

欧米における量子コンピューティング・プロジェクト

松原 聖* 高橋 邦生** 富塚 孝之**

Quantum Computing Initiatives in the US and Europe

Kiyoshi Matsubara*, Kunio Takahashi** and Takayuki Tomizuka**

量子コンピューティングは、国家規模の研究戦略の中核として、欧州と米国の両地域で急速に整備が進められている。欧州では、欧州 HPC 事業共同体のもとで量子コンピュータと HPC との統合的運用が進められ、多様なアーキテクチャの量子システムが各国に分散導入されようとしている。一方、米国は National Quantum Initiative 法に基づき、エネルギー省を中心に理論・ハードウェア・アルゴリズム・量子制御の各分野を網羅した研究支援体制を構築しており、量子 AI や次世代シミュレーション、標準化にも注力している。両地域は異なる制度的背景を持ちながらも、量子技術と HPC・AI との融合を通じた計算基盤の再構築を目指しており、本稿ではその構造と戦略の比較を通じて、今後の国際連携や産業応用への情報を提供する。

<https://doi.org/10.69290/j.001187-vol32>

Keywords: 量子コンピューティング、HPC、DOE、NSF、EuroHPC JU、公的資金

1. はじめに

量子コンピューティングは、物理・化学・最適化・機械学習など、従来の古典計算では実用的に解くことが難しい問題に対して、革新的な解法を提供する可能性を秘めた計算技術である。こうした潜在能力は、科学技術分野のみならず、国家安全保障や産業競争力の観点からも注目されており、米国および欧州では、公的資金を用いた国家戦略レベルの取り組みが急速に進んでいる。

欧州では、EuroHPC JU (欧州 HPC 事業共同体) の枠組みのもと、量子コンピュータを HPC インフラに組み込み、ハイブリッドな量子-HPC 環境の構築を推進している[1]。各国における多様なアーキテクチャ (光子型、イオントラップ、中性原子、超伝導など) を活用した 6 台の量子システムが既に導入され、さらなる拡張も予定されている。また、Quantum Excellence Centres (QECs) や量子

AI 研究など、応用面を強化する取り組みも本格化している。

一方、米国では、2018 年制定の国家量子イニシアティブ法[2]に基づき、DOE (エネルギー省) 等 3 機関を中心とする体制で進められ、理論・ハードウェア・アルゴリズム・標準化・教育の全方位における支援が行われている。特に DOE は、複数の「国家量子情報科学研究センター (NQISRCs)」を設立し、研究開発から人材育成、量子制御技術の普及までを網羅的に支援している [3][4][5]。

本稿では、こうした欧米における量子コンピューティング関連の国家プロジェクトの現状を、HPC との統合、アーキテクチャの多様性、国際連携、人材育成、応用展開といった観点から比較・整理し、今後の量子技術の発展と国際的な標準化への情報を提供することを目的とする。

本稿は、文部科学省様からの委託業務としてアドバンスソフトが実施した「スーパーコンピュータ整備や利用推進に係る国際情勢等に係る調査業務」報告書の一部を利用して作成した資料です。報告書は、文部科学省様のサイトで公開されています。

*アドバンスソフト株式会社 代表取締役社長

President, AdvanceSoft Corporation

**アドバンスソフト株式会社 熱流動エンジニアリングセンター

Thermal Hydraulics Engineering Center, AdvanceSoft Corporation

2. EuroHPC JU（欧州 HPC 事業共同体）

2.1. 概要

EuroHPC JU は、欧州におけるスーパーコンピューティングおよび量子コンピューティングのインフラ構築と技術革新を加速させるため、具体的な行動計画を提示している。EU は、量子技術を含む HPC を戦略的競争力の要と見なし、産業・学術・公共部門全体における次世代計算能力の基盤を強化することを目指している[1]。

量子コンピューティングは、EuroHPC JU の 7 つの主要な政策のひとつである Infrastructure Pillar の一環として位置付けられ、スーパーコンピュータとの統合環境での利用を前提としている。これにより、既存の HPC インフラと連携するハイブリッド計算環境が形成され、量子ハードウェアを活用した応用の展開が加速することが期待されている。



図 1 EuroHPC の 7 つの政策(Pillars)[1]

2.2. 量子コンピューティングのインフラ整備

2.2.1. Quantum Computer

2022 年 10 月、EuroHPC JU は、欧州のスーパーコンピュータに統合される量子コンピュータのホスティング拠点として 6 つのサイトを選定した。このホスティングおよび運用に関する選定は、2022 年 3 月に開始された「欧州量子コンピュータのホスティング・運用」に関する募集に基づくものである。2024 年に EuroHPC JU はすでに 6 台の

量子コンピュータに関する調達を完了した。また、ルクセンブルクおよびオランダの 2 か国が新たなホスティング機関として確定しており、2025 年にはさらに 2 台の量子コンピュータの調達が開始される予定である[6]。

表 1 EuroHPC JU の量子コンピュータ

国名	名称（初期の名称）	機関
フランス	Lucy (EuroQCS-France)	GENCI
ポーランド	Piast-Q (EuroQCS-Poland)	PSNC
チェコ	VLQ (LUMI-Q)	IT4I
ドイツ	Euro-Q-Exa	LRZ
スペイン	EuroQCS-Spain	BSC
イタリア	EuroQCS-Italy	CINECA
ルクセンブルク※	MeluXina-Q	Lux Provide
オランダ※	EuroHPC Quantum Computer	SURF

