3 革新的コンピューティングアーキテクチャ研究プロジェクト

飛躍的な性能スケールアップを実現するコンピューティング基盤

CD 研の革新的コンピューティングアーキテクチャ研究プロジェクト（以下、C 革 P）では、計算機を構成する制御・演算・記憶の仕組みを刷新することで、ムーアの法則の限界を克服し、飛躍的な性能スケールの活用を世界に先駆けて実現する研究を行っている。具体的には量子コンピュータとイジングマシン LASOLV の実現・応用と、これらを含む様々な新原理アクセラレータの適材適所活用により高効率なデータ処理を実現するコ・デザイン・オーケストレーション技術を研究している。

次世代コンピューティングへの期待

「半導体の集積率は 18 カ月で約 2 倍になる」というムーアの法則の限界を迎え、CPU シングルスレッドあたりの性能は頭打ちになっている。一方、計算機システムとしてその限界を超える次世代コンピューティングに向けた研究が進展している。

C 革 P では、規模や複雑さの観点から解くことが困難であった問題を解けるようにすることに加え、解くべき問題特性に合わせて最適な処理系を選択し、効率的に解くことを可能とする革新的なコンピューティング基盤を実現することを目指している。この基盤により多くの社会課題を解決し，人や社会に有用な価値を創出することで Well-being の実現に貢献する。

加えて、消費電力を最小化しつつ、必要なタイミングで回答を得ることを可能にする等、グリーン化にも貢献する。

NTT コンピュータ＆データサイエンス研究所
革新的コンピューティングアーキテクチャ
研究プロジェクト
プロジェクトマネージャ　**丸山 剛一**氏

量子コンピュータへの期待

次世代コンピューティングの一つとして近年注目されているのが、量子コンピュータである。量子コンピュータは、量子力学における「重ね合わせの原理」を用いた多数の状態を一気に計算することができるという特長がある（図 1）。古典ビットでは 0 または 1 を値としてとるが、量子コンピュータでは 0 と 1 の間の「重ね合わせ」状態を取る「量子ビット」を構成するため、N ビット（2^N の組み合わせ）全てを同時に表現できることを応用する。様々な状態を扱う必要のある超大規模検索・機械学習・素因数分解な

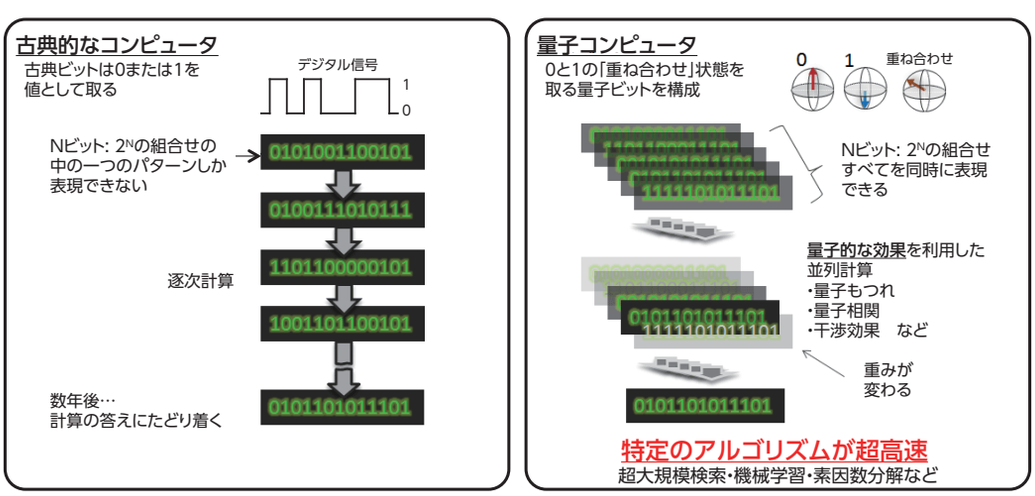

図 1　量子コンピュータの概要

どへの応用に加え、量子状態のシミュレーションそのものを実施できる物質設計への応用なども期待されている。

一方で、現在利用可能な量子コンピュータが具備する量子ビットでは、現実的な問題を解くには規模が不足しており、実用化に向けては様々な企業・研究機関のハードウェア研究者、ソフトウェア研究者、基本物理分野の研究者などが研究している段階である。

