題の高効率解法が可能であると期待される次世代アクセラレータである。組合せ最適化問題とは、膨大な選択肢の中から、与えられた制約条件を満足し、かつ、目的関数を最大化（あるいは最小化）する選択肢を探索することを目的とした問題である。

NISQ デバイスは、誤り訂正がないアナログな量子コンピュータである。誤り訂正がないため、後に述べる誤り耐性量子コンピュータに比べれば性能が限定的になってしまうものの、NISQ デバイスを積極的に用いた産業・社会応用を可能にする理論枠組みの提案や NISQ デバイス実機を用いた検討が活発に行われてきている。

誤り耐性量子コンピュータは、量子技術を用いた次世代アクセラレータのハードウェア開発が現実的になるという想定の前から、情報科学と量子力学の境界領域としての研究として理論的な研究やアルゴリズム提案の研究がなされてきた。誤り耐性量子コンピュータの実現には大きなハードルがあるが、誤り耐性量子コンピュータを用いることを前提とした

量子アルゴリズムの理論は数学的に保証されたものであるため、誤り耐性量子コンピュータが実現されたときのインパクトは計り知れない。

量子アニーリングやNISQについて、最近では量子コンピュータと古典コンピュータ（量子技術を用いない従来型コンピュータ）とのハイブリッド利用を念頭に置いたアルゴリズム提案や実機を用いた実験も進められている。これは、量子アニーリングやNISQが全体の情報処理の一部を高速化するアクセラレータとしての有用性を明確化するための重要な研究である。

以下、本稿の構成について述べる。まずイジングマシンの活用事例探索の研究開発について紹介し、次にNISQデバイスや誤り耐性量子コンピュータの活用事例探索の研究開発について紹介する。最後にこれらの量子技術を用いた次世代アクセラレータ基盤を構築する意義と最新の研究開発の現状について述べる。

イジングマシンの活用事例

量子アニーリング等のイジングマシンは統計物理学におけるイジング模型に代表される0-1整数二次計画問題の求解に特化したハードウェアである。すなわち、イジングマシンは、二値の決定変数に対する二次形式の目的関数を入力とし、目的関数が最小となる決定変数の近似解を出力する。高い汎用性を備えている一方で、任意の組合せ最適化問題に対してイジングマシンを適用するためには、与えられた問題を「二値変数」、「二次形式」の目的関数で表す必要がある。種々の組合せ最適化問題、とりわけNP完全・NP困難問題に対するこの「イジング定式化」の方法

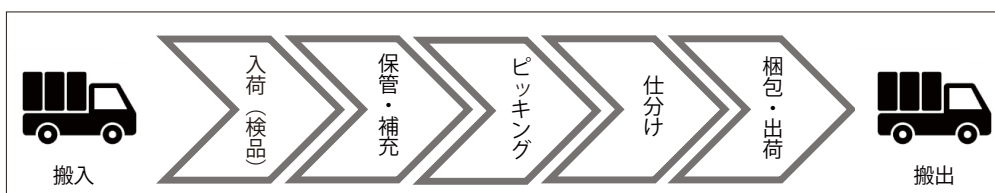
についての議論が活発に進められてきている。それらを基礎とした実問題における応用の例として、渋滞回避を目指した経路選択問題、工場内の無人搬送車の経路最適化、金融商品のポートフォリオ最適化、広告配信最適化、矩形パッキング問題、スロット配置問題、誘導部分グラフ同型問題など、多様な領域における組合せ最適化問題への取り組みがあり、イジングマシンによる処理が試みられている。本章では、そのような活用事例の1つとして、物流センターにおける人員配置最適化の取り組みとその実証実験の成果について紹介する。

物流センターの概要

本実証実験の対象とする物流センターは通信販売事業者専用の出荷センターである。約1,000人の従業員を擁し、1日あたり約30,000件の商品を出荷している。本物流センターにおける作業のプロセス（図-1参照）は次の通りである。通信販売業者から搬入された商品は、倉庫エリアに入庫され、検品が行われた後、保管エリアに移動される。商品は、消費者の注文に基づき、ある一定の単位の注文数ごとに保管エリアからのピッキング作業によりまとめられる。その後、最終工程である梱包エリアにて消費者ごとに商品が梱包され出荷される。作業者は各エリアに独立して作業しており、作業場所あるいは作業分類に基づき担当作業が割り当てられる。この割り当てが、物流センターにおける作業者の人員配置計画である。

