日本総研
The Japan Research Institute, Limited

量子コンピュータの動向と展望

2024年10月29日

(2025年1月10日 Ver.1.2)

株式会社日本総合研究所

＜お問い合わせ＞

先端技術ラボ　間瀬 英之 / 身野 良寛 / 渡邉 一生 / 藤村 礼子　Mail：101360-advanced_tech@ml.jri.co.jp

Disclaimer

- 本資料は、作成日時点で弊社が一般に信頼できると思われる資料に基づいて作成されたものですが、情報の正確性・完全性を弊社で保証する性格のものではありません。また、本資料の情報の内容は、経済情勢等の変化により変更されることがありますので、ご了承ください。本資料の情報に起因して閲覧者及び第三者に損害が発生した場合でも、執筆者、執筆取材先及び弊社は一切責任を負わないものとします。
- 本資料の著作権は株式会社日本総合研究所に帰属します。本資料の一部または全部を、電子的または機械的な手段を問わず、無断での複製または転送等することを禁じております。

© The Japan Research Institute, Limited

目次

1. 量子コンピュータの概要 pp.3-8

2. 市場動向、技術動向 pp.9-18

3. 各国の政策、特許の動向 pp.19-23

4. 量子コンピュータの活用動向 pp.24-30

5. 量子コンピュータの展望 pp.31-34

Appendix (量子アルゴリズムの解説など) pp.35-50

© The Japan Research Institute, Limited

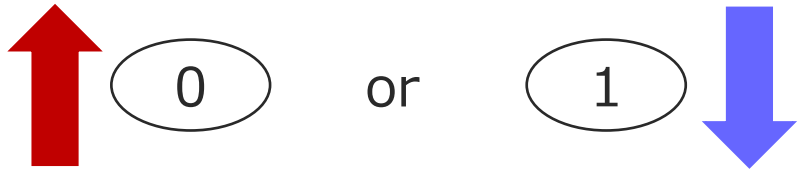
日本総研 The Japan Research Institute, Limited

量子コンピュータとは？古典ビットと量子ビット

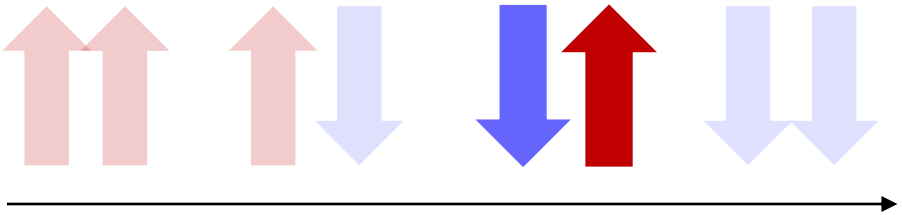
- **量子力学の原理 (量子重ね合わせ、量子もつれ) を情報処理に応用したコンピュータのこと。**
- 古典コンピュータの「古典ビット」(「０」または「１」) による２進法を用いた計算とは異なり、**「０」と「１」が重なり合っている状態を扱うことができる「量子ビット」を利用する。**

古典ビット

Nビットの場合、
2^Nの組み合わせの中の**1パターンしか表現出来ない**

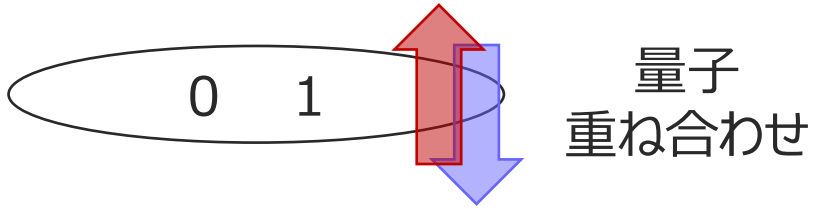


全ての組み合わせを逐次計算
組み合わせ数が膨大になると時間がかかる

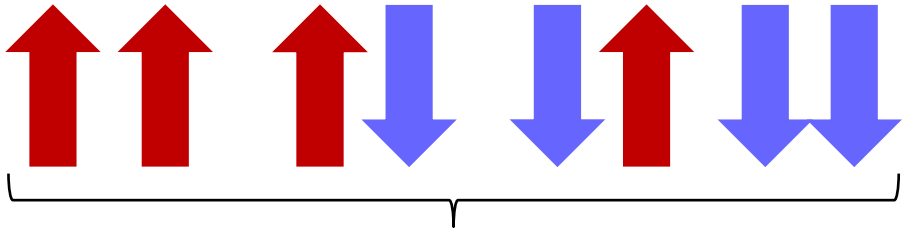


量子ビット

Nビットの場合、**2^Nの組み合わせを同時に表現**



**全ての組み合わせから、確率的に、
確からしい答えを探す(量子もつれを利用)**



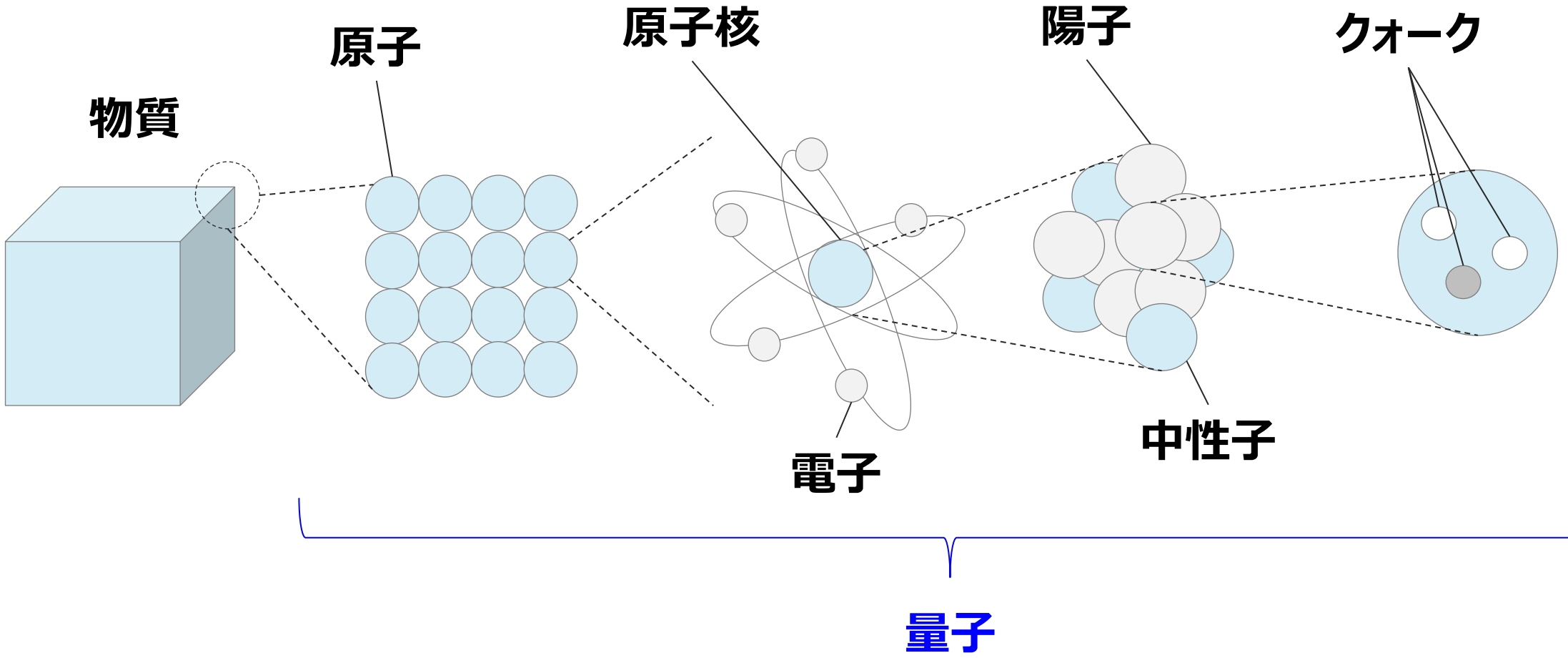
出所：日本総研 先端技術ラボ, 量子コンピュータの概説と動向, 2020
参考：日経Fintech Camp FinTech Camp 量子コンピューターの最新動向（前編） - レッスン1 量子コンピューターの概要, 2024

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

量子の世界

- 「量子」とは、原子以下の極小の物質やエネルギー単位の総称。
- 量子の世界では、**私たちが普段目に見えないミクロの世界で成り立つ物理法則（量子力学）が働く。**



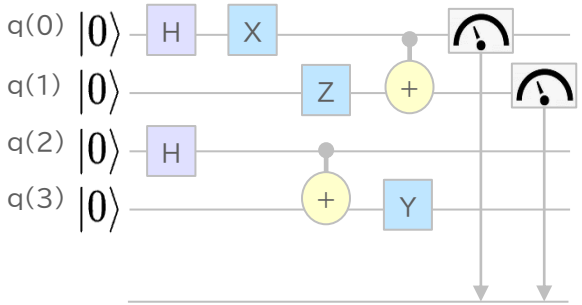
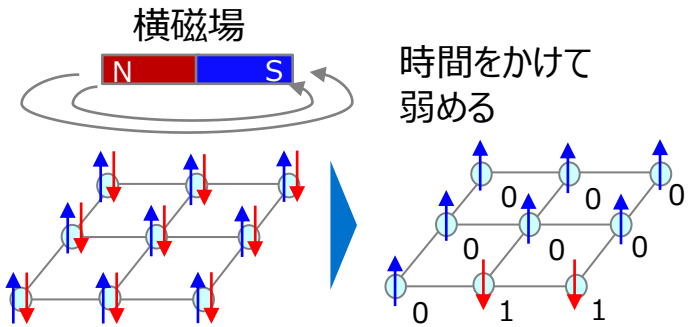
出所：日本総研 先端技術ラボ, 量子コンピュータの概説と動向, 2020

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

２種類ある量子コンピュータ

- 汎用型「**量子ゲート方式**」、特化型「**量子アニーリング方式**」に大別。ゲート方式がグローバル・スタンダード。
- 量子アニーリング方式は、シフトの最適化、CM配信の最適化などで実用化済。

	量子ゲート方式		量子アニーリング*1方式
解法手順 (次頁詳細)	**量子アルゴリズムの検討 ⇒ 量子回路を作成 ⇒ 量子ゲート操作** 		**イジングモデルH(σ)に定式化 ⇒ 磁場を印加、時間経過** 
解ける問題	汎用演算		組み合わせ最適化問題
実用化 時期	NISQ*2 (誤り訂正なし)	FTQC*3 (誤り訂正あり)	一部の領域で実用化 (シフト最適化など)
	数年以内？	2030年以降？	
開発状況 [商用化済]	1,000+量子ビット (IBM社)	なし	5,000+量子ビット (D-Wave社)

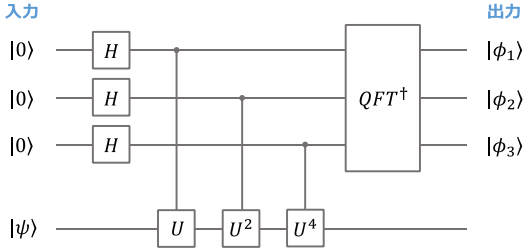
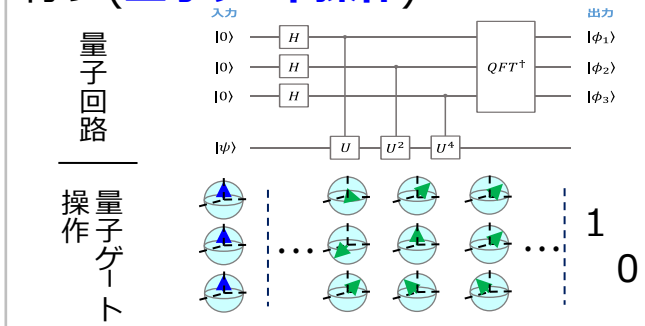
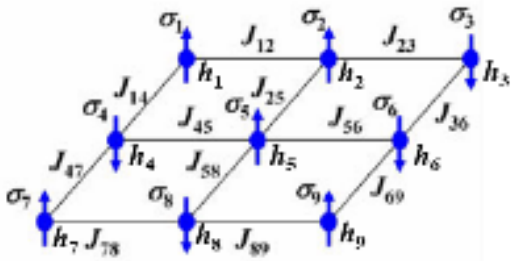
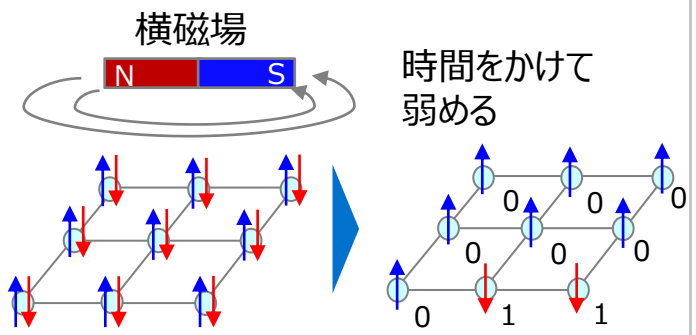
*1 アニーリング：(冶金の用語で) 焼きなましは、臨界点を超えた高温に金属を加熱し、それを非常にゆっくり冷却させること。
*2 NISQ：Noisy Intermediate-Scale Quantum device の略。小～中規模(量子ビット数～数百個程度)の量子コンピュータの総称。誤り訂正がなく古典コンピュータの助けを借りながら情報処理を行う。
*3 FTQC：Fault Tolerant Quantum Computer の略。誤り耐性付きの量子コンピュータの総称。

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

(参考)2つの方式のプロセス

- 量子が持つ性質を利用している点は共通だが、量子ゲート方式と量子アニーリング方式では、**課題解決に対するアプローチや実装方法は大きく異なる。**

	課題	設計	プログラミング	計算	測定
量子ゲート方式	課題・テーマの抽出	**量子アルゴリズムを開発・検討** 量子アルゴリズム 名称 / 内容 Grover：ある目的のデータを効率的に探すためのアルゴリズム Shor：素因数分解・離散対数問題を解くアルゴリズム …：…	量子コンピュータに対して、**量子ゲートを適切に配置し、量子回路を作成** **量子回路** 	量子ビットに対して色々な変換操作を行う（**量子ゲート操作**） 	計算結果の読み出し
量子アニーリング方式		**問題を定式化する** **イジングモデル H(σ)** $H(\sigma) = -\sum_{i<j} J_{ij}\sigma_i\sigma_j - \sum_{i=1}^{N} h_i\sigma_i$ σ：変数の組 $\{\sigma_1, \sigma_2, \cdots, \sigma_N\}$ N：スピンの数(整数) 各σ_i：イジングスピン({1,-1} を取る変数) J_{ij}：スピン間の相互作用 h_i：局所磁場	定式化した各変数間の結合強度（J_ij）と各変数の重み付け（h_i）を量子コンピュータに設定 	**磁場を印加し、時間をかけて弱めると、最適解が返る** 	

出所：日本総研 先端技術ラボ, 量子コンピュータの概説と動向, 2020

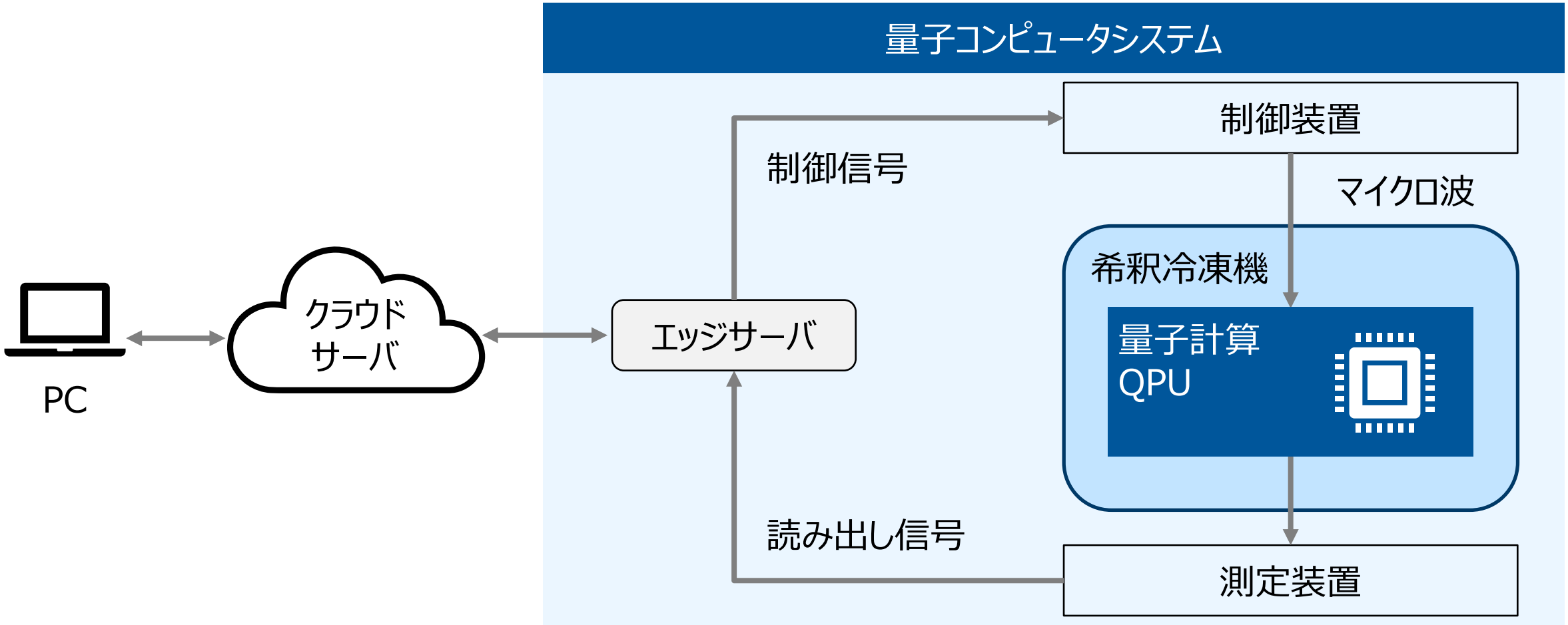
© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

量子コンピュータシステムの全体像

- **量子計算は、量子チップ (QPU*1) で実行。プログラミング、マイクロ波信号の生成、測定などは、現在の古典コンピュータを用いる。**
- **大抵はクラウド経由で利用する** (下図は、超伝導方式や半導体方式のシステム構成図)。