C 革 P では、汎用量子コンピュータや広域量子通信の実現に向けた理論面、ソフトウェア面の基礎研究に取り組んでいる。量子計算の規模を拡大するには、ノイズに弱いという量子ビットの弱点を補う誤り訂正・抑制技術の確立や、並列計算を可能にする量子中継技術の実現が不可欠だが、C 革 P ではこれらの研究開発に各種国家プロジェクトに参画しつつ進めている。また、現実的な消費電力・性能で実現可能な誤り訂正量子デバイスのアーキテクチャを世界で初めて提案し、量子誤り訂正手法の実現に一歩近づくなどの先端的な成果を創出している。

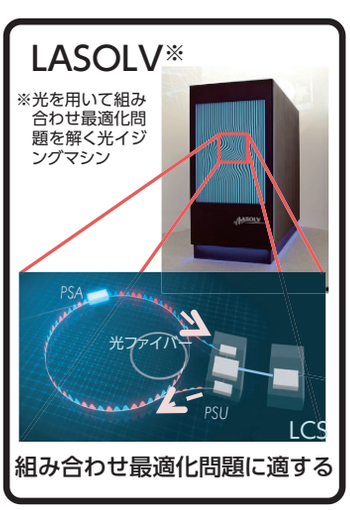

図２　イジングマシン LASOLV

国家プロジェクトの一つである内閣府ムーンショットでは、2050 年に誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現を目指すとしており、様々な分野の研究者・研究組織と連携しつつ今後も取り組みを進めていく。

イジングマシン LASOLV

量子コンピュータと同様に、次世代コンピューティングの一つとして注目されているのがイジングマシンである。統計力学で用いられる量子系のモデルの一つ、イジングモデルを高速に解く計算機で、それを組合せ最適化問題の厳密解や近似解を導出することに応用している。

組合せ最適化問題とは、ある条件を満たす選択肢から目的のコストが最小のものを求める問題のことである。顧客の荷物を全て配送可能な配送ルートから燃費が最小となる経路を求める「巡回セールスマン問題」はその一例だが、このような問題は、規模が大きくなると選択肢が爆発的に増加し、従来のコンピュータでは指数関数的に処理時間が増加してしまう。そこで、イジングモデルの基底状態探索問題に置き換え、イジングマシンで高速に解く。

イジングマシンの実現方式としては超電導などを用いた量子力学を応用したものに加え、古典コンピュータによるエミュレーション方式などが開発されているが、NTT では光を用いて解くイジングマシン LASOLV を開発、実用化に向けた研究を進めている（図２）。

LASOLV は、複数のパルス光の位相の組合せで解の候補を表現する。ここでは解の候補が最適に近いほど位相の組合せの変化が少なくなる (= 安定する) といった相互作用を作り出すことで解を導出する。現時点では 10 万要素の大規模組合せ最適化問題の 1 問題に対し、解を約 1000 倍の速さで得ることができた。この性能は、創薬や機械学習など、高速なサンプリングを必要とする応用に有用である可能性を示唆している。

そこで C 革 P では、LASOLV をマルチユーザ・マルチジョブで利用可能とする LCS：LASOLV Computing System を開発、これを用いた実社会問題への応用に取り組んでいる。

ここで実社会問題の 1 つの例としてマルチレート光パス波長割当問題を示す（図３）。超大容量の通信サービスを滞りなく提供するために、光通信のパスを設計する事例である。通信経路が重なる区間で、周波数がバッティングしないようにした上で、なるべく周波数の無駄遣いがないように、詰め込んで割り当てる。拠点の数が増えれば増えるほど条件が複雑になるため、従来は熟練の作

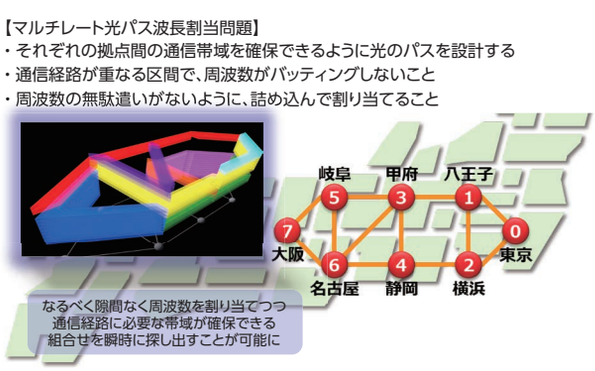

図３　マルチレート光パス波長割当問題

業者が時間をかけて設計する必要があったが、LCS を用いることで高速に解くことを可能にした。

今後、さらに応用例を開拓・拡大し、ビジネス化を進めていく。

「コ・デザイン・オーケストレーション」という言葉の意味とアクセラレータ技術の進展

コ・デザインとは、研究開発の初期段階から協調してデザインすることを意味している。 ソフトウェアとハードウェアの観点での研究開発を初期段階から協調して行うことを意味しており、自動車でいうと車体というハードウェアとそれを制御するソフトウェアを一緒に作るというイメージである。