人員配置の最適化

本物流センターにおける人員配置計画は日々の重要な業務の1つである。なぜなら各作業に対する適切な担当者の決定が、物流センターにおける全体の



■図-1 本物流センターにおける主要業務プロセス

特集 Special Feature

効率性に影響を及ぼすためである。日々の注文によって計算される各業務の目標量を達成するために、当日の出勤者名簿、そしてその名簿に基づく作業者の作業可能量を考慮した人員配置計画が行われる。

実証実験では、イジングマシンを用いた人員配置計画の最適化を目的とする。そのためには、何を最適化するのかについて現実に即した妥当な定義を行い、それを定量的に数式で表現する必要がある。業務における目標量を達成するという指標においては、達成度合いの充足率を最大化することで定義されるのが自然である。本実証実験では図-2のようにコスト削減に直結する作業数数の最小化というよりは、与えられた目標量を満たしつつ、従業員全体での負担軽減・負荷の均等化に資する「効率の良い配置と作業工数の平等化」に着目した人員配置計画を提示するものである。

一方で高い精度で充足率を推定するには、各作業者の作業可能量（スキル）の見積もりが重要になる。本物流センターでは、作業者はハンディターミナルを用いて作業管理を行っており、そのデータは倉庫管理システム（WMS）に蓄積される仕組みを持っている。このデータを用いると、各作業者の単位時間あたりの作業可能量の推定が可能となり、これをスキル値とする。すなわち、各作業における担当作業者のスキル値の合計に勤務時間を掛けた値は、ある

人員配置における1日あたりの作業可能量の見積もりとして有効である。

実証実験

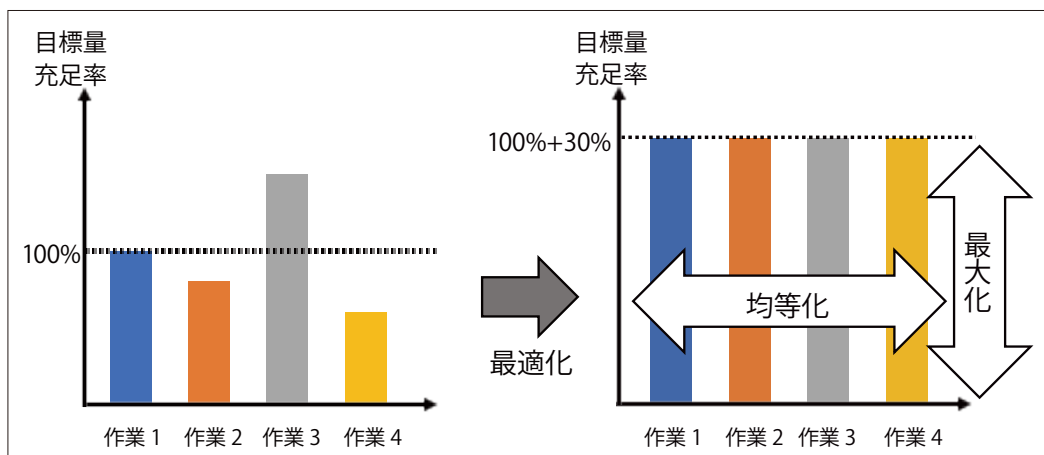
本実証実験では、物流センターの業務のうち梱包・出荷エリアの作業者約100人を対象として、作業種ごとに与えられる目標量に対し適切な人員配置表の作成を行った。

梱包・出荷エリアの作業は次の4種類に分類される。

- 単伝：1つの出荷先に1つの商品を梱包して出荷
- 復伝：1つの出荷先に複数の商品を梱包して出荷
- ギフト単伝：上記の単伝にギフトラッピングを施す
- ギフト復伝：上記の復伝にギフトラッピングを施す

このうちギフト梱包に関してはラッピングの技術が必要であり難易度が高い。つまりすべての作業員が担当可能ではない業務が存在する。それぞれの業務に対して目標量が設定され、与えられた作業者の名簿に基づき午前・午後それぞれのスロットに4種類どの作業を担当するのかを決定する。

イジングマシンの実行に必要な定数は次のようにして設定を行った。まず、作業者ごとにそれぞれの業務の作業可能量、すなわちスキル値の見積もりが必要である。今回の実証においては2019年7月1日



■図-2 作業の目標量の充足率最大化と作業間の充足率の分散の均等化について模式図。作業1～4は、本物流センターにおける単伝、復伝、ギフト単伝、ギフト復伝の4種類の作業に対応する。

～7月10日までの梱包実績データから、この作業に一度でも従事した238名の4種類の作業種別の実績数を30分ごとに集計し、その平均値を各個人のスキル値とした。前述のように、ギフト梱包が担当可能な作業員以外はギフト梱包のスキル値を0とする。最適化の効果を確認するために、2019年7月1日の作業実績データを比較対象とし、作業ごとの目標量の設定や作業員人数100名、その他の定式化に必要な定数についてもこの過去実績を参照した。