*1 Quantum Processing Unit の略



© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

量子状態の実現方式

- 「超伝導方式」が最も主流で研究開発が進んでいるが、近年、「イオントラップ方式」が進展。
- どの方式も一長一短。現時点で、どれが本命か判断は難しい。

	(人工的に量子ビットを実現)		(自然に存在する物理系を用いて量子ビットを実現)		
	超伝導	**半導体(シリコン)**	**イオントラップ**	**中性原子**	**光**
原理	超伝導状態の電子回路に対して、マイクロ波などを用いて計算	半導体の薄膜に電子を閉じ込め、電子のスピンを0/1に対応、計算	イオンを真空中に閉じ込め、レーザー光を用いて計算	レーザー冷却を用いて、中性原子の運動を制御し計算	光子に情報を載せて、光回路を作り計算
開発状況	**実機の開発・販売**	プロトタイプの開発	**実機の開発・販売**	プロトタイプの開発	プロトタイプの開発
動作環境	極低温(mK*1)	極低温(K*1)	真空	真空	常温*2
量子ビット数	1,121 (IBM)	12 (Intel)	56 (Quantinuum)	N/A*3	N/A*3
消費電力*4	25 ~ 140kW	21kW	2kW	7 ~ 20kW	4kW
利点(○)／欠点(×)	○集積化可能 ×0K*1付近まで冷却要 ×配線問題(配線できる量子ビット数に限界あり)	○集積化可能 ○ｺﾋｰﾚﾝｽ時間*5(長) ○半導体技術を応用可 ×量子ビット制御が難しい	○ｺﾋｰﾚﾝｽ時間*5(長) ○高いゲート忠実度*6 ○全結合 ×ゲート操作時間	○ｺﾋｰﾚﾝｽ時間*5(長) ○拡張性 ×ゲート操作時間	○ゲート操作時間(短) ○環境ノイズを受けにくい ×光子損失によるノイズ
主な参入ﾌﾟﾚｲﾔｰ 企業	IBM, Google, Rigetti, IQM, 富士通, D-Wave, NEC	Intel, Equal1, 日立, blueqat	Quantinuum, IonQ, AQT, Universal Quantum	Pasqal, QuEra, Infleqtion, Atom Computing, NanoQT	PsiQuantum, Xanadu, NTT
主な参入ﾌﾟﾚｲﾔｰ ｱｶﾃﾞﾐｱ	UC Berkeley, 理研, 阪大, 東理大,中国科技大	理研, 産総研, ニュー・サウス・ウェールズ大	ﾃﾞｭｰｸ大, ﾒﾘｰﾗﾝﾄﾞ大, NIST, ｲﾝｽﾌﾞﾙｯｸ大, OIST	MIT, ハーバード大, 分子科学研究所	東大, デルフト工科大, 中国科技大

*1 単位K (ケルビン) は熱力学温度の単位で、絶対零度 (0K) は -273.15℃に相当。超伝導方式は10mK (-273.14℃) 、半導体方式は100mK (-273.05℃) ~1.5K (-271.65℃) 程度の環境下で動作するため、半導体方式は超電導方式に比べて希釈冷凍機の小型化などが期待される。 *2 PsiQuantum の単一光子を用いる手法では、光検出器を冷却するために大型の冷凍機が必要。
*3 汎用計算はできないが、中性原子方式: 289量子ビット (QuEra, 一種類の組み合わせ最適化問題専用) 、光方式: 216量子ビット (Xanadu, ガウシアンボソンサンプリング専用) が開発されている。
*4 Pasqal, Quantum Computing in the Roadmap to Greener Calculations を参照。目安値として8畳の冷房能力は約2.5kW。各方式が動作するコンポーネント、量子ビット数によって値が変動する点、現在の量子コンピュータで解ける問題は小規模・実用的な問題ではないため現在の古典コンピュータとの単純比較することは困難である点は留意が必要。 *5 量子状態を保つ時間。コヒーレンス時間が短いと、量子状態が崩れ、ノイズ発生などにより、計算精度が低下する。 *6 忠実度 (Fidelity) は、2つの量子状態がどのくらい近いかを示す指標のひとつで、量子回路の計算の正しさを表す。

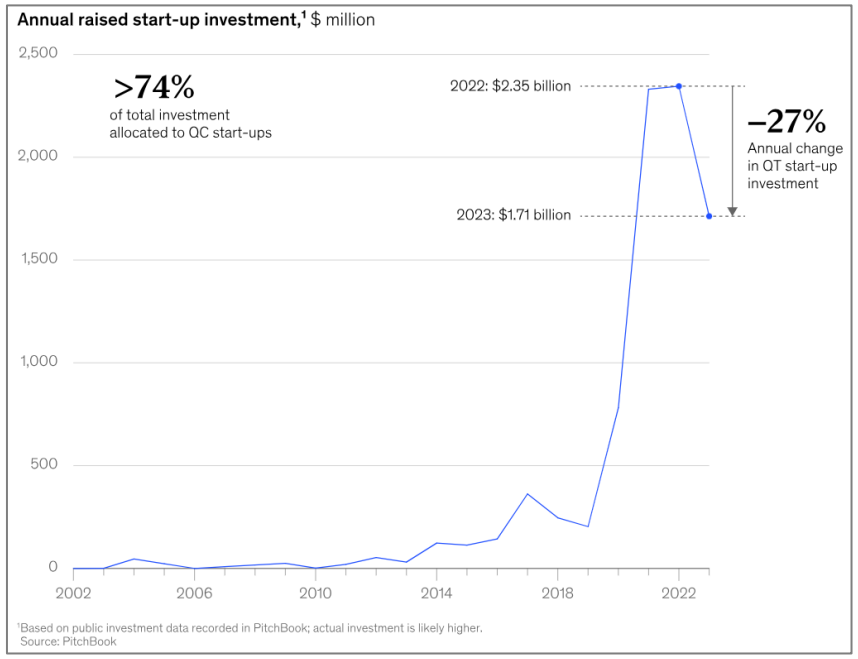
© The Japan Research Institute, Limited

量子技術の投資動向

- 2019年の Google の量子超越性の発表以降、**量子コンピュータへの投資が非常に活発化。**
- **2022年をピークに下落し、「量子の冬」と呼ばれることもあるが、**全世界的な投資減、生成AIの注目などの影響が大きいとされる。対照的に、**公的資金の投資は増加しており、研究開発は今後も継続、進展すると予想。**

量子スタートアップへの投資

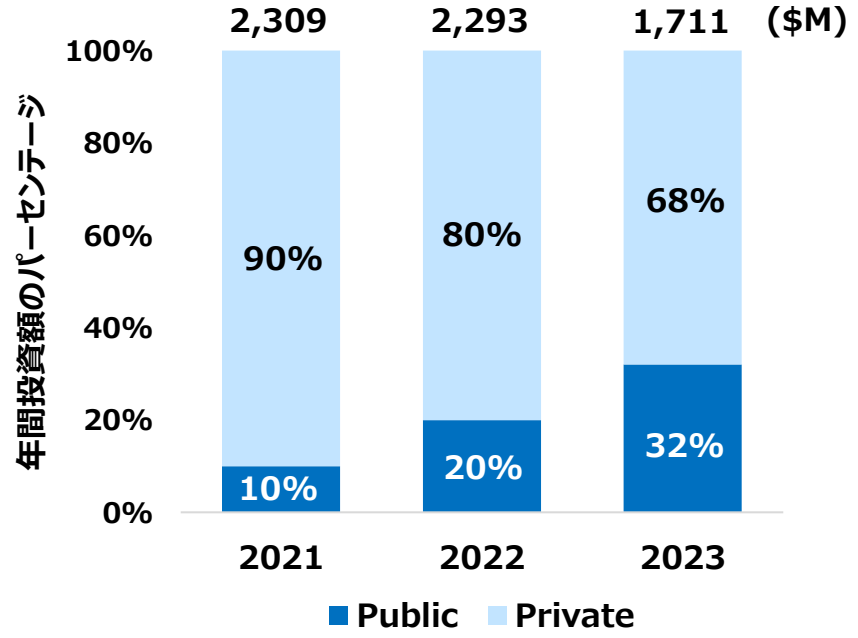
- 2022年をピークに、2023年は27%下落 (17億ドル減) した。ただし、全業種の下落率38%よりは小さい。



出所：McKinsey & Company, “Steady progress in approaching the quantum advantage”, April 24, 2024

量子技術への公的資金

- 民間投資と対照的に、2023年の公的投資は2022年対比で増加。全体の3分の1を占める。



出所：McKinsey & Company, “Quantum Technology Monitor”, April 2024 を基に作成

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

量子コンピュータの主なプレイヤー

- **欧米、日本**などに有力プレイヤーが存在(下図*1)。ハードウェア開発が多いが、ソフトウェア開発も増加。
- 量子コンピュータのスタートアップ数は、**2024年時点で261社にのぼる (内、75社は米国企業)**[*2]。

ハードウェア

北米

超伝導
IBM( ) Google ( ) D-Wave( )
Amazon( ) Rigetti( ) Anyon( )
SEEQC( ) Bleximo ( ) Nord Quantique( )
Qolab( )

半導体
Intel( )

イオントラップ
IonQ( ) Quantinuum( )

光
PsiQuantum( )
Quantum Computing Inc. ( )
Xanadu( )

中性原子
QuEra( ) Infleqtion( )
Atom Computing( )

トポロジカル
Microsoft( )

欧州

超伝導
Oxford Quantum Circuits( ) QuantWare( )
Alice & Bob( ) IQM( )

イオントラップ
Universal Quantum( ) Oxford Ionics( )
AQT(Alpine Quantum Technologies)( )

光
ORCA Computing( )
QuiX Quantum( )
eleQtron( ) NQCG( )

半導体
Quantum Motion( )
Equal1( ) C12( )

中性原子
Pasqal( ) planqc( )

アジア・オセアニア

超伝導
Fujitsu( ) NEC( )
Tencent( ) Huawei( )
Origin Quantum( )

半導体
Hitachi( ) blueqat( )
Silicon Quantum Computing( ) Diraq ( )

中性原子
NanoQT( )

イオントラップ
Qubitcore( )

ダイヤモンド
Fujitsu( ) Quantum Brilliance( )

光
OptQC( ) TuringQ( )

超冷却技術
Oxford Instruments( ) BlueFors( )
Ulvac Cryogenics( )

制御機器
Keysight Technologies( ) QuEL( ) Qblox( )

ソフトウェア

北米
QC Ware( )
SandboxAQ( )
Strangeworks( )
Qubit Engineering( )
QSimulate( )
1QBit( )
ProteinQure( )

欧州
Riverlane( ) Rahko( )
Phasecraft( )
HQS Quantum Simulations( )
QuantFi( )
Qubit Pharmaceuticals( )
ParityQC( )
Multiverse Computing( )
Terra Quantum( )

アジア・オセアニア
blueqat( ) QunaSys( ) Classiq( )
Fixstars( ) Quanmatic( ) Qedma( ) Q-CTRL( )
Jij( ) Quemix( ) Horizon Quantum Computing( )

クラウドサービス

北米
AWS( ) Microsoft( ) IBM( )
Google( ) Rigetti( ) Equinix( )
NVIDIA( ) QC Ware( ) Xanadu( ) D-Wave( )

アジア・オセアニア
Fujitsu( ) NEC( ) Hitachi( )
Toshiba( ) Fixstars( )

欧州
Atos( )

*1 すべて表記できていないが、ハードウェアからソフトウェアまで一貫してサービスを提供する企業や、それぞれの開発企業が自社クラウドサービスを提供している点は留意。

*2 出所：McKinsey & Company, “Quantum Technology Monitor”, April 2024

出所：日本総研 間瀬英之/身野良寛, 量子コンピュータまるわかり (日経文庫), 日経BP 日本経済新聞出版, 2023, p.76-77 を基に作成

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

代表的な量子アルゴリズム

- 量子コンピュータの性能が古典コンピュータを上回るには、**量子アルゴリズム**[*1]の開発が必要。**FTQCアルゴリズム**(誤り訂正を前提として考案されたアルゴリズム)[*2]、**NISQアルゴリズム**(誤り訂正できない条件のもと考案されたアルゴリズム)[*3]に分類される。
- 2018年からNISQアルゴリズムの開発が活発化したが、**現時点で実務的に価値のある計算は実現していない。**

	名称	主な用途	主な課題/現状		量子加速[*4]
FTQC	**QFT (量子フーリエ変換)**	(Shor、QPEのサブルーチン[*5])	誤り率の高さ「根本原因」	量子ビット数の増加でゲート数が増加	指数
	Shor	素因数分解(既存暗号解読)		〃 (QFT利用のため)	指数
	QPE (量子位相推定)	分子の基底状態の探索、(QAEのサブルーチン[*5])		〃 (QFT利用のため)	指数
	Grover	データ探索		データ数の増加で回路が深くなる	2次
	QAA (量子振幅増幅)	(QAEのサブルーチン[*5])		〃	2次
	QAE (量子振幅推定)	モンテカルロ法		QAA、QPE利用のため同課題あり	2次
	HHL (Harrow-Hassidim-Lloyd)	信号処理や機械学習		QPE利用のため同課題あり	指数
NISQ	**VQE (変分量子固有値ソルバー)**	分子の基底状態の探索	充分な回路深さ、低い誤り率が必要		-
	QAOA (量子近似最適化ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑ)	組み合わせ最適化	解の品質や速度面での優位性が不明		-
	QSVM (量子SVM)	教師あり機械学習	実用的な優位性が示せていない		-
	QGAN (量子敵対的生成ﾈｯﾄﾜｰｸ)	データ生成・増幅	高次元なデータの生成ができない		-

*1 欲しい答えを高い確率で得るための量子コンピュータ専用に設計されたアルゴリズム。 *2 FTQC : Fault Tolerant Quantum Computer の略。誤り耐性型の汎用量子コンピュータの総称。
*3 NISQ : Noisy Intermediate-Scale Quantum device の略。誤り訂正無しの小～中規模 (量子ビット数～数百個程度) の量子コンピュータの総称。
*4 古典コンピュータ上のベストアルゴリズムよりも高速動作すること。 *5 サブルーチンとは、メインの処理 (ルーチン) から呼び出される別の処理のこと。例えば、QFTのアルゴリズムは、Shorのアルゴリズムの処理の一部分として実行される。

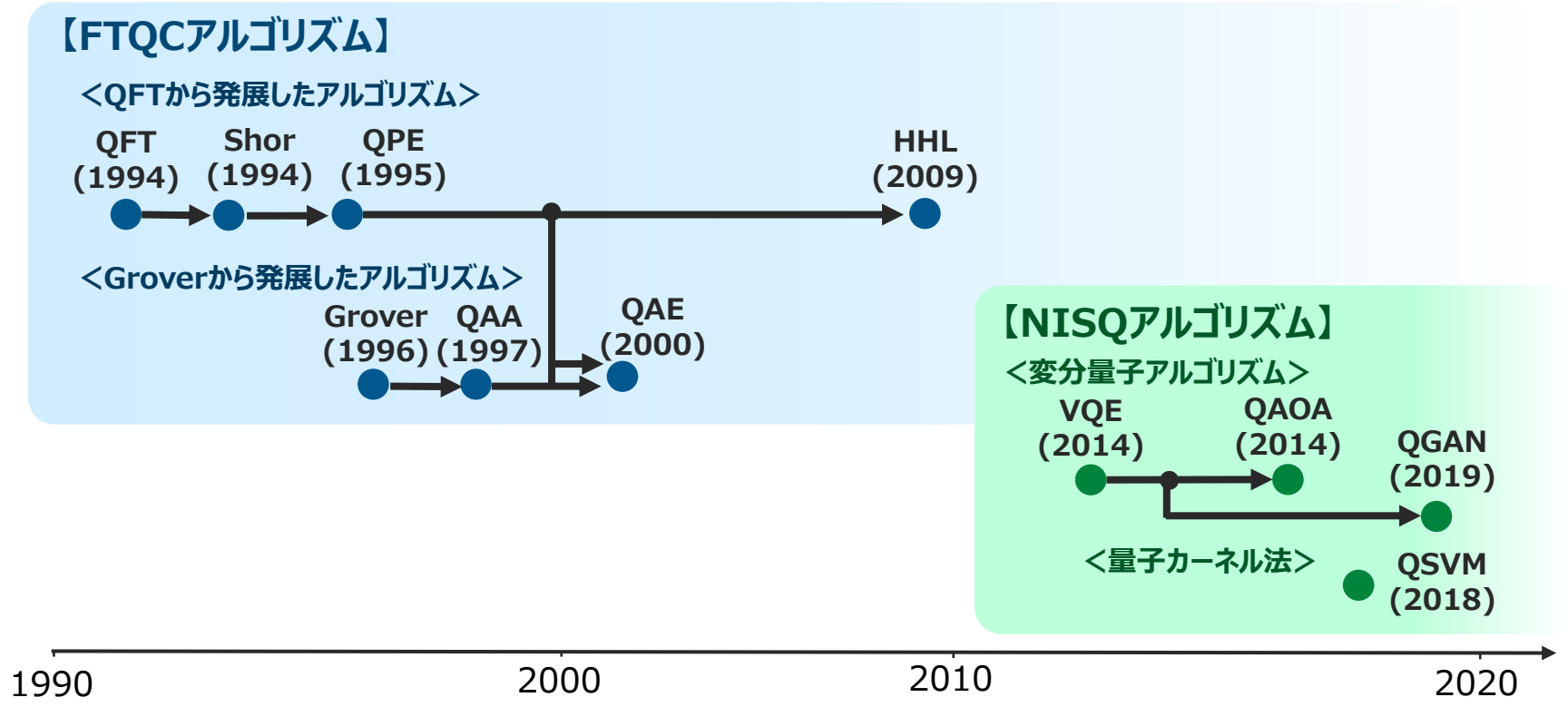
出所：日本総研 間瀬英之/身野良寛, 量子コンピュータまるわかり (日経文庫), 日経BP 日本経済新聞出版, 2023, p.62 を基に作成

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研
The Japan Research Institute, Limited

(参考)量子アルゴリズム系統図

- FTQCアルゴリズムは大きく分けて、1994年登場のQFT (量子フーリエ変換)の高速性を活用したアルゴリズムと、1996年登場のGroverのアルゴリズムの高速性を活用したアルゴリズムの2パターンが主流。
- 2014年からは、変分量子アルゴリズム*1を用いた量子・古典ハイブリッドアルゴリズムの研究が進んだ。加えて、近年では量子ビットでデータを表現して機械学習を行う量子機械学習の研究も進む*2。