※は 2025 年以降の調達予定である。

(1) Lucy (EuroQCS-France)

Lucy (EuroQCS-France) は、フランスの GENCI（国家高性能計算設備）が主導する。量子コンピュータは、CEA（フランス原子力・代替エネルギー庁）が運営する 3 つの国家計算センターの 1 つである TGCC に設置され、まずはスーパーコンピュータ Joliot-Curie に接続され、次いで Jules Verne コンソーシアムによって 2026 年に TGCC に導入される予定のエクサスケールスーパーコンピュータ Alice Recoque に接続される。

Lucy は光子量子コンピュータであり、光子をキュービットとして用いる。フォトニックキュービットは、計算をより高速に行うことが可能であり、しばしば室温で動作するため、既存の HPC インフラへの統合が容易である。

Lucy は、潜在的応用が多岐にわたる複雑な計算モデルである線形光学量子計算（LOQC）の特有の側面を提供する。このシステムにより、電磁

気シミュレーション、構造力学、材料シミュレーション、気象学および地球観測といった分野における量子加速型 HPC (Quantum Accelerated HPC) と呼ばれる多数のハイブリッド HPC-量子計算ワークロードの探究が可能となる。

(2) Piast-Q (EuroQCS-Poland)

Piast-Q (EuroQCS-Poland) は、PSNC (ポズナン・スーパーコンピューティング・ネットワークセンター) によってホスティングされ、ポズナンの HPC インフラに統合される予定であり、PIONIER NREN を通じてリモートアクセスが提供される。PSNC は、ポーランドの理論物理学センター (科学アカデミー所属)、Creotech Instruments S.A、ラトビア大学の 3 つのパートナーとともに EuroQCS-Poland コンソーシアムを主導している。

Piast-Q は、トラップド・イオン方式に基づく量子コンピュータである。この方式では、電磁場によって荷電原子 (イオン) を捕捉し、それらを高精度レーザーによって操作することで量子演算を実行し、長いコヒーレンス時間を実現する。トラップド・イオン・システムはその高い精度で知られており、さまざまな量子計算タスクに向けて開発が進められている。

また、本システムは、量子最適化、量子化学、量子材料科学、量子機械学習を含むがそれに限定されない、ハイブリッド型量子-古典コンピューティングの新たなユースケースおよびベンチマークにも対応する予定である。

(3) VLQ (LUMI-Q)

VLQ(LUMI-Q) は、チェコ共和国オストラヴァに所在する IT4I (IT4Innovations 国立スーパーコンピューティングセンター) の施設に設置され、EuroHPC スーパーコンピュータ KAROLINA に統合される予定である。LUMI-Q コンソーシアムは、チェコ、フィンランド、スウェーデン、デンマーク、ポーランド、ノルウェー、ドイツ、ベルギー、オランダの 9 つの国が参加する。

VLQ は、超伝導材料により実現された超伝導

キュービットに基づくシステムであり、VLQ の場合、これらのキュービットは中央の共振器に接続され、キュービットの制御および読み出しが可能となる。このような星形トポロジは、一対多のキュービット接続性をシームレスに提供し、キュービット間で必要となるスワップ操作の数を最小化することで、非常に複雑な量子アルゴリズムの実行を可能にする。この構成は、量子演算の忠実度およびコヒーレンスを向上させ、システム全体の性能を高めることを目的としている。

本システムにより、欧州のエンドユーザーは、星形トポロジに特化したアプリケーションやアルゴリズムを積極的に探求できるようになる。例えば、ハードウェア効率の高い量子誤り訂正 (QEC) スキームや量子フーリエ変換 (QFT) などがあり、これらは純粋な古典的处理と比較して指数関数的な高速化を示すことができる。

(4) Euro-Q-Exa

Euro-Q-Exa は、ドイツの LRZ (ライプニッツスーパーコンピューティングセンター) に設置・運用される。同センターは、GCS (ドイツのガウス・スーパーコンピューティング・センター) に属する 3 大国家スーパーコンピューティングセンターの 1 つであり、現在の SuperMUC-NG スーパーコンピュータに統合される予定である。

Euro-Q-Exa は、超伝導キュービットに基づくシステムであり、キュービットは正方格子上に配置され、複雑な量子計算の実行を可能にし、量子誤り訂正手法を促進するとともに、高品質なキュービットおよびゲート忠実度を備え、より広範な応用分野において量子アルゴリズムを実行する上で重要な役割を果たす。

本システムは、統合されたハイブリッド・ソフトウェア環境を通じてスパコンに統合され、独自のユーザー体験を提供する。Euro-Q-Exa は、2027 年初頭より大規模なアップグレード (システム 2) が予定されている。

(5) EuroQCS-Italy

EuroQCS-Italy は、イタリアのボローニャ・テク

ノポールに位置する CINECA (Inter-University Consortium for Automatic Computing in North-East Italy) のデータセンターに設置され、EuroHPC のプレ・エクサスケールスーパーコンピュータ Leonardo に統合される予定である。Leonardo は現在、世界で 4 番目に速いスーパーコンピュータである。EuroQCS-Italy コンソーシアムはイタリアが主導し、ドイツおよびスロベニアのパートナーが参加している。

