

第330回 NRIメディアフォーラム
「ITロードマップ 2022年版 ～情報通信技術は5年後こう変わる！～」

量子コンピュータ

～2030年に向けたロードマップ～

上級研究員 藤吉 栄二

株式会社野村総合研究所
DX生産革新本部
IT基盤技術戦略室

2022年3月31日


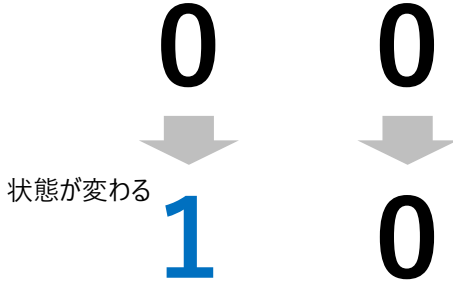

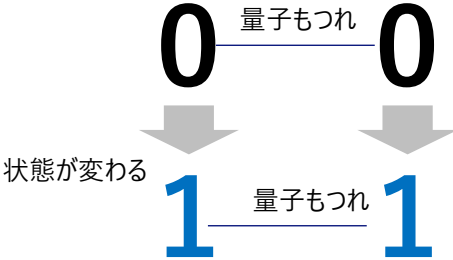
NRI

Share the Next Values!



量子力学の特徴である「重ね合わせ」と「量子もつれ」が、量子コンピュータのよりどころ

- 「計算爆発」(※) に対処できる可能性がある
- 出現確率が最も高いものを回答として採用する (= 厳密解ではない)

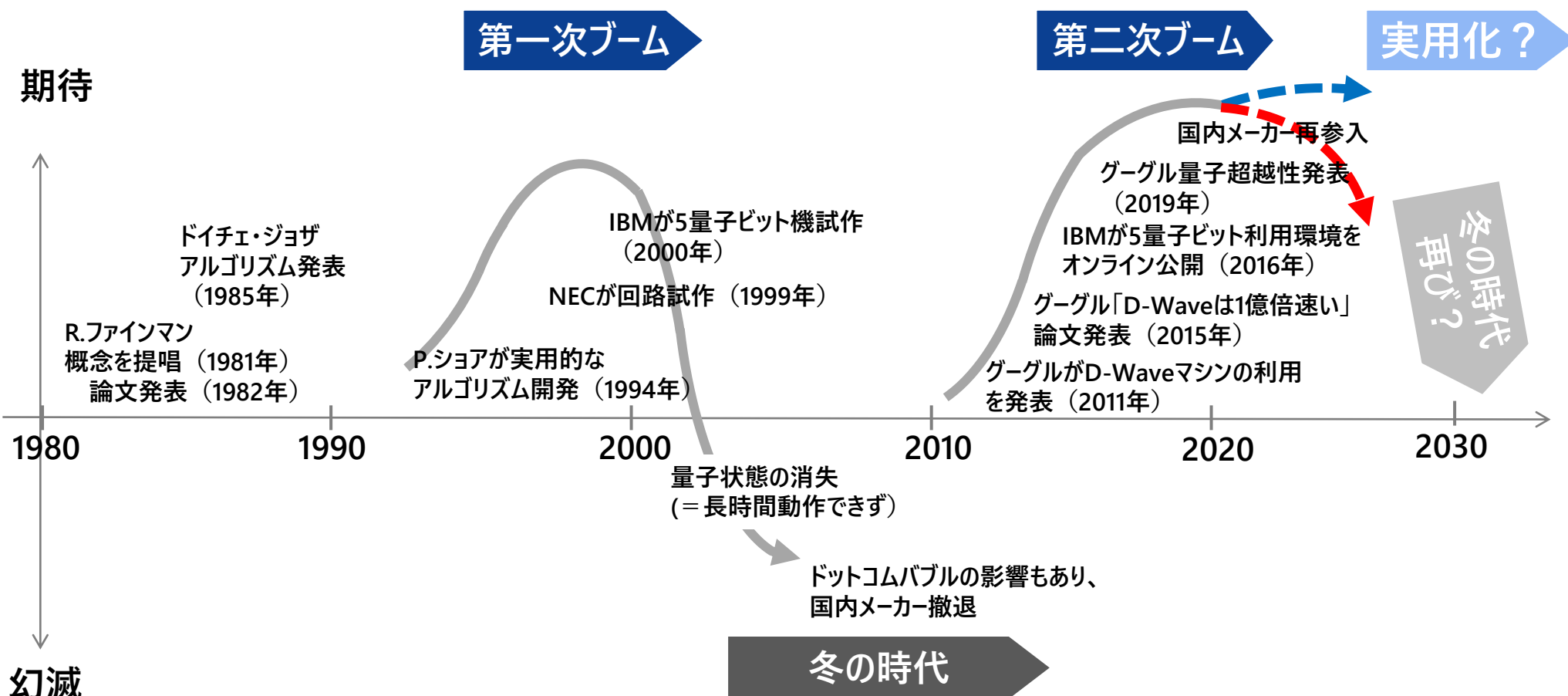
	演算の単位	情報の相互作用	計算時の特徴
古典コンピュータ (※※)	<p>ビット</p>  <p>0か1のいずれかの状態</p>	 <p>ビットの状態はそれぞれ独立</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・入力数が増すと、計算コストが飛躍的に増大
量子コンピュータ	<p>量子ビット (Qubit)</p>  <p>0か1を重ね合わせて同時に表す</p>	 <p>どちらか一方の量子ビットの値が観測で決まると他の量子ビットの値も決まってしまう (量子もつれ)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・解は確率的に求まる (複数回計算が必要) ・重ね合わせと量子もつれの組み合わせで計算回数を減らし、高速処理を実現 (代表例は、ショアの素因数分解アルゴリズム)