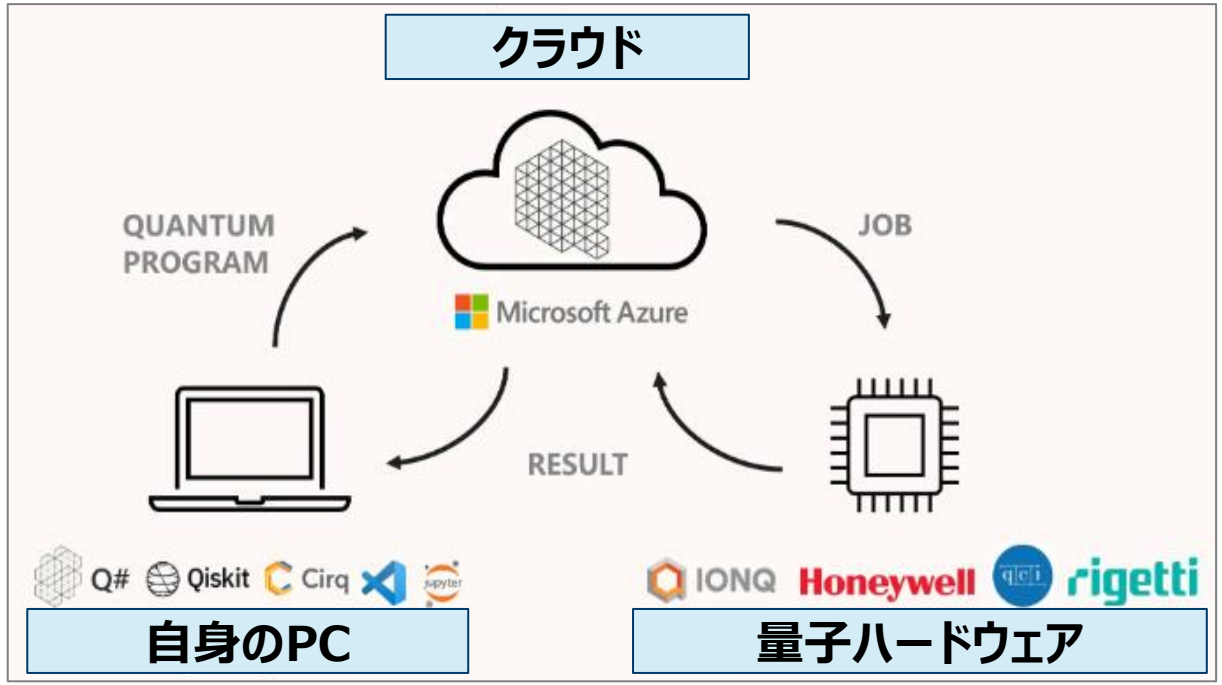
*1 量子回路の出力を適宜モニタリングし、古典コンピュータによってその構成を逐次調整し、目的のタスクを実行できる量子回路を作り出すアルゴリズムのこと。
*2 ハードウェアが発展しても理論的に優位性を実現する保証がないため、一過性のブームになる可能性あり。

© The Japan Research Institute, Limited

量子クラウドプラットフォームとソフトウェア開発キット (SDK)

- **ユーザが量子コンピュータを利用する際は通常、クラウド経由となる。**すでに、**クラウド大手のAWSやマイクロソフトなどが自社のクラウドプラットフォーム上で複数の量子ハードウェアの利用提供を開始**している。
- 量子コンピュータが広く社会実装されるには、**量子ソフトウェアの充実が必要。**すでに多数のソフトウェア開発キットがあるが、マシン語に近く、現在のような**(人間が理解しやすい) 高級プログラミング言語への発展が必要。**

量子クラウドプラットフォーム



出所：https://azure.microsoft.com/en-us/blog/quantum/2021/12/06/azure-quantum-open-flexible-and-future-proofed/ に加筆

ソフトウェア開発キット (SDK) 一覧

SDK	Developer	主なPG言語
Bracket	AWS ( )	Python
Cirq	Google ( )	Python
D-Wave Ocean	D-Wave ( )	Python
PennyLane	Xanadu ( )	Python
QamuyClient	QunaSys ( )	Python
QKD	Microsoft ( )	Q#
Qiskit	IBM ( )	Python
Qmod	Classiq ( )	Python
tket	Quantinuum ( )	Python

© The Japan Research Institute, Limited

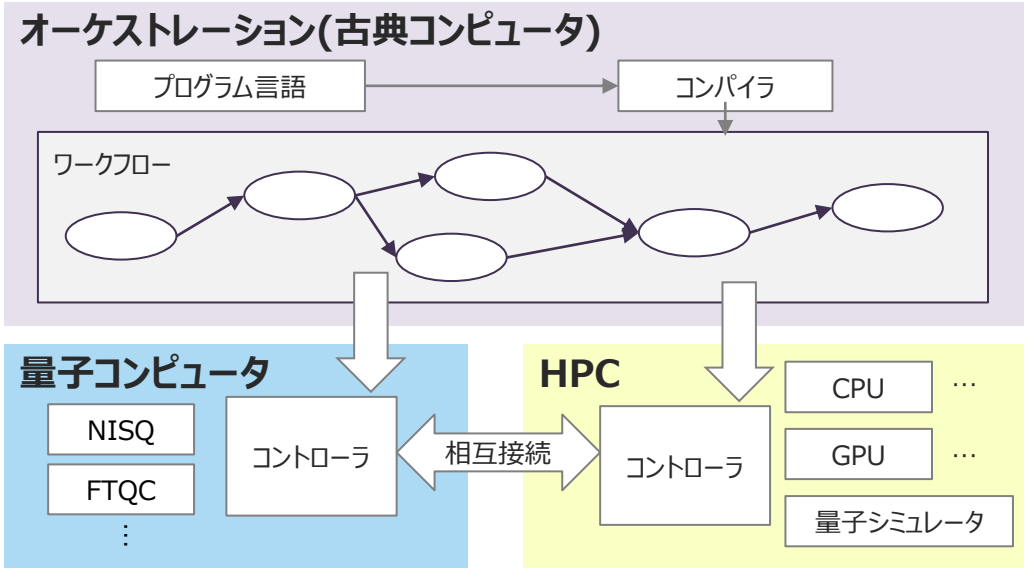
日本総研 The Japan Research Institute, Limited

量子コンピュータとHPC (高性能計算)

- 量子コンピュータは、**HPC (高性能計算≒スパコン) を完全代替するものではなく、併用利用**される想定。
- 量子と古典が統合された**量子古典ハイブリッドコンピューティング**の研究開発が進む。

量子古典ハイブリッドコンピューティング

- プログラムをワークフローに分解し、各タスクにおいてHPC、または量子のうち適したプロセッサを割り当て実行する。
- 近年、量子古典の統合研究プロジェクトが増加 (産総研G-QuAT、理研＆ソフトバンク、英Riverlane＆米Rigetti＆米ORNL、IBM＆レンセラー工科大学、理研＆阪大　など)



出所：IEEE Micro, Quantum Computers for High-Performance Computing, Sept.-Oct. 2021, pp. 15-23, vol. 41, DOI Bookmark: 10.1109/MM.2021.3099140、
The Future of Quantum Computing with Superconducting Qubits, arXiv2209.06841 を基に作成

(参考) 主な違い

	HPC(高性能計算)	量子コンピュータ
目的	高度な数値計算やデータ処理のすべて	限られた目的に大きな力を発揮
演算単位	0 or 1 (古典ビット)	0 and 1 (量子ビット)
計算方法	すべての入力に対して毎回計算	量子力学を利用して一括計算
強み	•既存技術を活用 •汎用性の高さ	•特定のタスクを高速処理 (計算ステップを削減) •電力消費量が少ない？
弱み	•電力消費量が大きい •微細加工技術の限界	•製造や量子状態の維持・制御が難しい
見通し	•今後も性能向上と新機能開発が続くが、伸びは鈍化傾向	•限られた問題に対して実用化が進展、高速化が期待されている

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

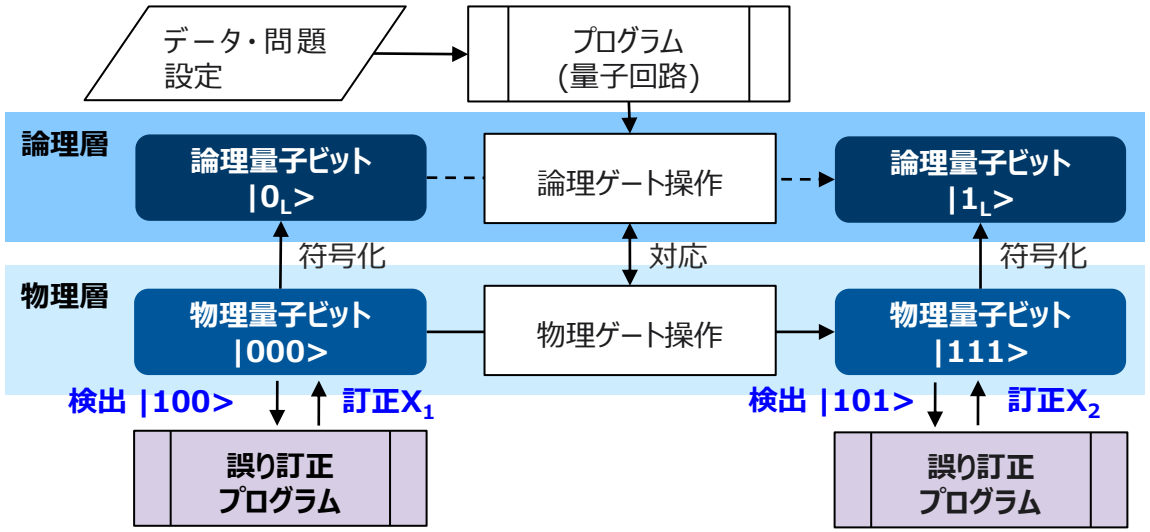
量子誤り訂正・低減

- **量子ビットはノイズに弱く、計算中に誤りが起きやすい** (量子ビット数だけ増えても性能は上がらない)。
- **近年、量子誤り訂正・低減の実証実験が増加。**Google、QuEra (クエラ)などが**基礎的な研究成果を発表。**

概要

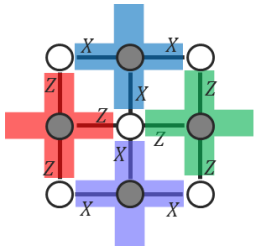
量子誤り訂正

- 多数の物理量子ビットを用いて符号化することで、量子ビットに生じる誤りを訂正する技術。



- 「表面符号」という冗長化方法が有望視されているが、解決すべき課題は多く残る。
- 表面符号は、量子ビットが平面上に配置された超伝導方式のハードウェアで実装しやすいと考えられている。

(右図) 表面符号のイメージ
白丸：実ビット (5個で1論理ビットを構成)
黒丸：冗長な補助ビット



出所：嶋田義皓, 量子コンピューティング 基本アルゴリズムから量子機械学習まで, オーム社, 2020, p.176,186-189 を基に作成

量子誤り低減 ※量子誤り訂正を行わない

- 量子コンピュータの計算結果に、古典コンピュータで何らかの統計的な後処理を加えることで、本来の計算結果(期待される値)に近くなるように補正する技術。

近年の研究動向

		内容
訂正	Google (23年2月)	• 表面符号を用いた量子誤り訂正のスケーリングを実証。 • **49個の物理量子ビットで1個の論理量子ビットを作成。**
	QuEra (23年12月)	• 独自の誤り訂正技術を用いて、**48個の論理量子ビットを実装。**最大符号距離7の誤り訂正符号を作成。
	Quantinuum/MS (24年4月)	• 30個の物理量子ビットから4個の論理量子ビットを生成。 • **誤り訂正の効果が訂正にかかるオーバーヘッドを上回る。**
低減	IBM (23年6月)	• **実機の特徴に応じたノイズ増幅技術の実現**により、より正確に後処理を行う。

© The Japan Research Institute, Limited

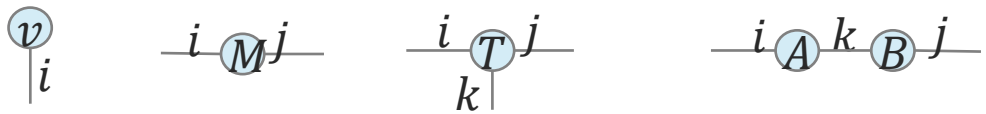
日本総研 The Japan Research Institute, Limited

量子インスパイア

- 量子インスパイアとは、**量子物理学や量子コンピュータの研究から派生して登場した技術を指し示す。**
- 代表的な事例として、量子ゲート方式のシミュレートに活用できる**「テンソルネットワーク」**、量子アニーリング方式のシミュレータとみなすことができる**「シミュレーテッドアニーリング (SA) 」**がある。

テンソルネットワーク

- テンソルネットワークとは「ベクトル」「行列」「テンソル」、及びそれらの縮約をネットワークとして視覚化したもの。
- テンソルとは、行列(2次元配列)を拡張し、3次元以上も含めて一般化したもので、縮約とは、行列の積算をテンソルにて一般化したもの。ベクトルを1本足、行列を2本足、テンソルをn本足のノードで表記し、足を結合させることで縮約を表現。

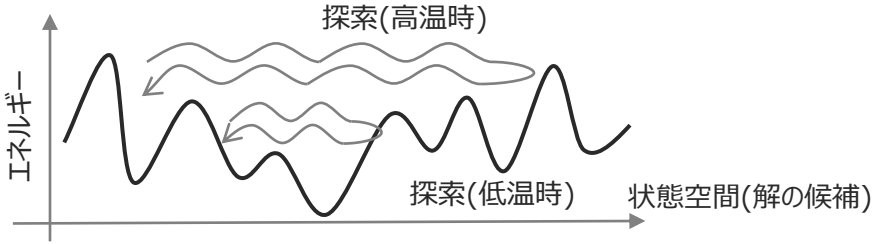


ベクトル v_i　行列 $M_{i,j}$　テンソル $T_{i,j,k}$　　行列 $A_{i,k}$ と $B_{k,j}$ の積

- 高次元テンソルを行列積状態と呼ばれる状態に分解して低次元で近似する等の計算手法を駆使し、効率よく縮約することで、テンソルで表現されたデータの圧縮が可能。

シミュレーテッドアニーリング (SA)

- 金属の焼きなまし (アニーリング) の過程で行われる加熱冷却手法を模倣した最適解の探索手法である。ここでは SA を量子インスパイアに分類しているが、量子アニーリングよりも SA の方が古くから組み合わせ最適化問題の解法として活用されてきた。
- SA、量子アニーリングともに、「変数の状態がボルツマン分布に従う」とみなして統計力学モデルに当てはめる。モデルのパラメータを変えていくことで、エネルギー最小となる解候補を絞る。SA では温度パラメータを小さくしていく。量子アニーリングでは横磁場の影響をゆっくり弱めていくような操作を行いながら、解を探索する。
- 量子アニーリング応用事例のほとんどが SA を用いて実証が可能。



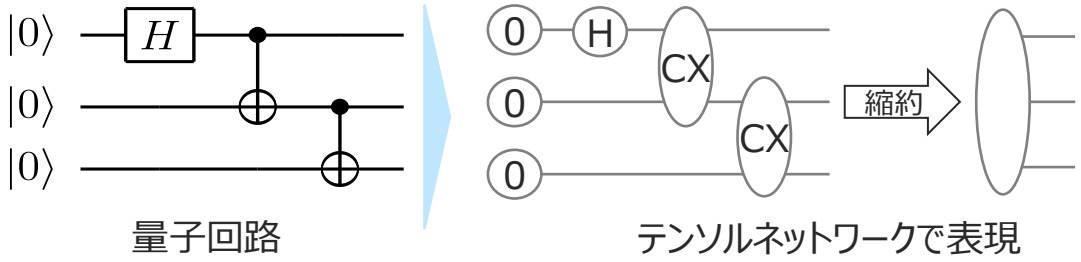
© The Japan Research Institute, Limited

(参考) テンソルネットワークの活用

- テンソルネットワークは、**量子ゲート方式のシミュレーション、機械学習手法などへ応用できる。**
- 現時点で量子コンピュータ実機では扱えない問題でも解ける場合があり、有用な用途の発見が期待されている。

量子ゲート方式のシミュレーション

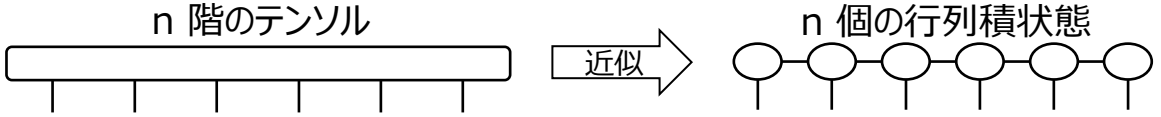
- 量子回路をテンソルネットワークで表現し、縮約の計算を行うことによって回路の演算結果をシミュレートすることができる。
- 縮約を行う際に、近似等の手法をうまく使って計算を簡略化できれば、大規模な問題を現実的な精度で解ける可能性がある。



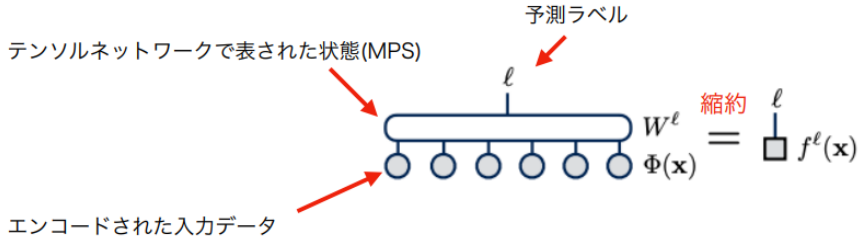
- 量子ゲート方式と同様のアプリケーションで応用可能性が期待されるが、有効なアプリケーションは未だ見つかっていない。
- 現時点で量子コンピュータ実機で扱えない問題でも解けるものがある。
- 一般に、浅い量子回路であれば量子ビット数が多くても解けるが、深い量子回路には適していない。

機械学習への活用

- 機械学習モデルは n 階のテンソルで一般的に表現できる。
- n 階のテンソルは n 個の行列積状態 (Matrix Product State (MPS)) などで近似できる。
- 行列積状態を組合わせることで、多様な機械学習モデルを近似的に構築できる。



- テンソルネットワークを 1 個のベクトルに縮約することで予測や分類を行うモデルを構築できる。 MNIST や Fasion-MNIST で従来手法に匹敵する結果を出せる。



参考：Tensor Network Quantum Virtual Machine for Simulating Quantum Circuits at Exascale | ACM Transactions on Quantum Computing, 日本総研 渡邉一生, 量子回路のテンソルネットワークシミュレーション ～縮約密度行列の計算～ #量子コンピュータ - Qiita