EuroQCS-Italy は、JADE や Ruby と同様に、中性原子に基づく量子シミュレータである。本システムは 2 段階で導入される予定であり、2027 年には決定的なアップグレードが実施され、ハイブリッド型のデジタル／アナログ動作が可能となる。このアップグレードにより、さらなる自由度が導入され、より高度なハミルトニアン設計が可能となり、エンドユーザーはより広範な量子アルゴリズムおよびユースケースを実装できるようになる。

EuroQCS-Italy は、量子多体系物理の探究、最適化問題、機械学習応用の実施に加え、材料科学、量子化学、物流における高度なシミュレーションの開発を支援し、欧州における産業、科学、社会の進展に資する新たな能力を提供する。

(6) EuroQCS-Spain

EuroQCS-Spain は、スペインの BSC (バルセロナ・スーパーコンピューティング・センター) によってホスティングされ、プレ・エクサスケールの MareNostrum5 に統合される予定である。EuroQCS-Spain コンソーシアムは BSC が主導し、スペインの高エネルギー物理研究所 (IFAE) およびポルトガルの国際イベリアナテクノロジー研究所 (INL) が参加している。

EuroQCS-Spain は、量子アニーラとしてのアナログ量子コンピュータとなる予定である。量子アニーリングは、特定の種類の最適化問題の解決に有効である。この手法は、断熱進化という概念に基づいており、システムを初期状態から最終状態へとゆっくり変化させることにより、問題を解く。最終状態は、最適化問題の最適解、すなわちグロ

ーバルオプティマムを表すように設計されている。量子アニーリングは、局所的最適解が多数存在する問題の解決において、特に効果的であることが示されている。量子アニーラは、機械学習、金融、物流などのさまざまな分野で利用可能である。

EuroQCS-Spain は、BSC がすでにホストしているデジタル・ゲート型量子コンピュータを補完し、EuroHPC の世界トップクラスのスーパーコンピュータ MareNostrum 5 に統合される予定である。

2.2.2. HPCQS の Quantum Simulator

前節に述べた Quantum Computer のプロジェクトに先立ち、EuroHPC の HPCQS プロジェクトが 2021 年 12 月から 2025 年 11 月までの期間に €12M の予算で実施されている。ここでは、それぞれ約 100 個以上の量子ビット (キュービット) を制御する 2 基の量子シミュレータを、既存の 2 つのスーパーコンピュータに統合することを目的としている[7]。

表 2 HPCQS の量子シミュレータ

国名	名称	機関
ドイツ	JADE	JSC
フランス	Ruby	GENCI (TGCC)

(1) JADE

JADE は中性原子を用いた量子コンピュータであり、超高真空中に浮遊するリュードベリ原子から構成され、光ピンセットと呼ばれる集中的に集光されたレーザー光の配列によってその位置が保持されている。これらの光ピンセットによってリュードベリ原子を操作することで量子演算が行われ、高いスケーラビリティの可能性を提供する。JADE は、創薬、サプライチェーン管理、自律走行車のインテリジェント充電、フィンテック、サイバーセキュリティなど、分野横断的な応用を支援する。また、Pasqal 社の量子処理ユニット (QPU) の計算能力は、物理学および化学のシミュレーション、ならびに量子機械学習にも使用される予定である。

(2) Ruby

Ruby も JADE と同様に中性原子を用いており、リュードベリ励起を利用して原子をより高いエネルギー状態へと遷移させる。Ruby は、量子計算の可能性を活用して、複雑なデータ処理および物理系のシミュレーションを強化することにより、医薬品からエネルギー分野に至るまでの領域に革新をもたらすことを目指している。Ruby は、銀行業、物流、輸送、エネルギー網管理など、さまざまな分野にわたる多数の実用的な応用を可能にする。

2.2.3. ユーザー利用と運用面の整備

量子コンピュータの導入にあたり、EuroHPC JU は各宿主機関との共同所有モデルを継続して採用している。つまり、量子マシンの調達・運用においては EU とホスティング国が費用を分担し、機器の所有権を共有する形を取る。これは欧州内における分散型かつ連携的な量子計算基盤の構築を目指した施策であり、資金調達と運用責任の共有による安定的展開を可能にする。

また、量子インフラの導入と同時に、ユーザーアクセス手順の見直しや、国際連携枠組みへの参画も進められており、研究者・企業が量子計算資源を効果的に活用できる制度設計が強化されている。

2.3. 関連するその他の政策

2.3.1. Technology pillar

7 つの政策のひとつである Technology pillar において、2025 年度に「量子技術と AI の融合 (Quantum-Enhanced Machine Learning)」に関する研究支援が予算化されている。この研究枠には、EU 拠出金として€8M が割り当てられ、参加国とのマッチングファンドを含めた総予算は€16M である。この研究支援は、機械学習を中心とした AI と量子技術の統合における変革的な進展の達成を目指すものである[1]。

期待される成果は以下の 5 項目である。

- ① 第一に、量子プロセッサおよびシミュレータを AI の前処理段階として活用する技術の確

立により、近～中期的に達成可能な規模（物理キュービット数百）において、処理速度の向上、計算複雑性の低減、モデル精度の向上、ならびに必要なサンプル数の削減といった効果が得られること。