(※) 問題の規模をNとした場合、Nの指数関数または階乗に比例して問題を解く時間が大きくなり、事実上、有限時間で解くことができないこと。

(※※) 量子コンピュータの研究領域では、「量子」と対比する意図で従来型のコンピュータを「古典コンピュータ」と呼称することが一般的。以降、従来型のコンピュータを「古典コンピュータ」と記載する。

量子コンピュータへの期待と不安

- グーグルによるD-Waveマシンの検証論文発表以降、**ユーザー企業も量子コンピュータの研究に参加**
- 実用化には高いハードルがあることもわかってきた。AIが経験した普及サイクルをなぞって、「**また冬の時代が来るのでは**」との指摘もある




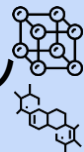



1. 量子コンピュータへの期待
2. 量子コンピュータ開発の現在地
3. 今後の展望（ロードマップ）
4. まとめ

量子コンピュータへの期待

適用が期待される計算：最適化、機械学習、シミュレーション、暗号

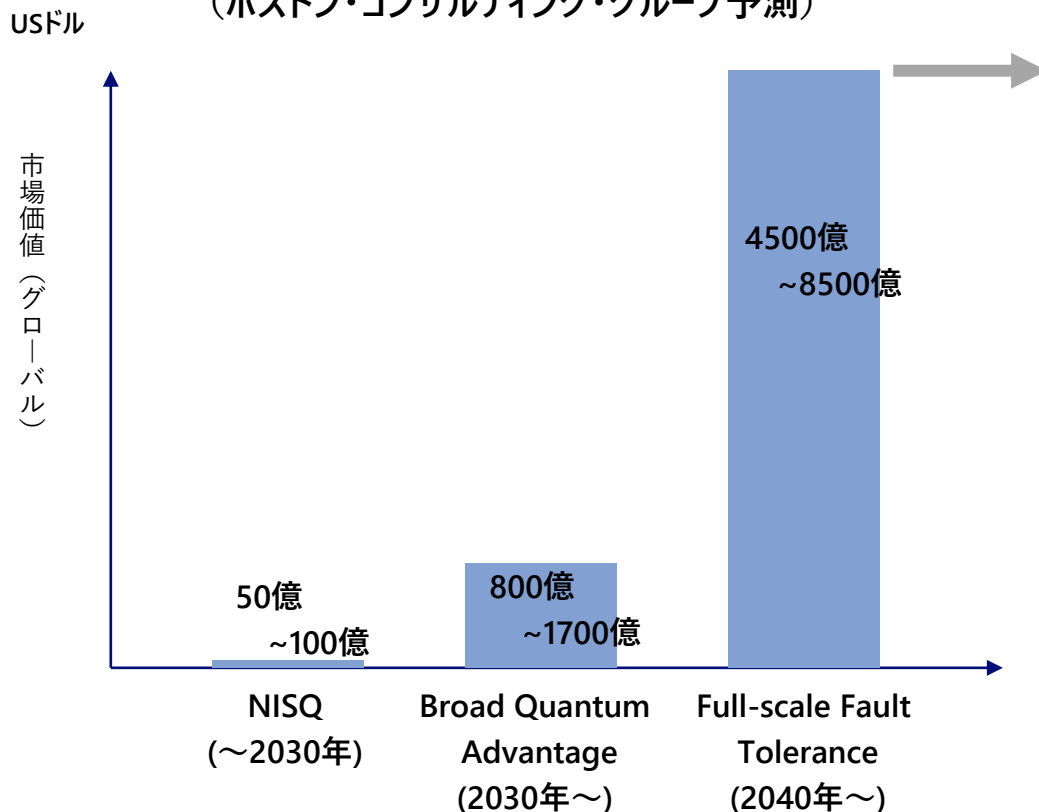
- 量子コンピュータを計算機として実行させるためには、**量子アルゴリズムが必要**
- 量子アルゴリズムの適用先となる**計算ジャンルは以下の4つ。幅広い業種で利用できる**と期待