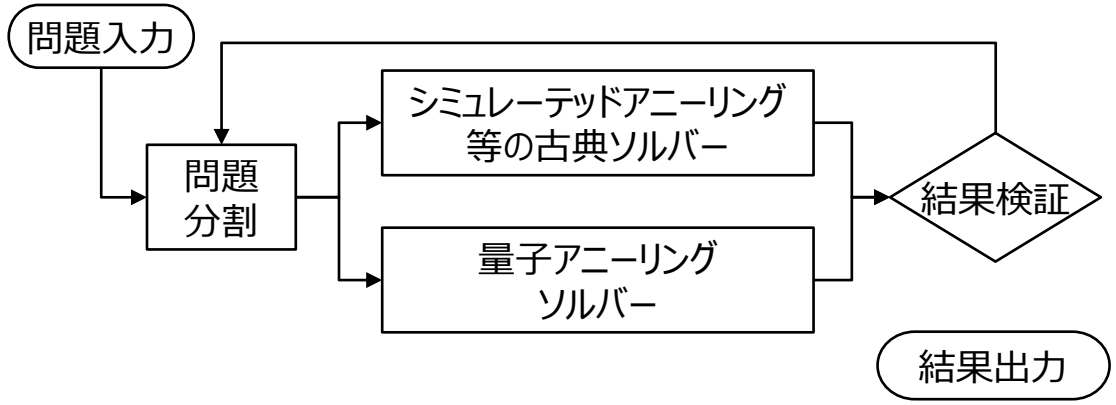
© The Japan Research Institute, Limited

ハイブリッドソルバーとブラックボックス最適化(量子アニーリング方式)

- 量子アニーリング技術の新しい取り組みとして、**「ハイブリッドソルバー」**と**「ブラックボックス最適化」**がある。
- ハイブリッドソルバーは、古典コンピュータを併用することで、従来の量子アニーリングのみでは解けなかった大規模な組み合わせ最適化問題を解くことを目指す。ブラックボックス最適化は、既存の手法であるが、学習計算の一部に量子アニーリングを適用できる。

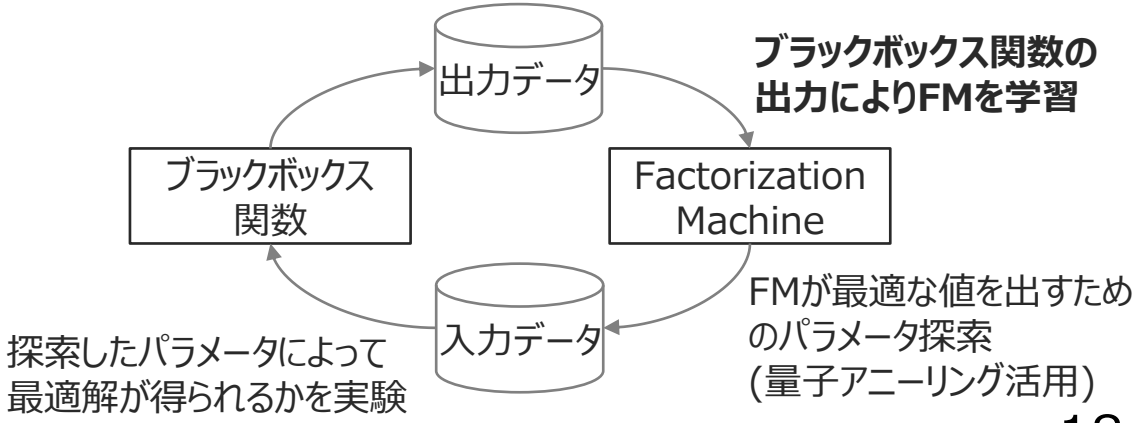
ハイブリッドソルバー

- 古典コンピュータと量子コンピュータを併用して組み合わせ最適化問題を解くもの。基本的な手法は、大規模な問題を複数の小規模な部分問題に分割し、部分問題を反復計算した結果を総合して全体最適の結果を取り出すというもの。
- D-Wave社は自社のクラウドサービスにて、'Leap's Hybrid Solvers' というハイブリッドソルバーを提供。



ブラックボックス最適化

- 目的関数の詳細がブラックボックスであるときに、その出力が最適解になるような入力を見つけ出す手法である。ここでは行列分解を用いた機械学習モデルの一種である Factorization Machine (FM) を使って、ブラックボックス関数の挙動を再現させる。
- FMはQUBO形式で表現可能なため、量子アニーリングを使ってFMの出力を最適にするパラメータを求めることができる。



© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

各国の政策動向

- **2023年は、世界中の国・地域で**量子国家戦略のもと、量子技術に巨額の公的資金が投入。
- **ユーザ企業を含めた産官学連携・ユースケース創出、人材教育、産業化、サプライチェーン強靭化などが明記。**

地域・国		投資額 ($B)*1	主な取り組み
北米	米国	3.8	2018年に「国家量子イニシアチブ法」が成立し、5年間で12億USDを投資。現在、現法案の再承認・更新を検討。
	カナダ	1.4	**2023年に「量子国家戦略」を発表。**7年間で3.6億CADを投資。**研究、人材、商業化の３本柱に焦点を当て推進。**
欧州	EU	1.1	2018年に「量子フラッグシップ」を発表。10年間で10億EURを投資。5,000人以上の研究者が参画。
	英国	4.3	**2023年に10年後のビジョンを設定した新たな国家量子戦略を発表。**10年間で公的25億GBP、民間10億GBPを投資。
	オランダ	1.0	2019年に「量子技術国家アジェンダ」を策定。**'23年にQuantum Delta NL (国家エコシステム)が 6,020EUR投資。**
	ドイツ	5.2	**2023年に €30億の量子コンピュータ開発プロジェクト ('23年～'26年)を発表。**
	フランス	2.2	2021年に量子戦略を発表。4年間で官民合わせて18億EURの資金提供を行う(政府からは10億EUR1を投資)。
	スウェーデン	0.001	2018年に量子国家研究プログラムとして量子技術センター (WACQT)を設立。12年間で10億SEKを投資。
	デンマーク	0.15	**2023年に量子技術戦略 (①研究・イノベーション、②商業化・応用の2部構成)を発表。2023～27年で総額10億デンマーク・クローネを投資。**
	ロシア	0.8	2021年に量子コンピュータの研究に5年間で7.9億USDを投資することを発表。
アジア	中国	15.3	安全保障・防衛、AIへの応用も視野に**量子技術の研究開発に150億USD以上を投資** (推定値、政府の公式発表はない)。
	日本	1.8	**2023年に量子クラウドコンピューティングへ42億円の資金提供。FY24予算額として、約1,200億円を計上。**
	イスラエル	0.4	**2023年にイノベーション庁が1.15億ILS (新シェケル)(約48億円)の資金提供を行うコンソーシアムを設立。**
	豪州	0.16	**2023年に「量子国家戦略」を発表。**'30年まで5つの重点テーマで取り組む。10億AUD(約1,030億円) を投資。
	韓国	2.4	**2023年に「量子科学技術戦略」を発表。**'35年までに**民官協力で**最低でも3兆KRW(ウォン)(約3,300億円) 以上を投資。
	インド	1.7	**2023年に8年間で60億INR (約108億円) の投資を行う「国家量子ミッション」を発表。**

*1 Qureca, "Quantum Initiatives Worldwide 2024", McKinsey & Company. "Quantum Technology Monitor" などを参考に作成。2023年までの累計投資額(予算額を含む)。
量子関連の予算は大型国家プロジェクトの一部に含まれることもあり、すべてが正確な値ではない点は留意。

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

(参考) 量子技術とは？

- **量子技術とは、量子力学を利用し、情報通信や計測の高度化、素材の開発などを行う技術の総称。**
- 量子コンピュータは、量子技術を応用した計算機。

理論	理論の応用例		概　要	ユースケース (将来への期待)
量子力学	情報通信	量子コンピュータ (計算)	現在のスパコンでも計算に膨大な時間を要する問題を短時間で解く	• 薬品の開発、材料開発 • 交通・物流の最適化 • 金融シミュレーション高速化
		量子暗号通信 (ネットワーク)	暗号を解く「鍵」を光子に載せ、光ファイバーなどで配送	• 量子コンピュータでも解読できない暗号
	計測	量子センシング	桁違いの高い感度・精度で温度や磁気、加速度などで計測	• 超早期診断・治療 • 地震・火山関連の防災 • 安全自動運転車
	素材	量子マテリアル	ナノテクノロジーで量子の状態を精密に制御する物質・材料	• 低電力消費・大容量メモリ • 単一の装置で熱、振動、光などから発電

参考：日本総研 間瀬英之/身野良寛, 量子コンピュータまるわかり (日経文庫), 日経BP 日本経済新聞出版, 2023, p.26-27

© The Japan Research Institute, Limited

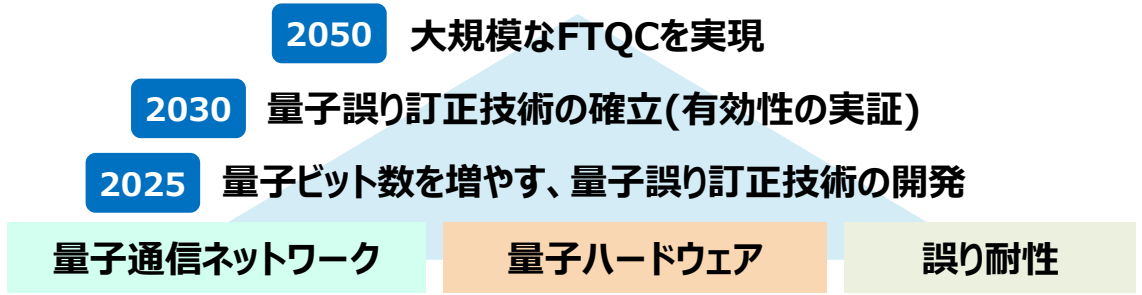
日本総研 The Japan Research Institute, Limited

日本の量子技術への取り組み

- ムーンショット型研究開発制度 (目標6) や量子国家戦略に基づき、**産官学が一体となって取り組む。**
- 量子ハードウェア開発だけではなく、**ソフトウェア開発、人材育成プログラム、国際連携強化も強化。**

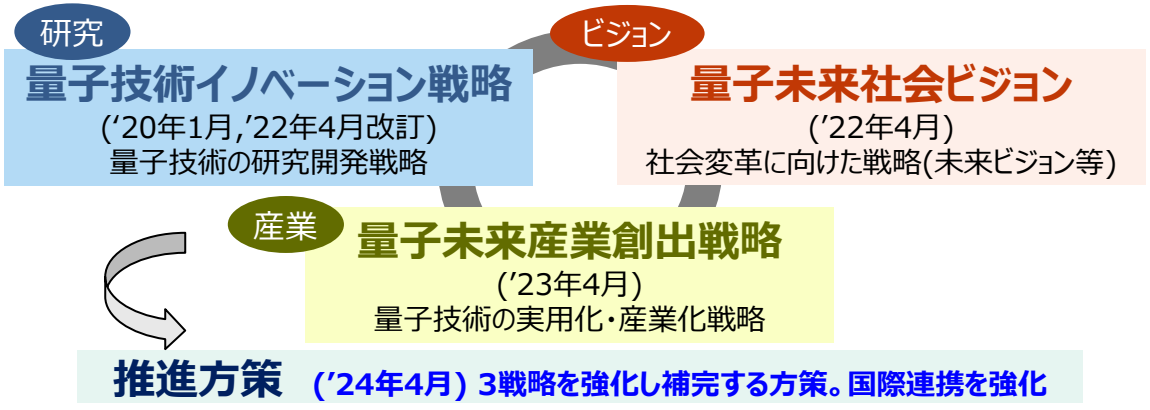
国家プロジェクト

- 内閣府ムーンショット型研究開発制度で、2050年までの大規模誤り耐性型汎用量子コンピュータ (FTQC) の実現を掲げる。



出所：内閣府, ムーンショット目標6, ムーンショット目標6 公開シンポジウム2024 北川PD を基に作成

- 国家戦略に加え、グローバル視点を加えた推進方策を策定。



出所：量子技術イノベーション会議, 量子産業の創出・発展に向けた推進方策概要(令和6年4月9日) を基に作成

産官学連携

名称	国研・大学	企業	概要
内閣府 ムーンショット 目標6	理研、分子研、東大、阪大、OIST 他	NEC、日立、富士通、NTT、NanoQT、浜松ホトニクス 他	• 2050年までに、大規模誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現。12のプロジェクトを推進
Q-LEAP[*1]	理研、NICT、産総研、阪大、慶大、名大 他	富士通、日立、QunaSys 他	• 超伝導方式の研究開発、量子ソフトウェアの研究開発、人材育成プログラムの開発
Q-STAR[*2]	JST、産総研、物質・材料研究機構、九大、東北大 他	東芝、NEC、富士通、日立、住友商事、SMFG、みずほFG 他	• 量子関連の産業・ビジネス創出、海外の関連団体との連携、国策提言。
SQAI[*3]	東大、理研、慶大、OIST、シカゴ大	トヨタ、IBM、三菱ケミカル、NVIDIA、SMFG、みずほR&T 他	• 量子AI技術の創出、量子HPC基盤の実現。 • 5つの研究課題 (量子機械学習など) に取り組む。
QSRH[*4]	阪大、京大、金沢工業大、理研	豊通、AWS、富士通、日立、ソニー、IHI、QunaSys、JX石油、AGC、ブリヂストン 他	• 量子ソフトウェア開発プラットフォームの構築および社会課題を解決する基盤の確立 • 量子ソフトウェアの社会実装と普及

*1 文部科学省委託事業「光・量子飛躍フラッグシッププログラム」の略称
*2 一般社団法人量子技術による新産業創出協議会の略称
*3 国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)COI-NEXTプログラム「サステナブル量子AI研究拠点」の略称
*4 国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)COI-NEXTプログラム「量子ソフトウェア研究拠点」の略称

© The Japan Research Institute, Limited

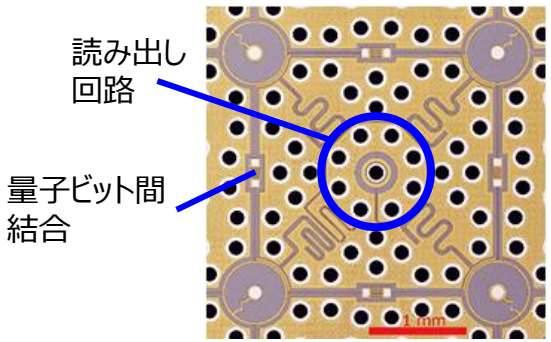
(参考) 日本の量子技術への取り組み｜国産量子コンピュータ、産総研G-QuAT

- **2023年、日本は初の国産量子コンピュータを稼働。**3号機は**冷凍機を除いて、ほとんどの部品が国産に。**
- **量子コンピュータのサプライチェーン構築の必要性**は高まっており、**産総研G-QuAT** の一活動としても取り組み。

国産の超伝導量子コンピュータの開発

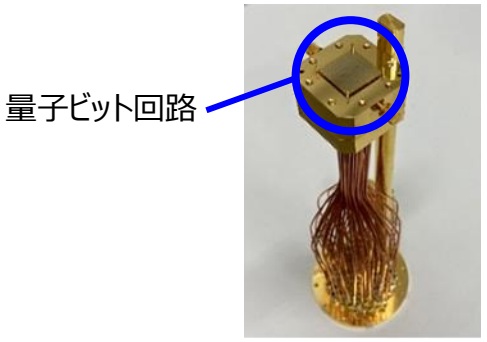
- 2023年3月に理研・富士通・NTTらは、国産の超伝導方式量子コンピュータ初号機 (64量子ビット) をクラウド公開し、研究目的での共同利用を開始した。「二次元集積回路」と「垂直配線パッケージ」により、量子ビット数を拡張しやすい点が強み。
- 同年10月には富士通、理研らが企業向けとして開発した2号機が、12月には阪大、富士通らが国産部品のテストヘッドとして開発した3号機が公開された。

二次元集積回路



正方形に並ぶ4個の量子ビットからなる基本ユニットを二次元に並べて量子ビット数を増やす

垂直配線パッケージ



量子ビット回路を拡大する際に、読出し用の配線を量子ビット回路に対して垂直に接続する

写真出所：https://www.riken.jp/pr/news/2023/20230324_1/index.html

産総研G-QuAT におけるサプライチェーン強靭化

- 近年、多くの国家戦略でサプライチェーン構築が明記。量子コンピュータの方式 (超伝導、イオントラップ、光など) によって、必要な部品は異なり、特定のサプライヤーに依存するリスクがある。
- 将来的には、現在の自動車や航空宇宙産業のようなグローバル・サプライチェーンの構築になる可能性があり、日本のエレクトロニクス、機械部品における世界有数の技術力は、海外企業・研究機関も注目している。
- 量子未来産業創出戦略 (2023年4月) のもと、産総研に設立されたG-QuATでは、グローバル産業エコシステムの構築として、事業化や新しい市場の開拓を支援する環境整備、グローバルでの企業連携を推進。サプライチェーン強靭化については、②量子コンピュータシステム開発で取り組む。

実施項目	実施内容
(1) ユースケース創出	早期の市場形成・ビジネス利用を支援
(2) 量子コンピュータシステム開発	**サプライチェーン強靭化**
(3) デバイス・制御回路設計・製造	量子コンピュータの大規模化の支援など
(4) グローバル量子産業人材の育成	経営者の育成、ユーザのリテラシー向上など

出所：第16回 量子技術イノベーション会議(イノベーション政策強化推進のための有識者会議「量子技術イノベーション」) 資料2-3 を基に作成

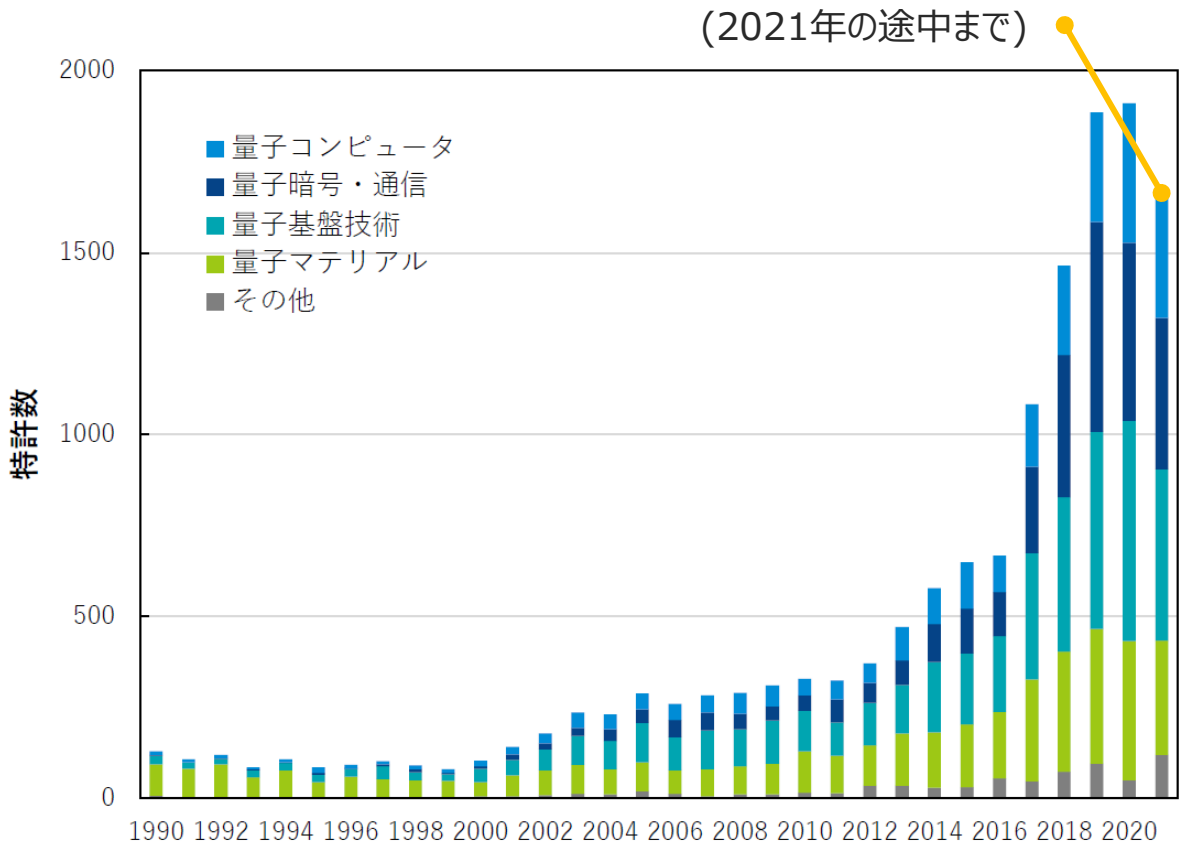
© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