- ② 第二に、量子プロセッサと既存の HPC を統合したハイブリッドシステムおよびアルゴリズムの開発を通じて、AI の能力をさらに強化すること。
- ③ 第三に、革新的な量子機械学習 (QML) アルゴリズムを創出し、それを既存の AI フレームワークに統合することにより、計算能力を拡張し、従来の AI システムをより効率的なものへと変革すること。
- ④ 第四に、AI の性能を向上させるための新しい近未来的量子アルゴリズムを発見すること。
- ⑤ 第五に、量子計算の能力と機械学習を融合させることで、水文学的研究、気候モデリング、衛星リモートセンシングデータの地形分類、創薬、画像ベースの医用診断といった分野におけるデータ処理の高速化および予測精度の向上を可能とする、スケーラブルな QML モデルおよびアルゴリズムを開発すること。

この予算は、AI と量子コンピューティングを統合する革新的な研究開発プロジェクトを奨励・支援することにある。本予算は、AI の能力を強化するために、量子プロセッサと高性能計算 (HPC) を組み合わせたハイブリッドシステムおよびハイブリッドアルゴリズムのシナリオを探究するものである。

2.3.2. Application pillar

7 つの政策のひとつである Application pillar において、科学および産業向けアプリケーション分野における欧州量子卓越センター (QECs) は、2023 年に立ち上げられ、2024 年に評価が行われた後、2025 年から 2028 年にかけて運用が開始される予定である。QECs は、量子プログラミング施設、アプリケーションライブラリ、および熟練した人材から成るエコシステムの構築を促進し、最終的には新たな量子指向アプリケーションの発見、なら

びにこれらの新技術に関する知識の普及および導入を推進するものである[1]。

3. 米国の国家量子イニシアティブ法 (National Quantum Initiative Act)

米国では 2018 年 12 月 21 日に米国連邦議会で制定された National Quantum Initiative Act (国家量子イニシアティブ法) [2]をもとには、計画が進められている (以下、National Quantum Initiative を NQI と呼ぶ、また、本節は[1]を情報源としている)。ここでは、量子情報科学 (Quantum Information Science, QIS) およびその技術応用に関して、アメリカ合衆国の継続的な世界的リーダーシップを確保することを目的としている。この法律は、量子情報科学に関する研究開発、人材育成、官民連携、国際的標準の策定、及びその技術の商業化を総合的かつ戦略的に推進するための国家レベルの枠組みを定めたものである。QIS は、Engineering を含め Quantum Information Science and Engineering, QISE と呼ぶこともある。

この法律では、NIST (国家標準技術研究所)、NSF (国立科学財団)、DOE (エネルギー省) の三つの主要な研究機関を通じて量子研究を強化する方針を明示している。

表 3 量子研究の方針

機関	実施内容
NIST	量子情報技術の標準化、計測技術の開発、産官学コンソーシアムの構築、産業応用の促進に焦点を当てている。
NSF	大学や非営利団体への助成金交付を通じた基礎研究・教育プログラムの推進、及び量子研究と教育を担う「学際的量子センター」の設立支援を行う。これにより、学際的なカリキュラムの開発や量子人材の育成を進める。
DOE	研究拠点「国家量子情報科学研究センター」の設置と運営を行い、DOE 傘下の研究所や大学、産業界と連携して量子分野のブレイクスルー創出を図る。

また、この法律には、予算措置についても具体的に言及されており、NIST には年間\$80M、NSF の学際的センターには年間\$10M、DOE の研究センターには 2019 年度から 2023 年度まで年間\$25M が割り当てられる。この法律には 11 年間の有効期限が設けられている。

本稿の以下の節では HPC および量子コンピューティングに関連の深い NSF および DOE の取り組みについてまとめた。

4. NSF (国立科学財団)

4.1. 概要

NSF では、量子コンピューティング (QC) や量子シミュレーションを含む QIS は、古典的な手法では非効率、あるいは不可能であった情報の処理・伝達・測定の方法において、量子的な特有の現象を活用することに対して、基礎的理解の飛躍的な前進をもたらすものであると位置付け、2025 会計年度の予算要求において、QIS 関連には \$294.37M が計上されている。NSF による QIS への投資は、NQI の中核的構成要素であり、量子コンピューティング、通信、センシング、ネットワーク、シミュレーションといった主要分野における重要な研究を引き続き支えるものである。以降の本節では、年間予算額の大きい 2 項目について示す。本節は[3]の QIS の部分を概説したものである。

表 4 NSF の QIS 予算[3]

QIS Funding by Program Component Area (Dollars in Millions)			
	FY 2023 Base Plan	FY 2024 (TBD)	FY 2025 Request
Foundational Quantum Info. Science Advances	\$123.27	-	\$147.92
Quantum Computing	41.96	-	55.93
Quantum Networks and Communications	32.42	-	30.34
Quantum Sensing and Metrology	28.82	-	36.16
Future Applications	31.30	-	18.76
Risk Mitigation	4.01	-	3.98
Supporting Technology	4.95	-	1.28
Total	\$266.73	-	\$294.37