	適用シーン	関連する量子アルゴリズムの例 (※)
最適化  	サプライチェーンやロジスティクス（ルート最適化）、金融（ポートフォリオ最適化、リスク分析）、人やモノなどの配置（リソース管理、スケジューリング）など。	<ul style="list-style-type: none">• 量子アニーリング• QAOA (Quantum Approximate Optimization Algorithm)• グローバーのアルゴリズム• QAE (Quantum Amplitude Estimation)• HHLアルゴリズム
機械学習 	ヘルスケア（映像解析、患者特定）、金融（不正検知）、広告配信（属性分類）など。 分類のためのサポートベクタマシンなどの機械学習、学習モデル生成に利用できる。	<ul style="list-style-type: none">• 量子機械学習<ul style="list-style-type: none">- サポートベクタマシン- クラスタリング- 量子ニューラルネットワーク- 量子強化学習
シミュレーション 	触媒や電池用素材の探索（マテリアル・インフォマティクス）、医薬品（創薬）など。 量子力学的な状態をネイティブに操作する機能を利用する。	<ul style="list-style-type: none">• VQE (Variational Quantum Eigensolver)• QPE (Quantum Phase Estimation)
暗号 	安全保障（暗号解析、暗号通信） 金融（暗号通信）など	<ul style="list-style-type: none">• ショアのアルゴリズム

量子コンピュータは、長期テーマ

2030年頃から市場が拡大し、2040年以降は数十兆円の市場価値を生むと期待されている

エラー耐性がある、Fault Tolerantな量子コンピュータが創出する2040年以降の市場価値は51兆円～97兆円
(ボストン・コンサルティング・グループ予測)



計算分野	アプリケーション	市場価値
最適化	航空	ルート最適化
	金融	ポートフォリオ最適化
	金融	リスク管理
	流通	ルート最適化、ネットワーク最適化
		1000億～2500億 USD
機械学習	自動車	自動運転、AI
	金融	マネーロンダリング対策
	ハイテク	検索、広告最適化
	その他	AI活用全般
		1500億～2200億 USD
シミュレーション	航空	流体力学、素材開発
	自動車	空力、物性・構造設計
	化学	触媒・酵素解析
	エネルギー	太陽光変換
	金融	市場シミュレーション
	ハイテク	バッテリーデザイン
	製造	マテリアルデザイン
	製薬	創薬
		1600億～3300億 USD
暗号	暗号化/暗号解析	400億～800億 USD

量子コンピュータへの期待

ここ数年で大手クラウドベンダーの量子コンピューティング・クラウドサービスが出揃う ユーザー企業にとっては量子コンピュータ検証の好機

- IBMは、初学者向けのチュートリアルや産学連携によるサポートが強み
- アマゾンやマイクロソフトは、最新のハードウェアへの接続環境を用意し、ユーザーに訴求

	IBM	アマゾン	マイクロソフト	グーグル
サービス名	IBM Q	Amazon Braket	Azure Quantum	Quantum AI
提供開始	2017年（一部無償）	2020年	2021年	2021年（限定公開）
接続可能なハードウェア（提供ベンダー）	・IBM	・Rigetti Computing ・IonQ ・D-Wave Systems ・Oxford Quantum Circuits (OQC) ・QuEra Computing（予定）	・Rigetti Computing ・Quantinuum（Honeywell） ・IonQ ・Quantum Circuit ・Pasqal（予定）	・Google ・IonQ
SDK（ソフトウェア開発キット）	Qiskit	Braket SDK	Q#、Qiskit、Cirq.	Cirq
その他	国内外の産学による研究コミュニティ「IBM Quantum Network」を運営	エラー訂正量子コンピュータの自社開発を宣言（2021年11月）	欧米の主要大学との共同研究を推進中	・「Quantum AI campus」をカリフォルニア州サンタバーバラに設置（2021年5月） ・量子テクノロジーグループ「SandboxAQ」をスピンアウト（2022年3月）