特許動向

- 量子技術の特許件数は、年々**増加傾向。米中が圧倒的**に数が多い。
- 適用分野では、**医療・医薬品、化学、金融での特許出願が多い。**

量子技術の特許件数の推移



出所：JST研究開発戦略センター調査報告書, 論文・特許マップで見る量子技術の国際動向, 2022

適用分野の国籍・地域別パテントファミリー件数

適用分野	日本	米国	欧州	中国	韓国	その他	合計
医療・医薬品	**14**	**104**	**25**	**20**	**2**	**21**	**186**
金融	**14**	**60**	**6**	**25**	**0**	**8**	**113**
自動運転	1	20	7	5	1	4	38
物流・配送	28	40	6	12	0	6	92
宇宙・軍事	1	3	4	9	0	2	19
暗号解析	6	19	9	11	4	7	56
工程管理	12	11	4	10	0	2	39
化学	**31**	**67**	**15**	**16**	**3**	**11**	**143**
気候	0	3	2	7	0	2	14
交通機関	8	9	11	14	1	3	46
エネルギー	6	19	1	35	1	1	63
その他	17	66	22	42	9	7	163

出所：特許庁, 令和５年度　特許出願技術動向調査報告書(要約) －量子計算機関連技術－, [技術区分別－出願人国籍・地域別] パテントファミリー件数(技術区分：【応用分野の記載のあるもの】(小区分)、出願先：日米欧中韓WO、出願年(優先権主張年)：2010年～2021 年) を基に作成

参考：金融ソフトウェア分野における特許動向　日経Fintech Camp FinTech Camp 量子コンピューターの最新動向（前編） - レッスン3 各国の政策、特許の動向, 2024

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

量子ゲート方式の活用動向

- **金融、化学、情報、製造を中心に、**幅広い領域で継続的に進められている。
- 現状、**机上・理論検証の段階に留まっており、実証実験や実務利用のレベルには到達していない。**

	机上・理論検証	(小規模な問題を解く)	実証実験	業務活用
金融	1 **オプション価格の決定 (JPモルガン、IBM)** 2 **改良した量子振幅推定による数値計算 (慶大、IBM、MUFG、みずほFG)**	• 振幅符号化アルゴリズムの応用 (慶大、IBM、みずほFG、MUFG、SONY、三井住友信託) • HHLによるポートフォリオ最適化 (JPモルガン) • インデックス・トラッキングへの応用 (BBVA)	該当なし	
化学	3 **材料表面上の化学反応モデリング (IBM)** • 変分量子固有値ソルバーによるエネルギー計算 (エクソンモービル、IBM) • リチウム空気電池の化学反応エネルギーの計算 (三菱ケミカル)	• VQEアルゴリズムによる熱力学特性の計算(エクソンモービル、IBM) • 有機EL発光材料の励起状態エネルギー計算 (三菱ケミカル、IBM、慶大、JSR) • 状態平均軌道最適化VQEによる光化学反応解析 (QunaSys、阪大)	該当なし	
情報	• 抽出型の文章要約 (JPモルガン) • 量子回路による二分決定木の表現 (フラウンホーファー、BASF) • 自己教師あり量子機械学習による画像分類 (オックスフォード大)	4 **量子機械学習による時系列予測 (バークレイズ証券)** • 量子ベイジアンネットワークの性能評価 (ウィチタ州立大、ボーイング)	該当なし	
製造	5 **車両の塗装工程最適化(バージニア大、GM)** • VQEアルゴリズムによる自動車材料の検討 (トヨタ、QunaSys)	6 **量子ニューラルネットワークによる自動車画像の分類 (ライデン大、フォルクスワーゲン)**	該当なし	

出所：日本総研 間瀬英之/身野良寛, 量子コンピュータまるわかり (日経文庫), 日経BP 日本経済新聞出版, 2023, p.184-185 を基に作成

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

量子ゲート方式｜取り組み事例 (金融)

- **QAE (モンテカルロ計算を高速化する量子アルゴリズム)** は、オプション価格の決定などの金融計算の高速化への活用が期待される。
- QAEはFTQC (誤り訂正あり) を想定したアルゴリズムであるため、**現在はNISQ (誤り訂正なし) で動作させるための改良版のアルゴリズム研究が活発。**ただし、**現時点で実務的に価値のある計算は実現していない。**

①オプション価格の決定 (JPモルガン、IBM)

概要

机上・理論検証

- QAE (量子振幅推定) によるオプション価格の計算の高速化を実証。

背景

- オプション価格の決定のために、モンテカルロシミュレーションが使われているが、計算量が大きい点が課題。

取り組みと結果

- IBM社の量子コンピュータ実機上で11量子ビットを使用。
- ヨーロピアンオプションの計算にて、古典のモンテカルロシミュレーションに対し、二乗加速できる可能性があることを実証。
- 理論的には古典で100万回の反復が必要な計算を1,000回の反復に削減。

出所： Option Pricing using Quantum Computers (https://arxiv.org/abs/1905.02666)

参考： 日経Fintech Camp FinTech Camp 量子コンピューターの最新動向（後編） - レッスン4 量子コンピューターの活用動向（量子ゲート方式）, 2024

②改良した量子振幅推定による数値計算 (みずほFG、MUFGなど)

概要

机上・理論検証

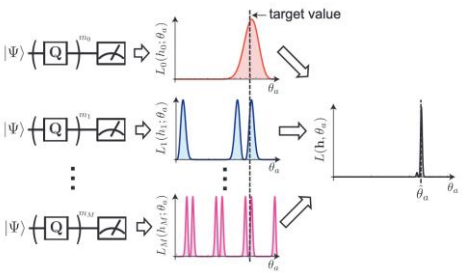
- QPE (量子位相推定) を古典コンピュータによる最尤推定に置換えて実証。

背景

- QAE を FTQC ではなく NISQ デバイスで動作させたい。
- QAE のサブルーチンに QPE があり、それが NISQ での動作を困難にする一因となっている。

取り組みと結果

- QAE で振幅増幅を行った後の結果を繰り返し測定する。
- 得られた値を使って、古典的な最尤推定法を行うことで QPE を使わずに振幅の値を推定する。



量子で計算　　古典で計算

出所： Amplitude estimation without phase estimation (https://arxiv.org/abs/1904.10246v2)

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

量子ゲート方式｜取り組み事例 (化学、情報)

- (化学) 大いに活用が期待される領域だが、**現在の量子コンピュータでは、大きく複雑な系を扱うことが困難。**
- (情報) **AIのモデル性能(分類・予測精度など)の向上**のために、量子コンピュータを活用する取り組みが進む。

③材料表面上の化学反応モデリング (IBM)

概要

机上・理論検証

- 材料表面上の化学反応モデリングの量子計算におけるワークフローを紹介。例として、マグネシウム表面上の水の解離に関する計算を行った。

背景

- 既存の量子コンピュータでは、化学反応計算を行いたい対象の系が大きく複雑であれば、計算が困難となる。
- 対象の大きな系を、より小さい系の問題に分割する手法の開発が重要となっている。

取り組みと結果

- IBMの 5～27 量子ビットの種々の実機を使って実験。
- VQE (分子の基底状態の探索する量子アルゴリズム) などを使って、マグネシウム材料表面上の水の解離反応について高精度なエネルギー計算ができた。

出所： Quantum Computation of Reactions on Surfaces Using Local Embedding (https://arxiv.org/abs/2203.07536)

④量子機械学習による時系列予測 (バークレイズ証券)

概要

机上・理論検証

- 量子機械学習 (QNN*1) と古典的な機械学習 (LSTM*2) を用いて、Apple社の株価とビットコイン価格の短期変動を予測した。

*1 量子ニューラルネットワーク(NN)の略。NNの重みが量子回路のパラメータに相当。
*2 Long Short Term Memoryの略。入力情報の一部を保持し、計算を行う。

背景

- QNN は学習を行うパラメータ数が少ないため、高速で効率的な時系列予測が可能。

取り組みと結果

- 過去の価格推移データを学習して将来の未知の価格を予測する実験を行ったところ、Apple社の株価とビットコインの価格について、LSTMとQNNで同程度の精度で予測ができることを示した。

出所： Quantum Machine Learning in Finance: Time Series Forecasting (https://arxiv.org/abs/2202.00599)

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

量子ゲート方式｜取り組み事例 (製造)

- 特に、**自動車関連の業界で先行。**部品の選択や工場従業員の勤務シフト作成など、**生産工場のコストを削減する最適化問題**への取り組みが多く見られる。なお、この領域は**量子アニーリング方式が先行**している。

⑤車両の塗装工程最適化 (バージニア大、GM)

概要

机上・理論検証

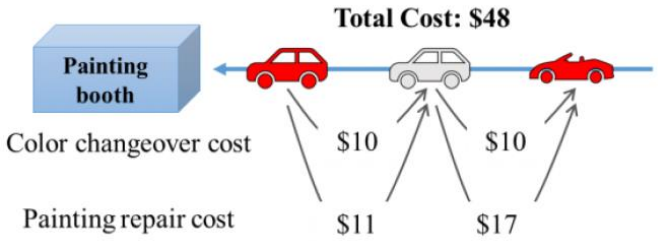
- 車両の塗装工程において、作業を行う車両の順番を最適化することによって、コストや塗装不良を減らす。

背景

- 車両の塗装ラインにおいて、車種間の色の違いによって塗料の変更コストが生じる。さらに、車両の順番によっても塗装不良の確率が変動する。

取り組みと結果

- 塗料の変更コストと塗料不良の確率を評価関数として定義して、QAOA (量子近似最適化ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑ) によって最適な解を算出。
- IBMの実機にて、9量子ビットを使用して、デモとして図のような3つの車両の順番の最適化を行った。



出所： Paint shop vehicle sequencing based on quantum computing considering color changeover and painting quality (https://arxiv.org/abs/2206.11204)

⑥量子ﾆｭｰﾗﾙﾈｯﾄﾜｰｸによる自動車画像の分類(フォルクスワーゲン等)

概要

机上・理論検証

- 自動車が写っている画像を見て車種を判定する量子機械学習のハイパーパラメータを最適化する手法を提案。

背景

- 画像認識のアルゴリズムには、ハイパーパラメータの調整に多くの計算リソースと作業を要する場合がある。

取り組みと結果

- テンソルネットワークを応用することで、ハイパーパラメータの探索空間を圧縮。
- 自動車画像から車種を判別する機械学習モデルとして、量子古典ハイブリッドな機械学習 (ニューラルネットワーク) を採用。
- これらを組み合わせることで、従来の探索手法と比べて同程度の精度で高速化を実現。

出所： Hyperparameter optimization of hybrid quantum neural networks for car classification (https://arxiv.org/abs/2205.04878)

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

量子アニーリング方式の活用動向

- 量子ゲート方式とは異なり、量子アニーリング方式は**実務活用を見据えた取り組みも存在。**ただし、**古典コンピュータ対比で量子アニーリングを利用するメリットは少なく、業務活用事例は限定的。**

	机上・理論検証	実証実験	業務活用
金融		・ﾘﾊﾞｰｽｽﾄﾚｽﾃｽﾄ (HSBC)　・ﾎﾟｰﾄﾌｫﾘｵ最適化 (1QBit、NatWestなど) ・株式のﾎﾟｼﾞｼｮﾝ予想 (野村ｱｾｯﾄﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ、東北大) ・資産価値の変動予測 (上海大など) ・不正取引検知 (SMBCｸﾞﾙｰﾌﾟ、日本総研、NEC) 1 **・債券ｱｰﾋﾞﾄﾗｰｼﾞの最適化 (1QBit)**	該当なし
化学	2 **・材料設計パラメータの調整 (東大、早稲田大、NIMS)** ・分子の構造類似度算出 (富士通)	・複合ポリマーの安定構造探索 (慶大、フィックスターズ、早稲田大)	該当なし
情報	・時系列データのクラスタリング (フォルクスワーゲン、ライデン大) ・探索アルゴリズム (ロッキードマーティン)	・非負二値行列分解 (ロスラモス国立研究所、NTTデータ、お茶の水女子大など)	3 **・テレビCMの配信最適化 (リクルート)**
製造/流通	・自動車塗装工程の順序最適化 (フォルクスワーゲン、ライデン大)	・交通最適化 (フォルクスワーゲン、D-Wave) ・フォトニック結晶レーザーの構造最適化 (京大、慶大、早稲田大) 4 **・航空貨物の配置最適化 (エアバス、REPLY)**	・人員配置最適化 (住友商事、日立、グルーブノーツなど)

出所：日本総研 間瀬英之/身野良寛, 量子コンピュータまるわかり (日経文庫), 日経BP 日本経済新聞出版, 2023, p.219 を基に作成

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

量子アニーリング方式｜取り組み事例(金融、化学)

- (金融) **ポートフォリオ最適化や株価などの資産価格の予測**などの取り組みが行われている。
- (化学) 実験コストの削減などを目的に、**材料設計や新素材の探索**などの取り組みが行われている。

①債券アービトラージの最適化 (1QBit)

概要

実証実験

- 各種通貨の外国為替相場が定まっているとき、一時的に生じた通貨間の価格差を発見して収益を得ようとする取引(=ｱｰﾋﾞﾄﾗｰｼﾞ)に応用。

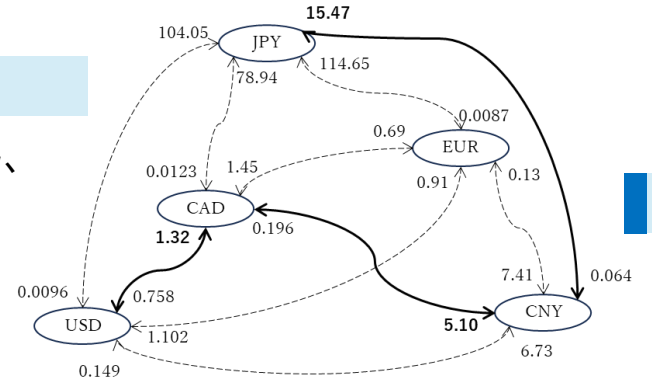
背景

- アービトラージによって収益を得るには、通貨間の価格差を素早く計算する必要がある。

取り組みと結果

- 選択しうる経路の条件を定式化し、量子アニーリングを用いて、最適な為替ルートを算出する (手数料などは無視)。

※通貨名を経由地、為替レートを距離に置き換えると、最短経路算出問題になる。



USD→JPYの直接変換　104.05 ¥/$
USD→CAD→CNY→JPYを経由する変換
1.32 x 5.10 x 15.47 = 104.14 ¥/$

出所： https://1qbit.com/whitepaper/arbitrage/

参考： 日経Fintech Camp FinTech Camp 量子コンピューターの最新動向（後編） - レッスン5 量子コンピューターの活用動向（量子アニーリング方式）, 2024

②材料設計パラメータの調整 (東大、早稲田大、NIMS)

概要

机上・理論検証

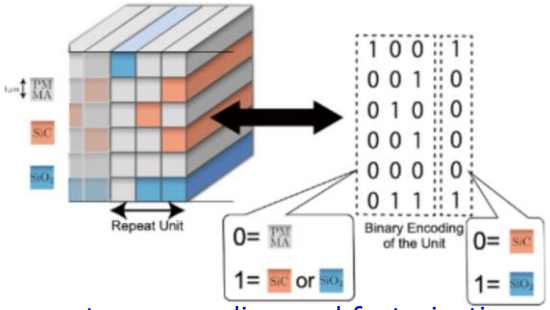
- Rigorous Coupled-wave Analysis (RCWA) と呼ばれる電磁場解析手法によって計算される熱放射特性について、ブラックボックス最適化の手法で最適な材料構造を探索する。

背景

- 近年、材料設計で考慮すべきパラメータ数が増大している。
- 一般に材料の特性を実験で検証する作業は時間、費用ともに膨大になるため、計算機によるシミュレーションによって効率化したい。

取り組みと結果

- 材料構造をバイナリ変数 (0/1) で表現 (右図)。
- 従来手法よりも少ないサンプル数 (≒実験回数) で良い評価結果が得られた。



出所：Koki Kitai, Designing metamaterials with quantum annealing and factorization machines, Phys. Rev. Research, 2020

© The Japan Research Institute, Limited

量子アニーリング方式｜取り組み事例(情報、製造/流通)

- (情報) 組み合わせ最適化問題として定式化された**人員配置化の取り組みが多く、実務に近い取り組み。**
- (製造/流通) 渋滞を軽減するための経路選択やカーシェア配置などの**交通課題に対する取り組み**が進む。

③テレビCMの配信最適化 (リクルート)

概要

業務活用

- テレビCMをどの放送局のどの時間帯に放送すればよいかを求める問題。
- N-all-reach (全てのCMをN回以上見るサンプル視聴者数) を最大化するように定式化。