- ① Foundational Quantum Information Science Advances : 基礎的量子情報科学
- ② Quantum Computing : 量子コンピューティング
- ③ Quantum Networks and

Communications：量子ネットワークと通信

- ④ Quantum Sensing and Metrology：量子センシングと計量科学
- ⑤ Future Applications：将来の応用
- ⑥ Risk Mitigation：リスク対策
- ⑦ Supporting Technology：支援技術

表 5 NSF の QIS 予算項目の概要

No.	内容
①	未解決の根本的課題や新たな可能性に対応すべく、学術分野への投資を継続し、新たなセンター支援も検討する。
②	将来有望な方式の探索と基礎的理論研究を継続する。また、産業界と連携し、研究者の量子システム利用も支援する。
③	量子システム間や既存のコンピュータとの接続を可能にする基礎研究を、学際的チームで支援する。
④	構築者と利用者の連携を促すため、多分野にわたるプログラムや研究ネットワークを通じて支援を行う。
⑤	複数の産業連携プログラムを通じて、研究と民間移転の接続を強化する。
⑥	量子時代のサイバーセキュリティや耐量子暗号の基盤的研究、安全保障上の影響評価などを支援する。
⑦	量子アプリケーションに特化したツールやアルゴリズムの開発を進める研究者を、既存の分野別プログラムで支援する。

4.2. Foundational Quantum Information Science Advances の予算項目

量子技術は進展しているが量子情報科学および工学の分野は黎明期にあるため、新たな発見が新たな方向性を可能にする未踏分野を切り開くという認識のもと、NSF は基盤的な学術分野への重要な投資（\$147.92M）を維持している。合わせて、科学的ブレイクスルーを可能にし得るあらゆる分野において、新たな活動を支援している。

4.3. Quantum Computing の予算項目

量子コンピューティングにおいては、超伝導回路、イオントラップ、中性原子を用いたアーキテクチャ等に進展が見られている。しかしながら、課題を解決する決定的なプラットフォームの決定版はないのが現状である。この状況では、異なるアーキテクチャの特性を活かしつつ並存する可能性があり、異なるタイプの量子計算を支えなければならない。

この認識のもと、NSF は将来的に有望となり得る代替的な量子コンピューティング・アーキテクチャの探求に継続して予算（\$55.93M）を配分している。また、NSF は量子コンピューティングの基本的な構造や限界、すなわち基礎となる物理過程、アーキテクチャ、アルゴリズムによって定義される理論的な限界についての研究支援も継続する。

同時に、NSF は産業界との連携のもと、研究者が特定の分野における実験を行うために量子システムおよびプラットフォームへアクセスできる機会の提供も引き続き支援する。

4.4. FY2025 のトピックス

4.4.1. 概要

2025 会計年度のトピックスとして、NSF は 2023 年度に試験的に開始した National Quantum Virtual Laboratory（NQVL）の設計および実装フェーズを支援する。NQVL は、実用性に着目した応用志向の量子技術の開発と活用を、大学などの学術環境の中で促進することを目指している[3]。

これと並行して、NSF は 2025 会計年度において、Quantum Leap Challenge Institutes（QLCI）への投資、Transformational Advances in Quantum Systems（TAQS）、QIS 分野の能力強化を目的とする取り組み Expand QISE プログラム、および個別研究者プログラムや学術分野別研究センターへの基礎的かつ中核的な予算配分を継続する。本稿では、以下に QLCI について示す。

4.4.2. Quantum Leap Challenge Institutes（QLCI）

QLCI は、QISE における重大な研究課題に取り組むことを目的とした、全米規模の研究拠点であ

る。2025 会計年度における NSF の予算要求額は \$17M で 5 つの QLCI の支援を継続している。各研究所には、5 年間で総額 \$25M の支援が提供される。QLCI では、量子センシング、量子計算、量子ネットワーク、量子シミュレーション、生物学分野での応用など、QISE の中でも特に重要かつ未解決の研究課題に焦点を当てている。

(1) 量子もつれと科学・工学の融合による量子システム

コロラド大学ボルダー校の「Quantum Systems through Entangled Science and Engineering」では、量子システムを科学と工学の融合により進化させることを目指す。量子もつれを活用した基礎研究と応用を推進している。

(2) ハイブリッド量子アーキテクチャとネットワーク

イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校の「Hybrid Quantum Architectures and Networks」では、異種量子技術の統合とネットワーク構築に取り組む。将来の量子通信・計算の基盤形成を図る。

(3) 量子計算への挑戦

カリフォルニア大学バークレー校の「Challenge Institute for Quantum Computation」では、量子計算の理論・アルゴリズム・ハードウェアの研究を統合し、実用的な量子計算の実現を目指す。

(4) 量子センシングの生物物理・バイオ工学への応用

シカゴ大学「Quantum Sensing for Biophysics and Bioengineering」では、量子センシングを生命科学とバイオ工学に応用し、高精度の生体計測・診断技術の革新に挑む。

(5) 高信頼な量子シミュレーション技術

メリーランド大学カレッジパーク校「Robust Quantum Simulation」では、量子シミュレーション技術の強化に注力。複雑な物理現象の再現と解析を可能にする量子モデルの構築を行う。