上記の問題設定を定式化すると決定変数が800変数(100人×4種類×午前午後2スロット)の二次式となる。今回はFixstars製イジングマシン「Optigan」を使用し実行タイムアウト時間100msで最適化を試みた。最適化結果の人員配置計画を用いた充足率は表-1の通りである。

過去の人員配置計画による実績では充足率がおおむね100%だったのに対し、上図の人員配置を用いることで、4種類の作業のどれもが30%弱の時間的猶予を持ち得るという推定結果を表している。また、業務間の充足率の均等化もほぼ認められるものであり、前述の定式化が機能していることを示唆する結果となっている。

本実証実験では、イジングマシンを用いて組合せ最適化問題を解くことにより、実問題を高速かつ高精度に処理することができる可能性について示した。イジングマシンは一般にヒューリスティクスであり、最適解ではなくとも実用性の高い解を迅速に見つけることによって新たなソリューションを提供できる可能性があると考えられる。計算技術や情報処理能力の発展と、業務プロセスにおけるDX推進などの取り組みと継続的に連携していくことが、今後新たな価値を創出するために重要であると考えられる。

■表-1 イジングマシンを用いた各作業に対する人員配置の充足率

	単伝	復伝	ギフト単伝	ギフト復伝
充足率	127.5%	127.5%	128.1%	129.4%

NISQ デバイスと誤り耐性量子コンピュータの活用事例

本章では、NISQ技術を用いるNISQデバイスと誤り耐性量子計算(FTQC)技術を用いる誤り耐性量子コンピュータについて、最新の動向を紹介する。

NISQデバイスと誤り耐性量子コンピュータはともに「ゲート式量子コンピュータ」に対して使われる呼称であり、これはイジングマシンのような特定の問題に特化した計算機ではなく、汎用的に計算を行うことを目的とした計算機である。これは問題特化型のマシンと比較して実装の難易度が高いことを意味しており、イジングマシンとゲート式量子コンピュータは、活用フェーズが異なる。

NISQデバイスと誤り耐性量子コンピュータは、誤り訂正のあり・なしで区別される。量子コンピュータの応用先として話題にあがる、暗号解読や全探索、Full-CI計算などのパワフルなアルゴリズムを実行するためには、誤り訂正機構を持った大規模な量子コンピュータが必須である。

一方で、近年Googleが53qubitのデバイスを作って量子超越¹⁾を発表するなど、大規模な量子コンピュータの実現に向け、不完全なデバイスをうまく使いこなして必要なマイルストーンを達成しようという潮流がある。誤り訂正機能がないこのような量子コンピュータはNoisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) デバイス²⁾と呼ばれている。

NISQデバイスの特徴としては

1. エラー訂正がされてないため、計算を途中で間違えることがある (Noisy)
 2. 50～1,000qubit程度のデバイスである (Intermediate-Scale)
- という点が挙げられる。

ここで重要なのは、FTQCの古典コンピュータに対する優位性は理論的に証明されているが、NISQの優位性は理論的には証明されていないということである。ゲート式量子コンピュータにおいては、その事

特集

Special Feature

実は踏まえつつ、FTQC の到来を待たずに、NISQ をうまく使いこなす、より早い時期から量子のアドバンテージを享受しようという考えの下、マシンの開発やアプリケーションの検証が進められている。そのアドバンテージの達成が、「量子加速」と呼ばれるマイルストーンであり、これは2020年12月時点ではいまだ達成されていない。現在活用が期待されている領域を図-3に示す。ゲート式量子コンピュータの適用領域は、現時点では広くなく、対象となる計算を実行できる量子アルゴリズムが存在するかどうかで決まっている。FTQCで量子加速が約束されているのは量子化学、機械学習、最適化、暗号解読、微分方程式であり、その内NISQフェーズで量子加速が一定期待されているのは量子化学、機械学習、最適化の3つである。裏を返せば、アルゴリズム次第で適用領域は広げることができるということであり、ハードウェアの開発と同様、アルゴリズム開発も重要であるといえる。