背景

- テレビCMの各放送枠について、サンプル視聴者がCMを見る確率は既知である。

放送局	時間枠			…		
A局				…		
B局				…		
C局				…		

濃い青色の放送枠を見る確率が高く、薄い青色は低い。

取り組みと結果

- D-Wave社の量子古典ハイブリッドソルバーを使い、最大500人規模の視聴者に対して最適化問題を解き、古典ソルバーより高いN-all-reachを得た。

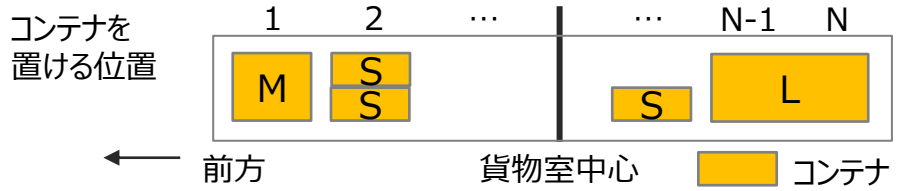
出所：TV Commercials Allocation for Frequency Optimization: Recruit (Qubits 2023)

④航空貨物の最適配置 (エアバス, REPLY)

概要

実証実験

- 航空機に貨物コンテナを最も多く積載するために最適な配置を探索する問題で、エアバス社よりコンペ形式で出題。
- 重心位置等の制約(≒極端な偏りがないこと)を満たしながら、L/M/S 3種類のコンテナを配置する、実践的な問題。



背景

- 制約条件が非常に多い最適化を解くことは一般に困難で、量子が航空機産業にもたらす新たな可能性を評価したい。

取り組みと結果

- コンテナの数:35個、配置の位置:20箇所で良い解が得られたが、量子ビット数が足りず、小規模な問題しか解けていない。

出所：Aircraft Loading Optimization -- QUBO models under multiple constraints (https://arxiv.org/abs/2102.09621)

© The Japan Research Institute, Limited

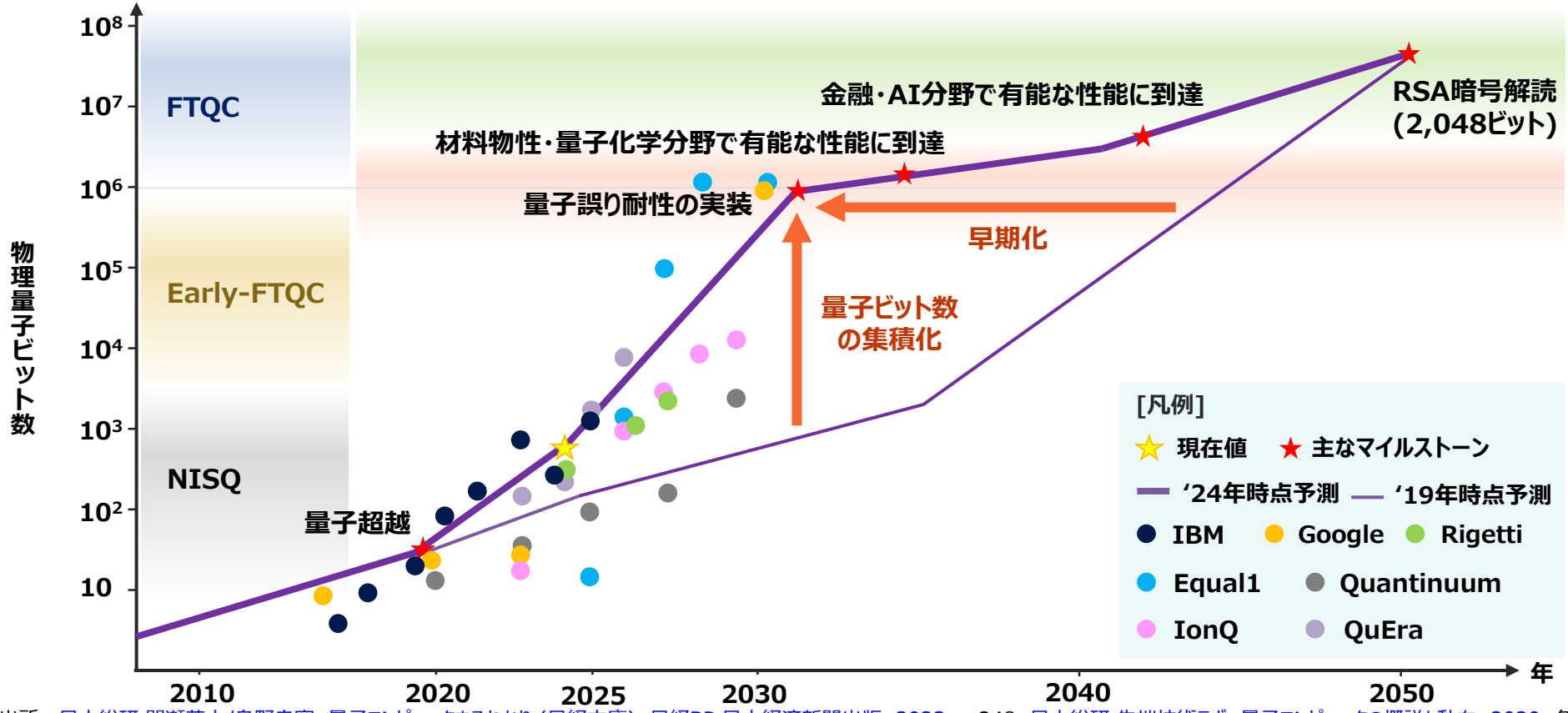
日本総研 The Japan Research Institute, Limited

量子コンピュータのロードマップ

- 現在は、物理量子ビット数が1,000程度の小規模な NISQ が実現した段階。**2030年頃の FTQC 実現には少なくとも100万 (=10^6) 物理量子ビットが必要で、その前に Early-FTQC*1 という段階を経由する。**

*1 FTQCへの移行の初期段階の量子コンピュータのこと。明確な定義はないが、NISQよりも大きい 1万程度の物理量子ビットを実装し、部分的にエラー訂正する機能を持つ量子コンピュータを指す。

- 材料物性・量子化学分野で活用が先行。金融・AI分野のビジネスの実課題を解くためには、**量子ビット数や誤り訂正性能、演算速度の一層の向上、物理量子ビットの誤り率の低下が必要となる。**



出所：日本総研 間瀬英之/身野良寛, 量子コンピュータまるわかり (日経文庫), 日経BP 日本経済新聞出版, 2023, p.248, 日本総研 先端技術ラボ, 量子コンピュータの概説と動向, 2020, 各社ロードマップ, 富士通プレスリリース, 数万量子ビットの量子コンピュータでも、現行コンピュータを超える速度で実用アルゴリズムを実行する方法を確立, 2024 などを参考に日本総研作成

© The Japan Research Institute, Limited

(参考) Shorのアルゴリズムに関する見解

- セキュリティの分野では、**Shorのアルゴリズム (RSA暗号を解読する量子アルゴリズム) によって、既存の暗号がいつ危殆化するのかが注目**されており、この予測に関連する研究が複数行われている。
- いずれの研究でも、2030年頃に期待される誤り訂正可能な量子コンピュータでは未だ暗号は危殆化せず、さらなるスケールアップが必要と想定されている。

暗号解読に必要なリソースの見積もり (Googleなど)

- 2,048ビットのRSA暗号の解読ができる規模で、Shorのアルゴリズムを動作させるために必要なハードウェアのリソースが見積られている (下図)。

論理量子ビット数	**14,000**
物理量子ビット数	**2,300万**
Toffoli + T ゲート数	**27億**

出所：Craig Gidney and Martin Eker, How to factor 2048 bit RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits. Quantum 5, 2021, page 433

量子シミュレータによるRSA暗号の安全性評価 (富士通)

- 2023年1月に、富士通は自社開発した39量子ビットの量子コンピュータシミュレータ (以下、量子シミュレータ) を活用し、現在普及している2,048ビットのRSA暗号の安全性を評価。
- Shorのアルゴリズムを量子シミュレータ上に実装し、必要なリソースを定量的に評価した結果、2,048ビットのRSA暗号の解読には、約10,000論理量子ビットと、10^{12}～10^{14}(約2兆2,300億) の量子ゲートもの膨大な規模を有する誤り耐性型の量子コンピュータが必要なことが判明。
- これは、試算すると約104日の間、量子ビットを誤りなく保持する必要があり、現状、このような大規模かつ長時間にわたり安定稼働する量子コンピュータの実現は短期的には困難である。

出所：富士通プレスリリース, 量子シミュレータを活用したRSA暗号の安全性評価に成功, 2023

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

技術進化の方向性とアクションプラン

- 前回レポートでは2027年過ぎから実用化が始まると予測していたが、**本執筆時点で2030年以降に後退。**
- 中長期的にも実用化の目途が不透明なため、**収益化を期待せず、未来の技術のための先行投資を始める。**

		技術進化の方向性	ユーザ企業のアクションプラン（例）
技術動向	ハードウェア実現方式	✓ 超伝導とイオントラップ方式を中心に技術が進展する。超伝導方式は、大規模化が進み、数千の物理量子ビットを搭載した量子コンピュータが登場する。 ✓ 他方式(中性原子、光、半導体など)も注目され、基礎技術の研究開発が進む。	✓ 現時点で、どれが本命か判断は難しい。 ✓ 超伝導方式だけでなく、量子ビットの品質に優れるイオン方式や常温動作の光方式などの動向も注視する。
	量子誤り訂正・低減	✓ 企業、大学、研究機関が量子誤り訂正・低減技術に資金・人材を投資し始め、基礎研究開発が進展する。 ✓ 実機での実装が容易な表面符号方式での実証実験が進む。	✓ 生成AIなどの古典コンピュータの発展が継続していることから、量子誤り訂正技術の最新動向を把握しつつも、大きな進展がない限りは古典コンピュータの利活用に注力する方針で問題ない。
	クラウドプラットフォーム/SDK	✓ 生成AIによるコーディング支援ツール進展の恩恵も受け、量子クラウドサービスを中心に、非量子分野の関係者も量子コンピュータに触れ、利用が広まる。 ✓ 領域特化、非ハードウェア依存、互換性に優れたSDK開発が進む。大手クラウド企業が提供するSDKを中心に、次第に淘汰される。	✓ 当面はクラウドの利用料が高額であるが、様々なハードウェアとSDKを体験しておく。
	量子アルゴリズム	✓ 材料物性・量子化学分野を中心に、将来を見据えて、NISQだけでなく、FTQCアルゴリズムの研究論文発表、取り組みが増える。	✓ 代表的な量子アルゴリズムをハンズオン形式で習得する。 ✓ 量子アルゴリズムの調査を行い、正しい知識を踏まえて活用の可能性を議論する。
	量子アニーリング	✓ 古典コンピュータを併用することで、現行の量子アニーリング実機では解けなかった大規模問題が解けるようになる。 ✓ 材料、化学分野を中心に、既存の機械学習手法の一部に、量子アニーリングを活用するブラックボックス最適化の活用が進む。	✓ 量子アニーリングが適した用途は見出されていないため、自社のビジネス戦略上の優先順位を踏まえて、取り組むかどうか検討する。
	量子インスパイア	✓ 機械学習向けを中心に、テンソルネットワーク用途の探索が活発化。 ✓ 専用ハードウェアを用いた疑似アニーリングについては緩やかな成長に留まる。	✓ テンソルネットワークについては古典コンピュータにおける新しいアルゴリズムと捉え、取り組みの要否を検討する。

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

量子コンピュータ業界の展望とアクションプラン

- テストベッド構築、サプライチェーン構築、国際協力、スタートアップ支援などの**量子エコシステムの構築**が進む。
- **自社に適した量子エコシステムを見つけ、量子アルゴリズムを実装できる高度専門人材を一定数育成する。**

		業界の展望	ユーザ企業のアクションプラン (例)
市場動向	政策動向	✓ 米中、EU、日本以外の国も巨額の投資を行い、技術進化が加速する。 ✓ 研究開発に加えて、社会実装に向けた産官学連携の支援やテストベッド構築、スタートアップ企業育成の助成金、量子教育コンテンツの作成、強固なサプライチェーン構築に向けて予算が投じられ、グローバリゼーションが進む。	✓ 産官学コンソーシアムなどを活かし、大学・研究機関やスタートアップ等と共同研究を実施する。 ✓ 量子教育コンテンツを活用し、中長期的に量子ソフトウェアの技術を習得していく。
	市場動向	✓ 意義のある結果、進展がなければ、量子コンピュータに対する投資がより慎重になる。一部の量子コンピュータ関連企業では、大きな成果が出ずに、資金調達や収益化に苦労する。 ✓ 積極的に実証実験に取り組む企業と静観姿勢の企業で、戦略が分かれる。	✓ 有力なプレイヤー(量子スタートアップなど)を見極め、将来の協業可能性を探る。 ✓ 自社に適したユースケースを持ち込んで、学術的なプロジェクトに参画する。
	特許動向	✓ 防衛などを目的に、米国、中国の大手企業、大学・研究機関を中心に、様々なハードウェア実現方式と、量子アルゴリズムに関する特許申請が増加する。	✓ 量子アルゴリズムやソフトウェアなどの特許動向について調査する。併せて、自社のビジネスに関連する業界の動向も注視する。
活用動向	量子ゲート	✓ 金融、化学、情報、製造を中心に、量子コンピュータ関連企業と大手ユーザ企業が連携し、ユースケースの特定、量子アルゴリズムの新規開発・改良が広がる。 ✓ 限定的なユースケースにおいて、量子優位性実現に向けた現実的なロードマップが示される。	✓ 自社業務に活かせそうなアルゴリズムを特定し、その研究動向を理解する。 ✓ 将来、出遅れることがないように、人材育成と研究活動に継続的に投資する。少数規模の量子コンピュータ組織を構築し、戦略的に取り組む。
	量子アニーリング	✓ 最適化を中心に、金融、化学などの領域で実業務適用の事例が増加する。(ただし量子優位性は不透明) ✓ 古典コンピュータと併用し、大規模問題が解けるようになる。	✓ 金融工学等の最適化問題について、組み合わせ最適化問題のアプローチで取り組むことに価値はある。 ✓ ただし、量子優位性は実証されていないため、古典的アプローチと比較して取り組みやすい方式を選択する。

© The Japan Research Institute, Limited

Appendix

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

QFT (量子フーリエ変換) の概要

- 量子フーリエ変換 (Quantum Fourier Transform)*1は、離散フーリエ変換を量子コンピュータ上で実施するためのアルゴリズム。
- 古典コンピュータにおける離散フーリエ変換よりも計算量理論の上では高速に計算ができ、様々な量子アルゴリズムのサブルーチンとして活用。量子アルゴリズムの高速性は、この量子フーリエ変換の高速性に拠るものも多い。

QFT とは？

[概要]

- 量子フーリエ変換は、離散フーリエ変換を量子コンピュータ上で行うアルゴリズムであり、古典コンピュータよりも高速に計算が行えるとされている。

[用途]

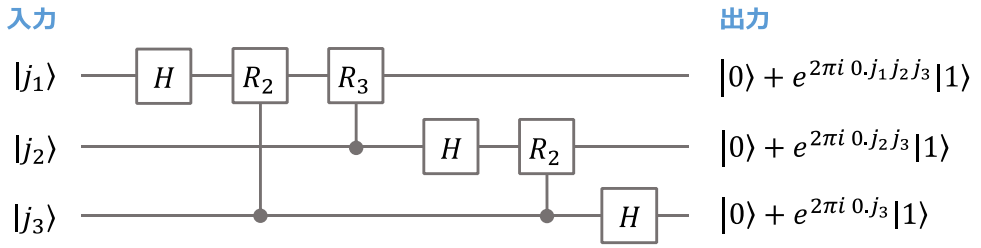
- フーリエ変換は、信号処理や画像処理など、様々な分野で活用されている技術である。
- ただし、入力の状態を用意する難しさや、測定にかかるコストを考えると、汎用的にフーリエ変換の代わりに用いることは難しく、基本的には量子アルゴリズムのサブルーチンとして、用いられることになる。

[技術課題]

- 量子ビット数の増加に応じて、回路が非常に深くなること、微小角の回転ゲートの実装を要求されることなどから、現在のNISQデバイスでの実行は難しいとされている。

アルゴリズムの詳細

- 3量子ビットでの量子フーリエ変換の回路の実装例を以下に示す。
- すなわち、2^3個の数値配列を入力に、その離散フーリエ変換の配列を求める。



ただし、

$$R_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp\left(\frac{2\pi i}{2^k}\right) \end{bmatrix}$$

*1 D. Coppersmith, “An Approximate Fourier Transform useful in Quantum Factoring.” IBM Research Report RC19642, arXiv:quant-ph/0201067

© The Japan Research Institute, Limited

Shor のアルゴリズムの概要

- Shor のアルゴリズム[*1]は、因数分解を古典コンピュータよりも高速に実行できるアルゴリズム。
- RSA暗号は、素因数分解の計算困難性を安全性の根拠とした暗号方式であり、このような暗号を高速に解くことができる可能性があるとして注目されている。

Shor のアルゴリズムとは？

[概要]

- Shorのアルゴリズムは、因数分解そのものを解くアルゴリズムではなく、位数発見問題を解くアルゴリズム。因数分解の計算困難性は位数発見問題に帰着することができるため、このアルゴリズムが活用できる。
  - 位数発見問題：
    自然数a, Nが与えられた際に、$a^r \equiv 1 (\mathrm{mod}\ N)$を
    満たす最小の自然数r(=位数)を見つける問題
  - (例)$a = 2, N = 15$のとき
    $2 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 1$となるので、$r = 4$

[用途]

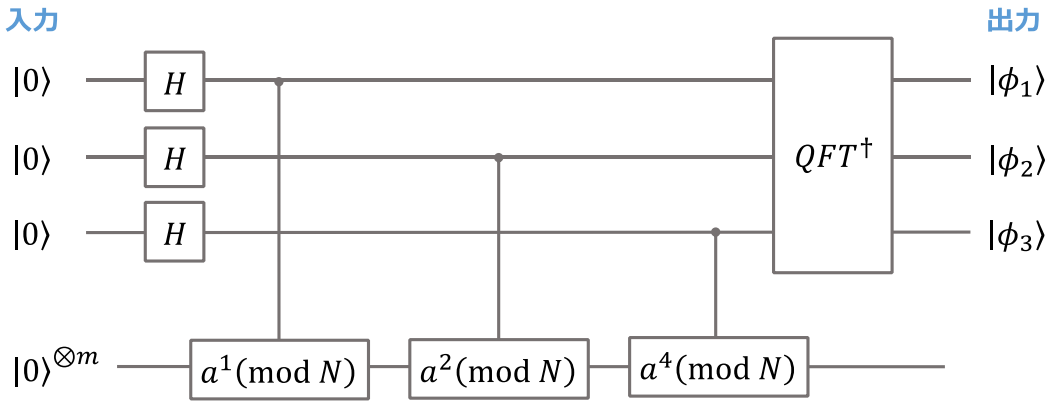
- RSA暗号などが多項式時間で解ける可能性がある。

[技術課題]