5. DOE NNSA (エネルギー省国家核安全保障局)

5.1. 概要

2025 年度の DOE の NNSA (国家核安全保障局) の予算要求において、量子コンピュータは単独の技術分野としてではなく DOE の課題解決のひとつの技術として位置付けられている。具体的に予算配分されているのは、

- ・ Advanced Simulation and Computing
- ・ Weapon Technology and Manufacturing Maturation

の 2 つのテーマである。2025 年度においては、NNSA の予算総額は \$51,415M であり、上記 2 項目は Weapons Activities (総額 \$14,898M) の中の Stockpile Research, Technology, and Engineering (総額 \$3,174M) に含まれている。ここに示した 2 項目のそれぞれの予算額は、前者が \$880M であり、後者が \$286M である。また、本節において、国家安全保障関連の研究所とは、

- ・ Los Alamos National Laboratory (LANL)
- ・ Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)
- ・ Sandia National Laboratories (SNL)

である。それぞれの研究所全体の 2025 年度予算額は \$4,456M、\$2,392M、\$3,156M である。本節は、[4]を情報源としてまとめた内容である。

5.2. Advanced Simulation and Computing (ASC) の予算項目

ASC は、SSP (核爆発実験を行うことなく、米国の核兵器備蓄の安全性・信頼性・有効性を保証するための科学的・技術的基盤) の要件を満たすために、高度なシミュレーション機能を提供する。ASC 計画では、備蓄の年間評価および将来の維持管理計画における資格認定・認証を支援する統合評価能力を提供する兵器コードを提供する。

この活動の中での取り組みとしての量子コンピューティングがある。これは、核兵器への応用に適した有望な量子コンピューティング技術を開発するために、アルゴリズム開発およびハードウェア評価における新たな手法と専門知識の育成を目的としている。ASC の中の計算システムお

よびソフトウェア環境サブプログラムでは、エクサスケールを超える可能性のある将来技術、例えば量子、神経模倣型 *neuromorphic*、人工知能、および再構成可能コンピューティング構成要素の検討と開発も行っている。

また、ASC サブプログラムの *Physics and Engineering Models* には、量子コンピューティングや神経模倣型計算といった、いくつかの新しい革新的な計算パラダイムにおける次世代計算アーキテクチャおよびアルゴリズムの進展を最大限に活用する計画である。また、FY2026 年～FY2029 年の主要マイルストーンとして、下記を示している。次世代計算アーキテクチャおよび、異種計算、量子コンピューティング、神経模倣型計算、機械学習におけるアルゴリズムの進展を最大限に活用し、材料特性および性能評価を向上させるための、重点的な物理シミュレーション機能およびライブラリを構築する予定である。また、検証・妥当性確認 (V&V) および計算システム・ソフトウェア工学との連携により実施する計画である。

5.3. Weapon Technology and Manufacturing Maturation の予算項目

FY2023 には、量子コンピュータによる解読に耐性を持つ暗号技術に関して進展が見られた。国防総省のパートナーは、ハードウェアおよびコードの開発を含む NNSA の暗号技術ポートフォリオを引き続き積極的に支援した。兵器プログラムの観点からは、これらの研究の一部は、将来のシステムにおいて、高度な技術的およびサイバー上の脅威に対する必要なときに機能する (*just-in-time*) セキュリティを提供する道筋となるものを確立した。

FY2025 には、将来の導入機会に備え、量子コンピュータに耐性を持つコードおよび兵器アーキテクチャを継続的に成熟させる。さらに、FY2026 年～FY2029 年の主要マイルストーンとして、量子コンピュータによるコード起因の脅威に対する耐性を示す、将来の導入を想定した兵器アーキテクチャを実証することを上げている。

5.4. NNSA まとめ

NNSA の取り組みをまとめると、兵器の性能および関連環境における応答を評価するために、物理モデルおよびシミュレーション手法を展開するとともに、材料特性および性能評価の精度向上を目的として、異種計算、量子コンピューティング、神経模倣型コンピューティング、機械学習におけるアルゴリズムの進展および次世代計算アーキテクチャの進歩を最大限に活用する、重点的な物理シミュレーション機能およびライブラリを構築している。

6. DOE SC (エネルギー省科学局)

6.1. 概要

DOE の SC (科学局) では、量子コンピュータに対して直接的な単独予算項目は設けられていないが、DOE は複数のプログラムを通じて QIS 関連研究に重点的な投資を行っている。核物理 (NP) や高エネルギー物理 (HEP) においても、QIS の応用が進められている。例えば、NP 領域では、量子計算による QCD (量子色力学) の新しい計算手法が模索されており、これにより従来のスーパーコンピュータでは困難だった原子核構造解析が可能になると期待されている。また、QIS 技術を活用した量子センサーの研究も進められており、これにより粒子検出や宇宙観測の精度が飛躍的に向上する可能性がある[5]。

また、Advanced Scientific Computing Research (ASCR) プログラムでは、量子計算に関連する基礎研究や、ハードウェアの開発支援 (QICK 等)、ソフトウェア・アルゴリズム設計にも資金が投入されている。本節では、量子コンピューティングとの関連が深い ASCR プログラムの予算項目を示す。また、その中で NQISRC (国立量子情報科学研究センター) の取り組み、および、量子コンピューティングを普及されるためのツールである QICK (Quantum Instrumentation Control Kit) について解説する。