現在提案されている応用先の中で、最も市場の立ち上がり（＝量子アドバンテージを享受できる時期）の到来が早く、さらにインパクトが見込めるのは、量子化学計算とされる。また長期的には、素因数分解を多項式時間で解くことによる「暗号解読」が一番のキラアプリケーションとなると考えられるものの、実現はかなり先になると予想される。一般的な公開鍵暗号であるRSA2048を破るのには、2,000万

physical qubit³⁾が必要である。このようなデバイスの実現には、どんなに楽観的に見積もっても、あと10年かかるであろうと考えられている。

いずれにせよ、現段階で実現しているハードウェアは50qubit程度であり、暗号解読はおろか、最も早い立ち上がりが見込まれるとされる量子化学計算ですら優位性は示されていない。現在は、量子コンピュータの振る舞いを古典コンピュータ上で再現したシミュレータを使ってアルゴリズムの開発や検証を行うとともに、実機上で簡単な系を動かすことにより、各種アルゴリズムの性能検証や実機制御ノウハウの蓄積などが進められている。

現在の取り組みプレイヤーの概観は、図-4のとおりとなる。量子コンピュータは分野として発展途上であり、古典コンピュータの世界ほど各レイヤの分業が進んでいない。将来的には、各レイヤがさらに細分化され、水平分業が進むことが想定される。

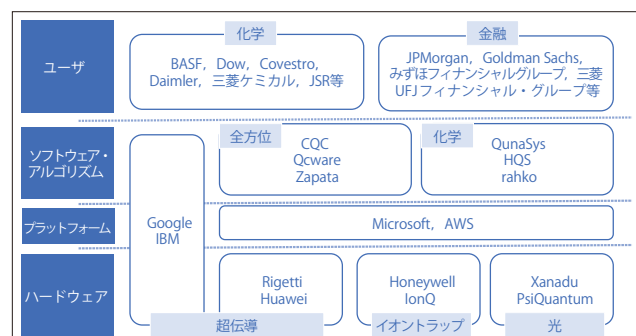
ユーザ企業はどのような分野での活用を見据えて、ユースケース探索を行っているのだろうか。代表的な取り組みを図-5に示す。

化学の分野においては独 Covestro が触媒材料への応用を見据えてアルゴリズム開発等を進めている。また、同じくEUにおいては、英 Johnson-Matthey が政府系プロジェクト通じて電池や触媒材料への応用を見据えて検証に取り組む。また、国内では三菱ケミカルが光化学反応解析への応用を見据えて取り組みを進めている。

QunaSys は化学計算で活用可能なアルゴリズムの



■図-3 NISQ と FTQC のアプリケーション



■図-4 取り組みプレイヤー概観

特集

Special Feature

開発に焦点をあてて活動を行っており、化学計算を行う上で重要な励起エネルギーやエネルギー微分等の物性値を求めるためのアルゴリズムを提案している。これらはまだ古典に対するアドバンテージを示すには至っていないが、今後はユーザ企業と協働してこれらアルゴリズムを適用し、最初の実用例を作っていく。

また、化学・材料分野だけでなく、製薬業界でも量子コンピュータ活用が期待されている。特に、北米においては QuPharm という製薬企業の協調領域のコンソーシアムが立ち上がっており（2020年12月時点）、ここで各社勉強・議論を進めながらユースケースの見極めを行っている。

また、それ以外の領域では、独 BMW やフォルクスワーゲンなどが交通最適化や電池材料への応用を期待して PoC (Proof of Concept) を進めているほか、金融業界の名だたるプレイヤーが、ポートフォリオ最適化やデリバティブの価格付け等への応用を見据えてアルゴリズム開発や PoC を進めている。いずれの領域でも、実際に事業で量子コンピュータを活用しているわけではなく、量子コンピュータ利用の検証が進められている段階となっている。このような取り組みの中から、2～3年後に最初の実用例が生まれ、そこから活用が進んでいくことが期待されている。

ゲート式量子コンピュータは、「活用」という観点では発展途上の技術である。NISQ フェーズでは、

小さくてよいので何か次に繋がる成果を示すことが重要となる。おそらく、NISQ フェーズである程度の有用性が示されなければ、それ以上は研究開発投資が続かず、人類は FTQC のもたらす大きなアドバンテージを享受することはできないだろう。NISQ を使いこなして何かしらの実用例を示し、産学のプレイヤーを呼び込み、数多くの活用事例を蓄積することが、量子コンピュータ技術の発展のためには必要不可欠だ。同じように考える熱心なプレイヤーが、最初の実用例の発掘を目指し、今日研究開発に取り組んでいる。非常にリスクが高く、チャレンジングな試みではあるが、その先には大きな可能性が広がっている。