- 計算の内部で逆量子フーリエ変換を活用しており、現在のNISQデバイスでの計算は困難。
- 執筆時点では、$N = 15,21$程度の素因数分解が限界である[*2]。

アルゴリズムの詳細

- 以下のような量子回路を用いて、周波数成分を取り出す。



- 得られた周波数の情報から周期 (＝位数)を計算する部分は古典的な計算で十分高速に行うことが可能。

*1 Peter W. Shor, “Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring.” Proceedings 35th annual symposium on foundations of computer science. IEEE. 1994.
*2 高安敦. Shorのアルゴリズム実装動向調査. CRYPTEC外部評価報告書(2021)

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

QPE (量子位相推定) の概要

- QPE (Quantum Phase Estimation) *1は、ユニタリ行列の固有値を求めるためのアルゴリズム。
- 量子化学計算に有用であり、他のアルゴリズムのサブルーチンとしても利用される重要なアルゴリズムである。

QPE とは？

[概要]

- ユニタリ行列は、数学的な特性として、その固有値が複素平面の単位円上に存在しており、$e^{i\phi}$の形で表現できる。
- QPEはユニタリ演算子Uと、対応する固有ベクトル$|\psi\rangle$が与えられている時、$U|\psi\rangle = e^{i\phi}|\psi\rangle$を満たす$\phi$を見つけることができる。

[用途]

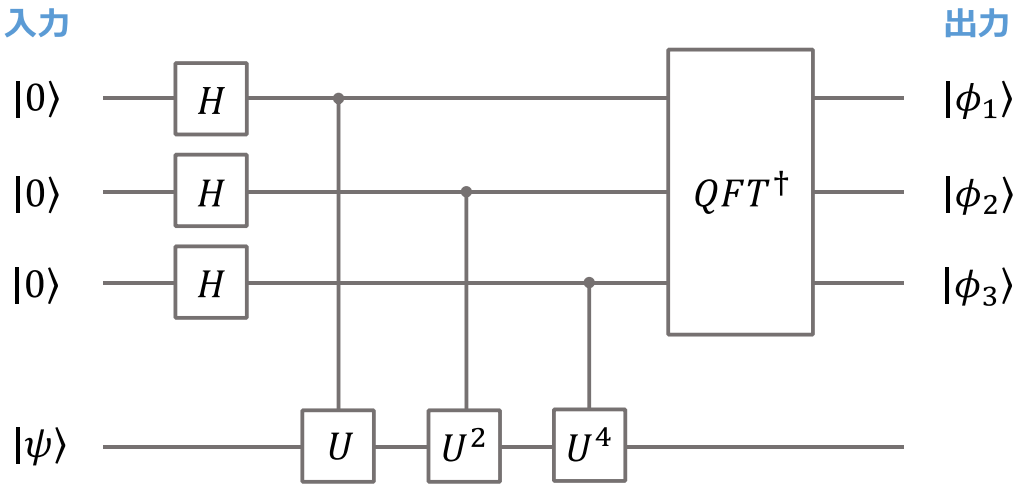
- 分子の基底状態の探索などの量子化学計算への応用*2が期待されている。また、他のアルゴリズム (QAE、HHL など) のサブルーチンとしても利用される。

[技術課題]

- アルゴリズムの内部では、逆量子フーリエ変換を用いており、現在のNISQデバイスでの実行は難しい。

アルゴリズムの詳細

- 3ビット精度での QPE の実装例を以下に示す。
- この回路を実行することで、ϕの近似値として、$\phi = 2\pi \times 0.\phi_1\phi_2\phi_3$となる値が高い確率で出力される。



*1 A. Yu. Kitaev, “Quantum measurements and the Abelian Stabilizer Problem.” arXiv preprint quantum-ph/9511026. 1995.
*2 Quantinuum NEWS, 量子化学、論理量子ビットを用いて誤り耐性の領域へと大きく前進, 2023

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

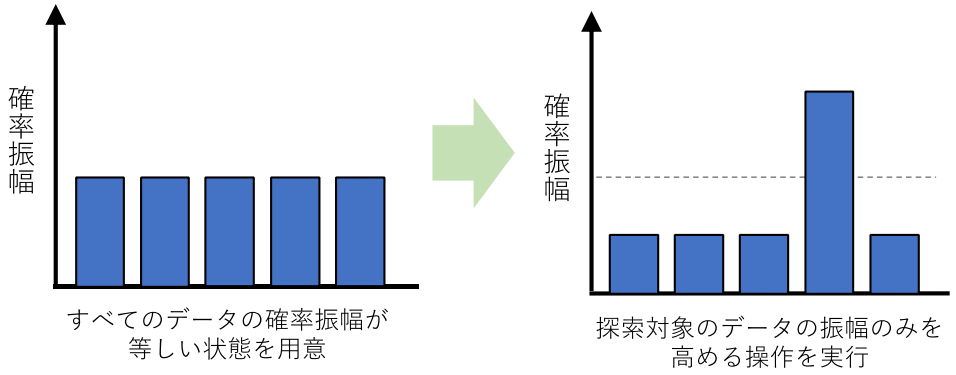
Grover のアルゴリズムの概要

- Grover のアルゴリズム*1は、特定の条件に合致するデータを探索するためのアルゴリズム。
- データ数Nに対し、$O(\sqrt{N})$の時間で探索できるため、古典コンピュータにおける線形探索よりも高速に探索が可能。

Grover のアルゴリズムとは？

[概要]

- データセットの中から、探索したいデータがサンプリングされる確率を高めるような操作を実行することで、目的のデータを探索する。
- このアルゴリズムは確率的アルゴリズムであり、多くの場合、目的のデータ以外のデータが出現する確率は0にはならない。



[用途]

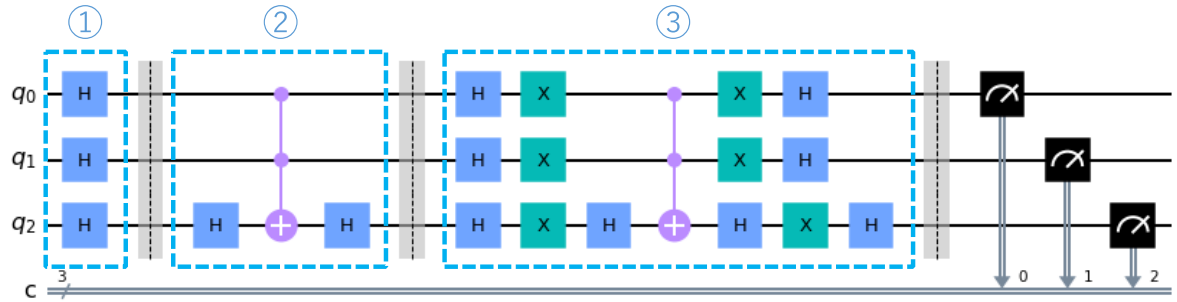
- 全探索が要求されるような課題において、高速化が期待される。

[技術課題]

- データ数の増加に応じて、必要な増幅操作の数が増え、回路が非常に深くなるため、NISQデバイスでの実行は難しいとされている。

アルゴリズムの詳細

- 条件に合うデータをうまくマークできるような回路と、その部分の振幅を増幅できるような回路を組み合わせることで実装される。



1. すべてのデータの確率振幅が等しい状態を用意する。
2. 探索対象のデータの位相を反転させる。
3. 探索対象のデータの振幅のみを高める。
4. 十分に確率が高くなるまで2. ～ 3.を繰り返す。

*1 Lov K. Grover, “A fast quantum mechanical algorithm for database search.” Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of computing, 1996

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

QAA (量子振幅増幅) の概要

- QAA (Quantum Amplitude Amplification) *1は、特定の量子状態の振幅を増幅させるアルゴリズム。
- Groverのアルゴリズムにおける振幅増幅の操作をより一般化したアルゴリズムであり、任意の状態から目的の状態の振幅を増幅させることができる。

QAA とは？

[概要]

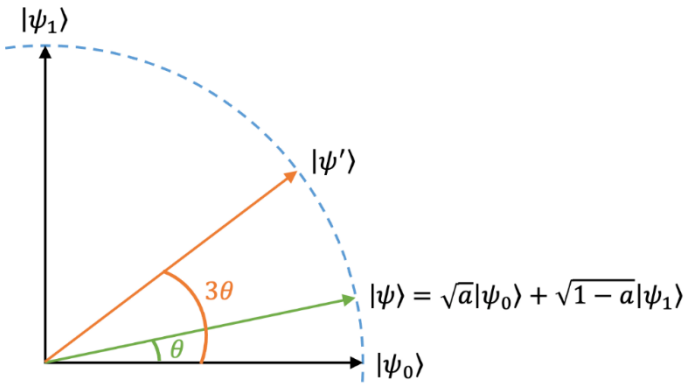
- ある状態$|\psi\rangle = \sqrt{a}|\psi_0\rangle + \sqrt{1-a}|\psi_1\rangle$が与えられたとき、増幅したい状態$|\psi_1\rangle$の振幅を大きくするアルゴリズム。

[用途]

- Groverと同様に、探索に使える可能性がある他、QAEなどのアルゴリズムのサブルーチンとして活用される。

[技術課題]

- 増幅を繰り返す必要があるため、回路が深くなりやすく、現在のNISQデバイスでの実行は困難。



アルゴリズムの詳細

- $|\psi\rangle$は$|\psi_0\rangle$と$|\psi_1\rangle$を軸とする単位円上の点として表現することができ、$\sqrt{a} = \cos\theta$とおくと、m回増幅を繰り返すことで、$\sin\big((2m+1)\theta\big)$に振幅を増幅できる。
- 1回の増幅は以下の2ステップで実装される。
  1. 初期状態$|\psi\rangle$を$|\psi_0\rangle$軸に関して反転させる。
  2. 得られた状態を元の状態$|\psi\rangle$に関して反転させる。
- 操作1は、$|\psi_1\rangle$の符号を反転させることに相当する。すなわち、以下を満たすΨ_0を設計すればよい。

$$\Psi_0|\psi_0\rangle = |\psi_0\rangle, \quad \Psi_0|\psi_1\rangle = -|\psi_1\rangle$$

- 操作2は、$|\psi\rangle$を作成できる回路Uができているのであれば、これを活用して作成可能。

$$\Psi = U\big(I - 2|0\rangle\langle 0|\big)U^{\dagger}$$

*1 Gilles Brassard, Peter Høyer. “An Exact Quantum Polynomial-Time Algorithm for Simon’s Problem.” Proceedings of the Fifth Israeli Symposium on Theory of Computing and Systems. IEEE, 1997.

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

QAE (量子振幅推定) の概要

- QAE (Quantum Amplitude Estimation) *1は、重ね合わせ状態にある量子に対して、特定の状態が観測される確率を求めるアルゴリズム。
- 金融分野での活用が期待されており、モンテカルロ法の高速化に寄与するとされている。

QAE とは？

[概要]

- 特定の量子状態の振幅を求めるアルゴリズム。
- 通常、量子回路に対して測定を繰り返すことで、確率を推定することが可能であるが、QAEを用いることで、より高い精度でこれを推定できる。

[用途]

- 金融分野では、これをモンテカルロ法へ活用することが期待されており、期待値計算の高速化ができるとされている。

[技術課題]

- QAEの内部ではQPEと呼ばれるアルゴリズムが用いられており、このアルゴリズムを実行する回路は巨大になる。そのため、NISQデバイスでの活用は難しいとされている。
- NISQデバイスでの活用に向けては、 MLQAE*2、Iterative QAE*3など、QPEを用いないような手法もいくつか提案されている。

アルゴリズムの詳細

- QAEはその計算の過程で、QAAとQPEを活用する。

1. 振幅を求めたい状態を作り出す回路を作成する。
2. 求めたい状態の振幅を増幅させる演算子Uを作成する。
   (詳細はQAAのページを参照)
3. 演算子Uの固有値をQPEによって求める。

演算子Uの固有値$e^{i2\theta}$をQPEで推定した後、$\sin\theta$を計算することで、目的の状態の振幅が計算できる。

*1 Gilles Brassard, et al. “Quantum amplitude amplification and estimation.” Contemporary Mathematics 305. pp.53-74. 2002.
*2 Yohichi Suzuki, et al. “Amplitude estimation without phase estimation.” Quantum Information Processing 19. pp.1-17. 2020.
*3 Dmitry Grinko, et al. “Iterative quantum amplitude estimation.” npj Quantum Information 7, 52. 2021.

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

HHL の概要

- HHL (Harrow-Hassidim-Lloyd) アルゴリズム*1は、連立一次方程式$Ax=b$を解くためのアルゴリズム。
- 係数行列Aが疎な場合に、理論上、古典コンピュータに比べて、計算部分の指数加速が達成される。

HHL とは？

[概要]

- HHLアルゴリズムは疎な連立一次方程式を高速に解くことができるアルゴリズム。

[用途]

- 連立一次方程式は、非常に基本的な計算の一種であり、信号処理や機械学習などにも活用されている。

[技術課題]

- HHLは連立一次方程式を古典コンピュータよりも高速に解くことができるとされているが、実用上は以下のような点に気を付ける必要がある。
  - 係数行列が疎でなければならない。
    (具体的には非ゼロ要素が$\mathrm{O}(\mathrm{poly}(\log N))$で抑えられる)
  - 一般に、与えられた問題を量子コンピュータ上に入力することや、HHLで得られた計算結果を読み出すことには$\mathrm{O}(N)$の時間がかかり、量子加速を打ち消してしまう。
- また、QPE (量子位相推定) などの複雑な計算を内部に含んでおり、現在のNISQデバイスでの計算は困難である。

アルゴリズムの詳細

- 基本的な考え方としては、$Ax = b$を解くために、
  $x = A^{-1}b$の計算を行うことが目的となる。
- 計算の過程としては以下の通りである。

1. 量子位相推定を用いて、係数行列Aの固有値λを求める。
2. 逆行列A^{-1}の固有値は$1/\lambda$になることが知られており、これを計算する。
3. ベクトルbを係数行列Aの固有ベクトルを基底として分解し、これに$1/\lambda$をかけた後、元の基底に戻す。

*1 Aram W. Harrow, Avinatan Hassidim, and Seth Lloyd. "Quantum algorithm for linear systems of equations." Physical Review Letters 103.150502. 2009.

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

VQE(変分量子固有値ソルバー) の概要

- VQE (Variational Quantum Eigensolver) *1は、物質科学や量子化学分野での活用が期待されているアルゴリズム。エルミート行列の最小固有値と、対応する固有ベクトルの近似解を求めることができる。
- 古典コンピュータと組み合わせて計算を行う、ハイブリッドアルゴリズムの一種であり、NISQデバイスでの活用が期待されている。

VQE とは？

[概要]

- 変分定理に基づいて、与えられたエルミート行列Hの最小固有値に対応する固有ベクトルを探索する。$\langle\psi|H|\psi\rangle$を最小化するような状態$|\psi\rangle$を見つけることができれば、これが求めたい固有ベクトルになる。
- パラメータ付き回路を用いて、状態$|\psi(\theta)\rangle$を作成し、$\langle\psi(\theta)|H|\psi(\theta)\rangle$がより小さくなるように、$\theta$を更新することを繰り返す。

[用途]

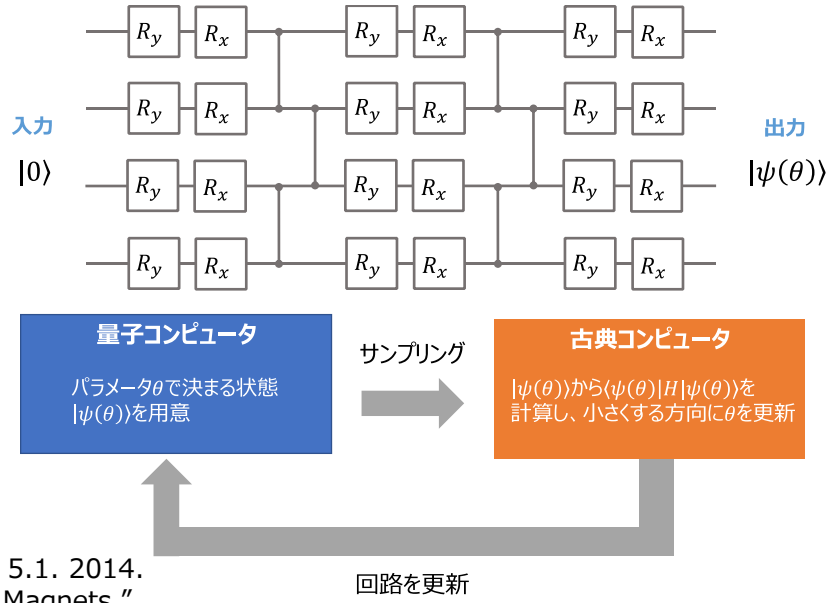
- 量子化学の分野での活用が期待されており、分子の基底状態の探索などに用いることができる。

[技術課題]

- 実験的には比較的小さい系であっても、実際の基底状態に辿り着かないといった結果も報告されている*2。十分な回路深さと、それに耐えうる低いエラー率が必要となることが想定される。また、パラメータ付き回路の設計方法も重要な要素である。

アルゴリズムの詳細

- パラメータ付き回路には、各量子ビットへ回転ゲートを適用した後、CNOTゲート等を用いてもつれ状態を作成する、という構造を何層にも連ねた形でよく用いられる。各回転ゲートの回転角が更新すべきパラメータに相当する。



*1 Alberto Peruzzo, et al. “A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor.” Nature Communications 5.1. 2014.
*2 Abhinav Kandala and et al, “Hardware-efficient Variational Quantum Eigensolver for Small Molecules and Quantum Magnets.” Nature 549.7671. pp.242-246. 2017.