6.2. Advanced Scientific Computing Research の予算項目

6.2.1. ASCR の中の QIS

ASCR プログラムの使命は、応用数学および計算機科学を発展させ、分野別科学との協力のもとで最先端の計算科学アプリケーションを提供し、計算およびネットワーク技術を向上させるとともに、米国の産業界を含む研究コミュニティと連携して科学技術のための次世代の計算ハードウェアおよびソフトウェアツールを開発することである。ASCR は科学局 (SC) 内のパートナーシップ、および応用技術部門、他の機関、産業界との協力を通じてこれらの取り組みを推進する。

量子情報科学 (QIS) は、量子力学の複雑な現象を活用し、新たな情報取得および処理の方法を生み出す分野であり、SC 全体にわたる数十年にわたる投資を基盤とした科学的発見および技術革新の新たな展望を開いている。DOE は、QIS という学際的な分野が科学の最前線と革新を推進し、量子コンピューティングからセンシング、量子インターネットによる接続に至るまで、量子ベースの応用の可能性を最大限に引き出す未来を構想している。

6.2.2. QIS の予算項目

量子コンピュータが、現在のエクサスケール・システムでも対処困難な問題を解決できるという理論的証拠は、数十年前から存在していた。しかし、その優位性の根本的な要因は長らく不明であった。ASCR チームは、Physical Review Letters 誌に掲載された研究において、いかなる古典的計算でも対抗できない量子スピードアップを証明できる計算問題を特定した。本研究は、量子コンピューティングの現実的応用へとつながる道を明示し、その可能性の実現に向けた重要な一歩となるものである。

FY2025 には、HPC・AI 施策の一環として、量子コンピューティングや量子ネットワーク、その他の特殊で異種のハードウェアおよびアクセラレーターといった新興技術を探求・準備する長期的な基礎研究も継続して支援する。

2025 年のトピックスとして、量子分野への投資および、「国家量子情報科学研究センター (NQISRCs)」、量子インターネット、テストベッドに関するパートナーシップへの強力な支援が計画されている。この支援により、NQISRCs の再公募／更新が可能となるとともに、ASCR の地域量子テストベッドおよびユーザープログラムの拡張が可能となる。これにより、米国の研究者は、独自の量子資源および商用量子コンピューティングおよびネットワーク資源へのアクセスが得られる。

6.3. 国立量子情報科学研究センター (NQISRC)

NQISRC は、DOE SC の技術的広がり横断する大規模な QIS プロジェクトである[8]。

表 6 国立量子情報科学センター一覧

名称	概要	中核機関
Q-NEXT	次世代量子科学および工学	ANL
C2QA	超伝導量子材料およびシステムセンター	BNL
QSA	量子システム・アクセラレーター	LBNL
SQMS	量子科学センター	FermiLab
QSC	量子優位のための協調設計センター	ORNL

これらセンターの目的は、DOE の中核的な研究ポートフォリオと連携しつつ、QIS の進展を促進・支援するために必要なエコシステムを創出し、維持することであり、その成果は国家安全保障、経済競争力、そして科学分野におけるアメリカの継続的なリーダーシップに対して重要な国家的影響をもたらすことが期待されている。

各 QIS センターは、複数の科学および工学分野にわたる研究者チームと複数の研究機関からなる協力体制を組んでいる。また、各センターは科学と技術のイノベーションの連鎖を統合することにより、QIS の研究開発の進展を加速し、技術移転を促進し、将来の量子人材の育成を実現する

体制を整えている。本節の情報は[8]をまとめたものである。

(1) Q-NEXT

Q-NEXT は、Next Generation Quantum Science and Engineering であり、量子相互接続の実現、国家規模のファウンドリーの確立、通信リンク、センサーネットワーク、シミュレーション試験環境の実証を目指し、焦点を絞った連携的エコシステムを構築するものである。科学的イノベーションを可能にするだけでなく、量子に精通した人材の育成、国家量子デバイスデータベースの構築による量子標準の策定、業界をあらゆる活動に組み込み、スタートアップを奨励することで、量子技術の実用的な商業化への道を拓く。

(2) SQMS

SQMS は Superconducting Quantum Materials and Systems Center であり、その主たる使命は、超伝導の2次元および3次元デバイスにおけるデコヒーレンスのメカニズムを理解・排除するという、分野を横断する重大な課題において革新的な進展を達成することであり、これにより計算およびセンシング用の優れた量子システムの構築・配備を可能とすることを目指す。科学的進展に加え、SQMS は材料、物理学、アルゴリズム、シミュレーションに関するユニークなファウンドリー能力と量子試験環境という具体的成果を提供し、国家の QIS エコシステムに幅広く貢献する。

(3) QSA

QSA は Quantum Systems Accelerator であり、科学的应用において認証された量子優位性を実現するために必要なアルゴリズム、量子デバイス、および工学的ソリューションを協調設計することを目指す。QSA の学際的チームは、中性原子、捕獲イオン、超伝導回路を基盤とする高度な量子プロトタイプと、ハードウェアの不完全性を考慮して構築されたアルゴリズムを組み合わせ、それぞれのプラットフォームに最適な応用を科学計算、材料科学、基礎物理学において実証する。QSA