次世代アクセラレータ基盤

協調設計の必要性

本章では量子技術を取り扱う次世代アクセラレータ基盤意義と最新の研究動向を説明する。次世代アクセラレータはあらゆる計算に万能に有効ではなくそれぞれ得意とするアプリケーションが異なると考えられるが、得意不得意の判定は専門的な知識を必要とし次世代アクセラレータを使用する上での障壁となっている。これまで述べたようにイジングマシン、NISQ デバイス、誤り耐性量子コンピュータを活用するためには高い専門性が求められる。次世代アクセラレータごとにソフトウェア開発は進められおり、専門的な知識を必要とせず特定の問題に対して特定の次世代アクセラレータを使用することは比較的容易になっている。しかしながら、大きなスケールのアプリケーションを実行できる実機が存在しないため、あらゆるアプリケーションに対してソフトウェア開発が十分進んでいるとは言えない。特に種別をまたいで実行する次世代アクセラレータを選択するソフトウェアフレームワークは研究されておらず、次世代アクセラレータの使いやすさを高めることが急務である。ユーザが専門知識を持たないまま、使用するアクセラレータの選択を気にすることなく

企業名とこれまでの取り組み概要

化学	Covestro	<ul style="list-style-type: none"> 2020年7月、Googleとの協業を発表 触媒材料等への活用を見据え、計算アルゴリズムの開発等に取り組む
	Johnson-Matthey	<ul style="list-style-type: none"> 2020年よりUKの国プロに参画 電池材料、および触媒材料を対象として、有効性を検証中
自動車	BMW	<ul style="list-style-type: none"> 2018年よりPoCを開始 配車マッチングや電池材料計算で、有効性を検証中
金融	JPMorgan	<ul style="list-style-type: none"> ポートフォリオ最適化、デリバティブの価格付け等への活用を見据え、各種検証やアルゴリズム開発を進める

■図-5 主要プレイヤーの取り組み

プログラムの実行が可能となるソフトウェアの開発が必要である。

最新の研究開発の現状

イジングマシン、NISQ デバイス、誤り耐性量子コンピュータは必ずしも古典コンピュータよりすべてにおいて勝っているわけではない。そのためハイブリッドな実行が必要不可欠となる。大きなプログラムを構成する小さなプログラム（部分プログラム）に対して次世代アクセラレータを割り当てる次世代アクセラレータ・コデザイン問題が研究されている。

次世代アクセラレータ・コデザイン問題は定式化が示されており、静的に割り当てが可能ならばこれはスケジューリング問題の一種と見なすことができるが実用上は部分プログラムに次世代アクセラレータを割り当てた場合の実行時間等変数を事前に得ることができないという課題が存在する。そのため次世代アクセラレータによる部分プログラムの実行時間や実行結果の品質を推定する研究開発が進められている。各次世代アクセラレータに対しプログラムの入力が与えられたときの推定方法は、いくつかはすでに発表されさらなる成果が期待できる。今後はプログラムの動的な実行を最適化するソフトウェアそのものの研究開発を進める方針である。

謝辞 本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「光・量子を活用した Society 5.0 実現化技術」(管理法人:量子科学技術研究開発機構)によって実施された。

参考文献

- 1) Arute, F., et al. : Quantum Supremacy Using A Programmable Superconducting Processor, Nature, Vol.574, pp.505-510(2019).
- 2) Preskill, J. : Quantum Computing in The NISQ Era and Beyond, Quantum, Vol.2 (2018).
- 3) Gidney, C. and Eker, M. : How to Factor 2048 Bit RSA Integers in 8 Hours Using 20 Million Noisy Qubits, arXiv: 1905.09749 (2020).

(2020年12月28日受付)

■多和田雅師 (正会員) tawada@togawa.cs.waseda.ac.jp

2015年早稲田大学大学院基幹理工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。現在、早稲田大学グリーン・コンピューティング・システム研究機構次席研究員。専門は計算機システム設計。

■田中 宗 (正会員) shu.tanaka@appi.keio.ac.jp

2008年東京大学にて博士(理学)取得後、東京大学、近畿大学、京都大学、早稲田大学を経て、2020年より慶應義塾大学理工学部物理情報工学科准教授。専門は量子アニーリング等イジングマシン、統計力学。

■松田佳希 y_matsuda@fixstars.com

2011年東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻博士課程修了。2013年(株)フィックスターズ入社、現職。2020年早稲田大学グリーン・コンピューティング・システム研究機構 客員次席研究員(講師)。

■楊 天任 (正会員) yan@qunasy.com

2016年に東京大学工学部機械情報工学科を卒業し、同大学院の情報理工学系研究科知能機械情報学専攻に進学し、現在休学中。2018年に(株)QunaSysを設立し、量子コンピュータの用途を広げるアルゴリズム研究を行いながら、量子コンピュータを利用するためのソフトウェア開発に取り組んでいる。