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

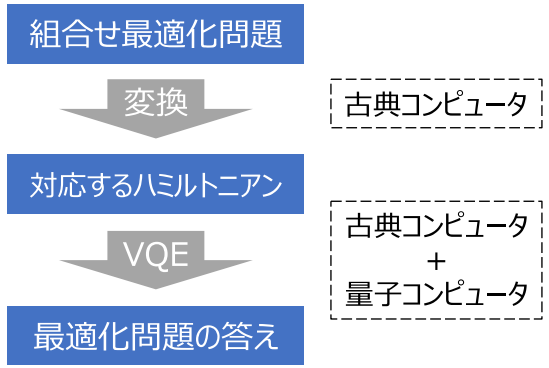
QAOA（量子近似最適化アルゴリズム）の概要

- QAOA (Quantum Approximate Optimization Algorithm) *1は、組み合わせ最適化問題に対する、量子ゲート方式を用いた近似最適化アルゴリズムの一種。
- 古典の近似最適化アルゴリズムと比較した際の、解の品質や速度面での優位性については、現時点では不明。

QAOA とは？

[概要]

- 組み合わせ最適化問題を、ハミルトニアンの最小固有値問題に対応づけて変換し、VQEと同様の手順で計算を行うことで近似解を求めるアルゴリズム。
- QAOAはVQEの一種とみなされることもある。



[用途]

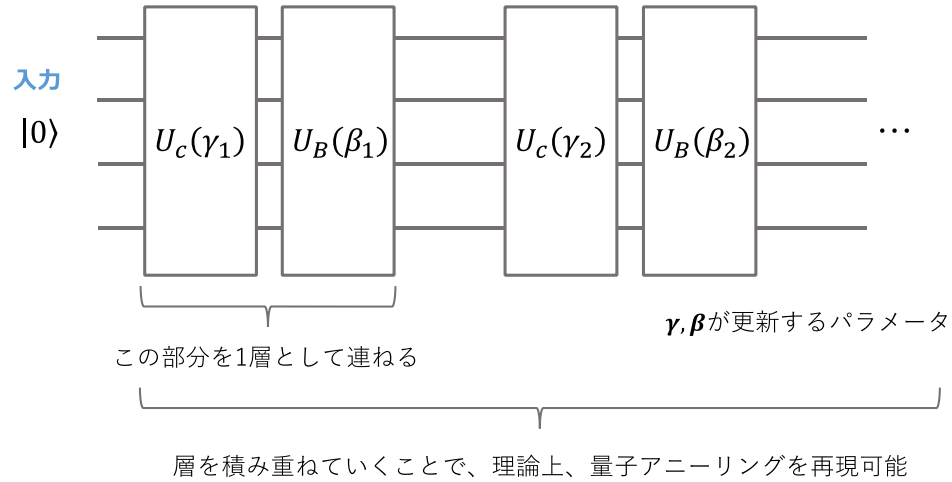
- シフトスケジューリング、経路探索など、組み合わせ最適化問題の形に帰着できる多くの問題へ活用できる可能性がある。

[技術課題]

- 古典の近似最適化アルゴリズムと比較した際の、解の品質や速度面での優位性については現時点では不明である。

アルゴリズムの詳細

- ハミルトニアンの最小固有値問題へと変換した後には、VQEと同様の手順で、最小固有値と対応する固有ベクトルを計算することで、最適化問題の答えを求める。
- 特に、QAOAの場合はパラメータ付き回路の部分にQAOA ansatzと呼ばれるパラメータ付き回路を用いることが多い。



*1 Edward Farhi, et al. “A Quantum Approximate Optimization Algorithm.” arXiv:1411.4028. 2014.

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

QSVM (量子サポート・ベクター・マシン) の概要

- QSVM [*1]は、機械学習手法の一種であるSVMを量子コンピュータに応用したもの。
- 教師ありの分類問題を解くことができる。

QSVM とは？

[概要]

- サポートベクトルマシンにおけるカーネル行列を、量子計算によって求める。
- 機械学習におけるカーネルの目的は、データを高次元の空間に埋め込むことで、分類をより容易にすることである。
- 量子状態が持つ指数関数的に大きな次元にデータを埋め込むことで、古典コンピュータでは不可能な高次元空間において分類を行う。

[用途]

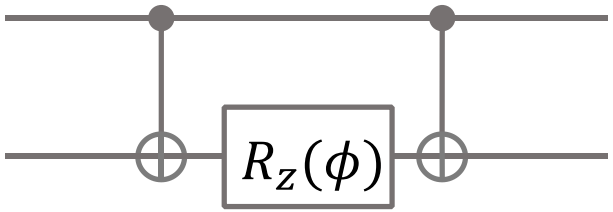
- 教師あり学習手法の一種であり、分類タスクに適用可能である。

[技術課題]

- 現時点では、QSVMでなければうまく分類ができないような実用的なケースが発見できておらず、実用的な優位性が示せていない。

アルゴリズムの詳細

- 特徴量マッピングの方法は様々提案されているが、現在のNISQデバイスでの活用という文脈では、古典コンピュータで再現することが難しいようなマッピングを行うことに焦点が置かれている。



- これにより、従来の古典コンピュータでは分類が難しかったようなケースで、量子SVMを用いることでうまく分類できるようなケースを見つけることが出来れば、量子SVMを活用するメリットが得られる。

*1 Vojtech Havlicek, et al. “Supervised learning with quantum enhanced feature spaces.” Nature 567.7748. 2018.

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

QGAN (量子敵対的生成ネットワーク) の概要

- QGAN *1は生成モデルの一種であるGAN (Generative adversarial network) の考え方を量子コンピュータに応用したもの。
- パラメータの計算部分は古典コンピュータを利用しており、古典量子ハイブリッドアルゴリズムの一種である。

QGAN とは？

[概要]

- GANにおける生成器、もしくは生成器と識別機の双方のニューラルネットワークを、パラメータ付きの量子回路に置き換えたもの。
- パラメータ更新部分の計算には古典コンピュータを用いる。
- 生成器を量子回路で構成することで、量子状態が持つ指数関数的に高次元な空間からサンプリング出来ることは、画像などの高次元データの生成に有利な可能性がある。

[用途]

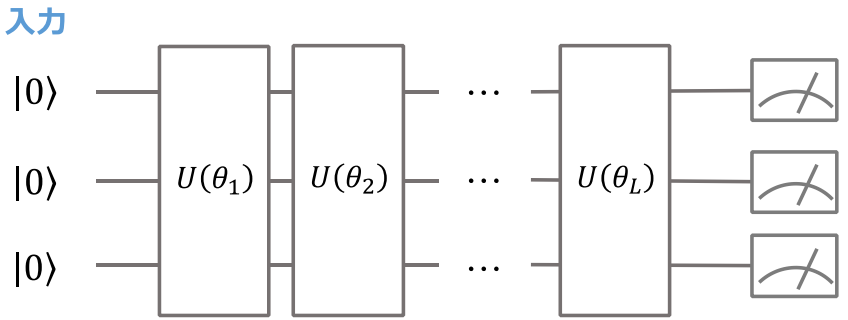
- 量子回路は測定プロセスを持つため、離散データの生成に強みを持つと考えられる。離散データの生成は古典GANにおいて勾配消失する課題が知られている。

[技術課題]

- 現在のNISQデバイスの量子ビット数はまだ少なく、現時点では高次元なデータの生成を行うことができない。

アルゴリズムの詳細

- 古典コンピュータにおけるニューラルネットのように、パラメータ付きの量子回路を何層にも連ねた構造をとる。
- 各層では、回転角をパラメータとして持つ回転ゲートなどを作用させる。



- 得られた出力結果から古典コンピュータ上で、損失関数の計算を行い、パラメータの更新値を決定する。

*1 Chrisa Zoufal, Aurelien Lucchi and Stefan Woerner. “Quantum Generative Adversarial Networks for learning and loading random distributions.” npj Quantum Informations 5.103. 2019.

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研
The Japan Research Institute, Limited

参考文献｜量子ゲート方式の活用動向

＜金融＞

- **オプション価格の決定（JPモルガン、IBM）**
  Nikitas Stamatopoulos and Daniel J. Egger and Yue Sun and Christa Zoufal and Raban Iten and Ning Shen and Stefan Woerner, Option Pricing using Quantum Computers, Quantum 4, 291 (2020)
- **改良した量子振幅推定による数値計算（慶大、IBM、MUFG、みずほFG）**
  Yohichi Suzuki and Shumpei Uno and Rudy Raymond and Tomoki Tanaka and Tamiya Onodera and Naoki Yamamoto, Amplitude estimation without phase estimation, Quantum Information Processing (2020)
- **振幅符号化アルゴリズムの応用（慶大、IBM、みずほFG、MUFG、SONY、三井住友信託）**
  Kouhei Nakaji and Shumpei Uno and Yohichi Suzuki and Rudy Raymond and Tamiya Onodera and Tomoki Tanaka and Hiroyuki Tezuka and Naoki Mitsuda and Naoki Yamamoto, Approximate amplitude encoding in shallow parameterized quantum circuits and its application to financial market indicators, Physical Review Research (2022)
- **HHLによるポートフォリオ最適化（JPモルガン）**
  Romina Yalovetzky and Pierre Minssen and Dylan Herman and Marco Pistoia, NISQ-HHL: Portfolio Optimization for Near-Term Quantum Hardware, arXiv2110.15958 (2021)
- **インデックス・トラッキングへの応用（BBVA）**
  Samuel Fernandez-Lorenzo and Diego Porras and Juan Jose Garcia-Ripoll, Hybrid quantum-classical optimization with cardinality constraints and applications to finance, Quantum Science and Technology 6-3-034010 (2021)

＜化学＞

- **材料表面上の化学反応モデリング（IBM）**
  Tanvi P. Gujarati, et al, Quantum Computation of Reactions on Surfaces Using Local Embedding, arXiv:2203.07536 (2022)
- **変分量子固有値ソルバーによるエネルギー計算（エクソンモービル、IBM）**
  Spencer T. Stober, Stuart M. Harwood, Dimitar Trenev, Panagiotis Kl. Barkoutsos, Tanvi P. Gujarati, and Sarah Mostame, Considerations for evaluating thermodynamic properties with hybrid quantum-classical computing work flows, Phys. Rev. A 105, 012425 (2022)
- **リチウム空気電池の化学反応エネルギーの計算（三菱ケミカル）**
  https://www.nikkei.com/article/DGKKZO66383170Z21C22A1XY0000/
- **VQEアルゴリズムによる熱力学特性の計算（エクソンモービル、IBM）**
  Spencer T. Stober, Stuart M. Harwood, Dimitar Trenev, Panagiotis Kl. Barkoutsos, Tanvi P. Gujarati, and Sarah Mostame, Considerations for evaluating thermodynamic properties with hybrid quantum-classical computing work flows, Phys. Rev. A 105, 012425 (2022)
- **有機EL発光材料の励起状態エネルギー計算（三菱ケミカル、IBM、慶大、JSR）**
  有機EL発光材料性能予測に関する研究成果がNature専門誌に掲載－量子コンピューター実機を用いた有機EL発光材料の励起状態計算に世界で初めて成功－, https://www.keio.ac.jp/ja/press-releases/2021/5/26/28-80161/

© The Japan Research Institute, Limited

参考文献｜量子ゲート方式の活用動向

＜化学(続き)＞

- **状態平均軌道最適化VQEによる光化学反応解析 （QunaSys、阪大）**
  Keita Omiya, Yuya O. Nakagawa, Sho Koh, Wataru Mizukami, Qi Gao, and Takao Kobayashi, Analytical Energy Gradient for State-Averaged Orbital-Optimized Variational Quantum Eigensolvers and Its Application to a Photochemical Reaction, Journal of Chemical Theory and Computation Vol 18 (2022)

＜情報＞

- **抽出型の文章要約 (JPモルガン)**
  Pradeep Niroula, Ruslan Shaydulin, Romina Yalovetzky, Pierre Minssen, Dylan Herman, Shaohan Hu, Marco Pistoia, Constrained Quantum Optimization for Extractive Summarization on a Trapped-ion Quantum Computer, Scientific Reports Vol.12-1 (2022)
- **量子回路による二分決定木の表現 （フラウンホーファー、BASF)**
  Songfeng Lu, Samuel L. Braunstein, Quantum decision tree classifier, Quantum Information Processing 13(3) (2014)
- **自己教師あり量子機械学習による画像分類 （オックスフォード大)**
  Ben Jaderberg, Lewis W. Anderson, Weidi Xie, Samuel Albanie, Martin Kiffner, Dieter Jaksch, Quantum Self-Supervised Learning, arXiv:2103.14653 (2021)
- **量子機械学習による時系列予測 （バークレイズ証券)**
  Dimitrios Emmanoulopoulos and Sofija Dimoska, Quantum Machine Learning in Finance: Time Series Forecasting, arXiv2202.00599 (2022)
  日本総研 身野 良寛. 量子ニューラルネットワークで時系列データ予測 #量子コンピュータ - Qiita
- **量子ベイジアンネットワークの性能評価 （ウィチタ州立大、ボーイング)**
  Sima E. Borujeni and Nam H. Nguyen and Saideep Nannapaneni and Elizabeth C. Behrman and James E. Steck, Experimental evaluation of quantum Bayesian networks on IBM QX hardware, arXiv2005.12474 (2020)

＜製造＞

- **車両の塗装工程最適化 （バージニア大学、ゼネラルモーターズ)**
  Jing Huang, Hua-Tzu Fan, Guoxian Xiao, Qing Chang, Paint shop vehicle sequencing based on quantum computing considering color changeover and painting quality, arXiv 2206.11204 (2022)
- **VQEアルゴリズムによる自動車材料の検討 （トヨタ、QunaSys)**
  菅 義訓、高 翔、芝宮 徹、楊 天任, 量子コンピューティングの自動車材料デザインへの適用可能性, 自動車技術会論文集 54 (1), 200-205 (2023)
- **量子ニューラルネットワークによる自動車画像の分類 （ライデン大、フォルクスワーゲン)**
  Asel Sagingalieva, Mo Kordzanganeh, Andrii Kurkin, Artem Melnikov, Daniil Kuhmistrov, Michael Perelshtein, Alexey Melnikov, Andrea Skolik, David Von Dollen, Hyperparameter optimization of hybrid quantum neural networks for car classification, arXiv 2205.04878 (2022)

© The Japan Research Institute, Limited

参考文献｜量子アニーリング方式の活用動向

＜金融＞

- **リバースストレステスト(HSBC)**
  Quantitative Reverse Stress Testing using Simulated and Quantum Annealing Applied to XVA, https://www.dwavesys.com/resources/application/quantitative-reverse-stress-testing-using-simulated-and-quantum-annealing-applied-to-xva/
- **株式のポジション予想(野村アセットマネジメント、東北大)**
  Masayuki Ohzeki, Challenging Collaborations with T-QARD, Qubits Europe 2019, https://www.dwavesys.com/media/20jlrutg/24_qubits2019327-2.pdf
- **資産価値の変動予測(上海大など)**
  Yongcheng Ding, Javier Gonzalez-Conde, Lucas Lamata, José D. Martín-Guerrero, Enrique Lizaso, Samuel Mugel, Xi Chen, Román Orús, Enrique Solano, Mikel Sanz, Towards Prediction of Financial Crashes with a D-Wave Quantum Computer, arXiv:1904.05808 (2019)
- **不正取引検知(SMBCグループ、日本総研、NEC)**
  量子アニーリングの業務活用に向けた共同研究, https://www.jri.co.jp/page.jsp?id=38496
- **ポートフォリオ最適化(1QBit、NatWestなど)**
  Quantum-Inspired Hierarchical Risk Parity, https://1qbit.com/whitepaper/quantum-inspired-hierarchical-risk-parity
- **債券アービトラージの最適化(1QBit)**
  Finding Optimal Arbitrage Opportunities Using a Quantum Annealer, https://1qbit.com/whitepaper/arbitrage/

＜化学＞

- **材料設計パラメータの調整(東大、早稲田大、NIMS)**
  Koki Kitai, Jiang Guo, Shenghong Ju, Shu Tanaka, Koji Tsuda, Junichiro Shiomi, and Ryo Tamura, Designing metamaterials with quantum annealing and factorization machines, Phys. Rev. Research 2, 013319 (2020)
- **複合ポリマーの安定構造探索(慶大、フィックスターズ、早稲田大)**
  Katsuhiro Endo, A phase-field model by an Ising machine and its application to the phase-separation structure of a diblock polymer, Sci Rep 12, 10794 (2022)
- **分子の構造類似度算出(富士通)**
  デジタルアニーラの原理と材料開発への応用, https://www.jstage.jst.go.jp/article/vss/63/3/63_20180509/_pdf/-char/ja

© The Japan Research Institute, Limited

日本総研 The Japan Research Institute, Limited

参考文献｜量子アニーリング方式の活用動向

＜情報＞

- **時系列データのクラスタリング(フォルクスワーゲン、ライデン大)**
  Sheir Yarkoni, Andrii Kleshchonok, Yury Dzerin, Florian Neukart, Marc Hilbert, Semi-supervised time series classification method for quantum computing, arXiv:2006.11031 (2020)
- **探索アルゴリズム(ロッキードマーティン)**
  Robert A. Dunn, Searching and Sorting Algorithms for Quantum Annealing Computers, arXiv:2204.13233 (2022)
- **非負二値行列分解(ロスラモス国立研究所、NTTデータ、お茶の水女子大など)**
  Daniel O'Malley, Velimir V. Vesselinov, Boian S. Alexandrov, Ludmil B. Alexandrov, Nonnegative/binary matrix factorization with a D-Wave quantum annealer, arXiv:1704.01605 (2017)
- **テレビCMの配信最適化(リクルート)**
  TV Commercials Allocation for Frequency Optimization: Recruit, Qubits 2023, https://www.youtube.com/watch?v=GRpl2QQumLU

＜製造/流通＞

- **自動車塗装工程の順序最適化(フォルクスワーゲン、ライデン大)**
  Sheir Yarkoni, Alex Alekseyenko, Michael Streif, David Von Dollen, Florian Neukart, Thomas Bäck , Multi-car paint shop optimization with quantum annealing, arXiv:2109.07876 (2021)
- **フォトニック結晶レーザーの構造最適化(京大、慶大、早稲田大)**
  量子アニーリングを活用したフォトニック結晶レーザーの構造最適化に成功 ―量子計算技術を活用したスマート製造分野の発展に向けて―, https://www.keio.ac.jp/ja/press-releases/files/2022/9/9/220909-2.pdf
- **交通最適化(フォルクスワーゲン、D-Wave)**
  Florian Neukart, Gabriele Compostella, Christian Seidel, David von Dollen, Sheir Yarkoni, Bob Parney, Traffic flow optimization using a quantum annealer, arXiv:1708.01625 (2017)
- **航空貨物の配置最適化(エアバス、REPLY)**
  2020 Airbus Quantum Computing Challenge, https://www.airbus.com/en/innovation/disruptive-concepts/quantum-technologies/airbus-quantum-computing-challenge
- **人員配置最適化(住友商事、日立、グルーブノーツなど)**
  通販向け物流倉庫の人員最適配置自動作成サービス, https://www.fixstars.com/ja/cases/amplify-bellemaison
  勤務シフト最適化ソリューション, https://www.hitachi.co.jp/products/it/finance/solutions/application/common/CMOS-PersonnelShift/index.html
  グルーヴノーツ、量子コンピュータ技術を活用した「スケジューリング最適化」パッケージを正式リリース, https://www.groovenauts.jp/wp-content/uploads/2019/12/20191220.pdf

© The Japan Research Institute, Limited

更新履歴

Ver.	発行日	主な更新内容
1.0	2024年10月29日	初版
1.1	2024年11月7日	量子アルゴリズム QPE (量子位相推定) に関して、加筆・修正
1.2	2025年1月10日	NanoQTに関して、加筆・修正

© The Japan Research Institute, Limited