は一連のプロトタイプを提供し、量子技術の可能性を幅広く探求することで、商業技術の成熟を加速するための基礎科学的土台を築く。

(4) QSC

QSC は、The Quantum Science Center であり、量子状態の安定性、制御性、そして最終的には量子技術のスケールビリティに関する主要な障壁の克服に注力している。この目標は、革命的なトポロジカル量子材料、アルゴリズム、センサーの発見、設計、実証の統合を通じて達成され、破壊的技術の発展を促進する。科学的目標に加えて、QSC の活動には、次世代の QIS 人材の育成、専門的成長のための豊かな環境の創出、産業界との密接な連携による新しい QIS 応用の民間移転が不可欠な要素として組み込まれている。

(5) C²QA

C²QA は、Co-design Center for Quantum Advantage であり、現在のノイズの多い中規模量子 (NISQ) コンピュータシステムの限界を克服し、高エネルギー、原子核、化学、凝縮系物理における科学計算で量子優位を実現することを目的としている。C²QA の統合された5年計画の目標は、ソフトウェア最適化、基礎的な材料およびデバイス特性、量子誤り訂正の各分野で10倍の改善を達成し、これらの改善を組み合わせることにより、適切な計算指標において全体で1000倍の性能向上を実現することである。

6.4. QICK

科学計算およびネットワーキングにおいて大きな可能性を秘める量子システムは極めて繊細であり、最先端の性能を達成するには高度かつ高価な制御用電子機器を必要とする。そのため、量子分野への新規参入者にとっては参入障壁となっており、優秀な学術研究者でさえも QIS の最前線を押し進める能力が制限されている。

このために、Quantum Instrumentation Control Kit (QICK) ボードが開発された。QICK ボードは、フェルミ国立加速器研究所 (FNAL) で初期開発され、オークリッジ国立研究所主導の「量子科学セ

ンター (QSC)」の支援により完成に至った。

QICK ボードは、市販のプログラマブル・ロジック・ボードと、あらゆる種類の量子実験に適応可能なオープンソース・ソフトウェアを組み合わせたものである。現在、大学、国立研究所、産業界における数十の研究グループが、QICK ボードを用いてシリコンベースの新規量子ビット（キュービット）の開発から、ダークマター検出用の量子ビットベースのセンサー開発に至るまで、各自の研究を推進している。

QICK は、オープンソースかつ安価に利用できる量子制御用の電子基板であり、Fermilab と ORNL (Oak Ridge National Laboratory) の共同開発によって誕生した。市販の FPGA を用いた構成でありながら、高度な量子実験の制御が可能である。これにより、従来数千万円規模だった量子制御装置のコストを大幅に削減し、多様な研究機関が量子ビット開発や量子センシングに取り組める環境を整えている。QICK はすでに数十の研究グループにより利用されており、シリコン量子ビット、ダークマター検出器、量子ネットワーク開発などに応用されている。

7. まとめ

本稿で整理したように、欧州と米国はいずれも量子コンピューティングを次世代の科学・産業基盤と位置付け、国家主導のもとで戦略的な研究投資を進めている。

欧州では、EuroHPC JU の枠組みで量子コンピュータを既存の HPC と統合する「ハイブリッド戦略」を採用し、加盟国に多様なアーキテクチャを持つ量子システムを分散配備している。これにより、分野特化型応用（量子 AI、材料設計、物流など）への対応力が高められている。QECs（量子卓越センター）や QML（量子機械学習）を軸とする研究も今後本格化する見通しである。

一方、米国は、国家量子イニシアティブ法に基づき、DOE・NSF・NIST が連携し、基礎研究から実証、標準化、人材育成に至るまでの垂直統合型支援体制を確立している。とりわけ DOE では、量子情報科学研究センター (NQISRCs) や QICK

のような普及技術を通じて、量子分野の裾野拡大と商業応用への橋渡しを積極的に図っている。

両地域の共通点として、量子技術を単なる研究対象ではなく、AI や HPC と融合させた計算基盤として発展させる点が挙げられる。異なる政治・制度的背景を持ちながらも、いずれも国際競争力と技術主権の確保を見据えた構造的な取り組みを展開しており、今後はアーキテクチャの標準化やアプリケーション開発における国際連携の促進が鍵となるだろう。

参考文献

- [1] EuroHPC Joint Undertaking, "Decision of the Governing Board of the EuroHPC Jpoint Undertaking No 66/2024, Adopting the Joint Undertaking's Work Programme and Budget for the year 2025"
- [2] U.S. Government. "National Quantum Initiative Act. Public Law 115–368.", December 21, 2018.
- [3] National Science Foundation, "FY 2025 Budget Request to Congress", March 11, 2024
- [4] National Nuclear Security, "Administration Department of Energy FY 2025 Congressional Justification", March 2024
- [5] Science, "Department of Energy FY 2025 Congressional Justification", March 2024
- [6] https://eurohpc-ju.europa.eu/eurohpc-quantum-computers_en
- [7] https://eurohpc-ju.europa.eu/research-innovation/our-projects/hpcqs_en
- [8] <https://nqisrc.org/>

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、それぞれの文献タイトルの下に記載した DOI から、PDF ファイル（カラー版）がダウンロードできます。また、本雑誌に記載された文献は、発行後に、JDREAMIII（日本最大級の科学技術文献情報データベース）に登録されます。