オーケストレーションとは、処理に必要なソフトウェアやハードウェアの最適配分・タスクフロー制御を意味している。オーケストレーションを行う上ではワークロード、ソフトウェアやアクセラレータ（加速器）などの特性の深い理解が必要である。

GPU や HPC などの古典アクセラレータ、分散型大規模処理基盤，脳型などのその他次世代アクセラレータは、特定の処理等においては優れた性能を発揮し、かつエネルギー効率的にも優れた性能を持つ。しかし、どのようなアプリケーションにどのアクセラレータを適用すれば良いのかに加え、従来のソフトウェアからどのように活用するべきなのか等、利活用の観点で考慮すべき点が多い。

アプリケーション・ワークロードの特性に応じたアクセラレータを自動的に選択することにより，トータルのコンピューティングシステムとしての利便性や生産性を高めることを目指す（図４）。

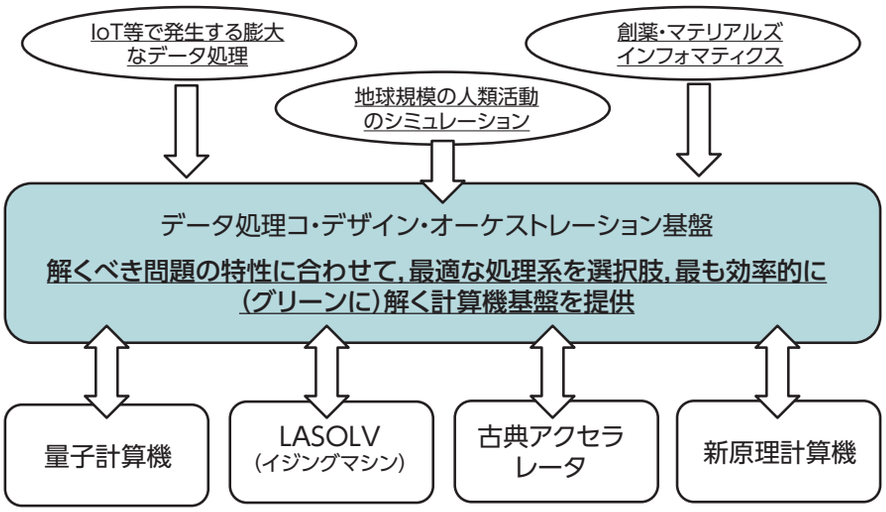

図４　コ・デザイン・オーケストレーション

目指すべき方向性としては、①消費電力の低減、②より巨大なモデルを高速に解ける仕組化である。そのためにはアルゴリズムとハードウェアのコ・デザイン・オーケストレーションが重要である。

IOWN 構想との DTC（デジタルツインコンピューティング）と解くべき問題特性の複雑化・大規模化

IOWN 構想では、DTC によりシミュレーションによる解析を進めている。地球規模の人類活動・自然現象の予測を通して、データ蓄積・シミュレーションができるようになってきた。データの規模やシミュレーションの仕方をどうするのかといった検討の必要がある。

また、AI については、人間の思考パターンに近く、人間の脳に近づいていく。さらに自分の分身であるかのような判断と個性を持ったパーソナル AI 実現に向け、軽量化した AI を分散配置するなどにより計算量は膨大になる。

新薬・新素材の開発（マテリアルズインフォマティックス）や物理シミュレーションなどによりアプローチをしている。特に創薬分野では、患部に作用する分子結合を持つ分子の組み合わせから患部に作用する効率が最良なものを求めている。

アプリケーションやワークロードにより、データ容量やその所在の分散・集約状態、問題規模や組合せ数、適切な高速化アルゴリズム（行列計算・素因数分解など）、リアルタイム性の必要性などが多種多様である。

特定の領域においては GPU を中心としたアクセラレータが多用され始めているが，GPU を大量に利用する構成では電力消費が膨大となりトータルの計算コストが現実的ではなくなる傾向がある。そのため、量子コンピュータなどの革新的なアクセラレータを適材適所で利用しつつ、ディスアグリゲート・分散型などの新計算機構も効率的に活用し、処理系トータルでの省コスト化を解決して行く必要がある。