各業界のトッププレイヤーが、量子コンピュータ研究レースに参戦

■ IBMやグーグルなどの量子コンピュータ研究大手のほか、スタートアップなどと共同で研究を推進

	企業例	研究テーマ	研究パートナー
金融	ゴールドマン・サックス	デリバティブ計算シミュレーション、ポートフォリオ最適化	QCware
	JPモルガン・チェース	金融リスクモデリング、オプションプライシング、量子計算オラクル	IBM、Honeywell
	シティグループ	モンテカルロ・シミュレーション	IBM
	ウェルスファーゴ	新金融サービスの開発	IBM
	BBVA	ダイナミックポートフォリオ管理、アービトラージやデリバティブ計算	CSIC/アクセンチュア/Multiverse/Zapata Computing/D-Wave Systems/ 富士通
	スタンダード・チャータード	ポートフォリオ・シミュレーション	Space Research Association
	MUFG	資産運用、暗号、リスク計算	IBM
自動車	コモンウェルス銀行	ポートフォリオ・リバランシング	Rigetti Computing
	ダイムラー	製造工程の最適化	IBM、グーグル
	BMW	機械学習を用いた製造管理エンハンスメント	IonQ/EntropicaLabs
保険	フォルクスワーゲン	フリート最適化、その他	D-Wave Systems/AWS
	Aioi Nissay Dowa USA	機械学習を用いたテレマティクスセンサーデータの2値分類	IonQ
化学	アマジエン	創薬プロセスの検討	AWS/QSimulate
	メルク	量子機械学習を用いたサプライチェーン最適化	IonQ/Zapata Computing
	三菱ケミカル	Li-airバッテリーの開発	IBM
	JSR	新素材開発	IBM/Qunasys/CambridgeQuantum/QSimulate
物流	DHL	カーゴパッキングの最適化	IonQ/CambridgeQuantum
	エクソンモービル	海上航行する商船の運航最適化、量子化学シミュレーション	IBM
製造	サムスン電子	半導体物質の分子シミュレーション	IonQ/インペリアルカレッジロンドン
	ボーイング	航空宇宙イノベーションのための高度計算	IBM
	エアバス	航空課題の解決	QCware
その他	エネル	電力配送、エネルギー管理の最適化	AWS/DataRely

ビジネス課題の検証では、D-Wave マシンが先行

- D-Wave Systemsは「世界で唯一量子コンピュータを販売している会社」（同社ホームページより）
- 250以上のアプリケーション検証事例を有する。商用化＝検証利用可能であるが、「ビジネスにおいて実用化が進んでいる」ではない点に注意

自社工場内の無人搬送車（AGV）の 経路移動の効率改善（2018年）

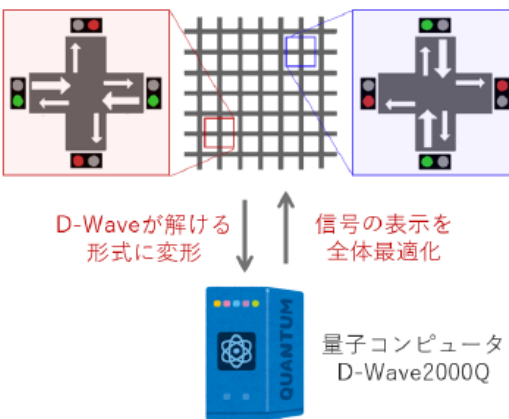


AGVの停止時間を平均15%短縮

出所) D-wave Japan
https://dwavejapan.com/app/uploads/2019/12/Final_D-Wave_DENSO_case_study_2019_11_22.pdf

大規模信号機群を制御する 最適化技術の開発に成功（2021年）

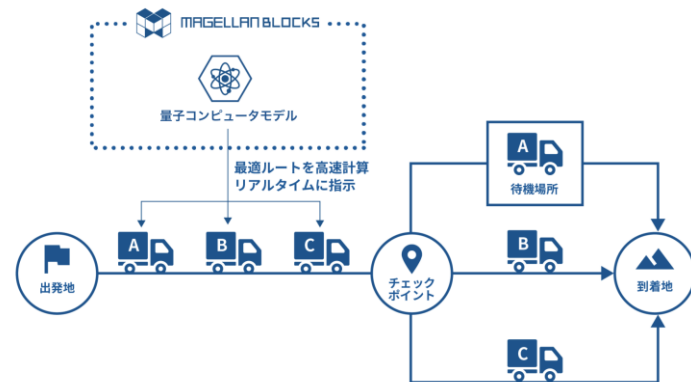
車が円滑に流れるように信号の表示を決める問題



車両の流れやすさを10%向上

出所) 東京大学
http://www.tytlabs.co.jp/cms/news/pdf/press/20210210_%20press.pdf

建設発生土の運搬計画を最適化。 建設現場の生産性を向上（2022年1月）



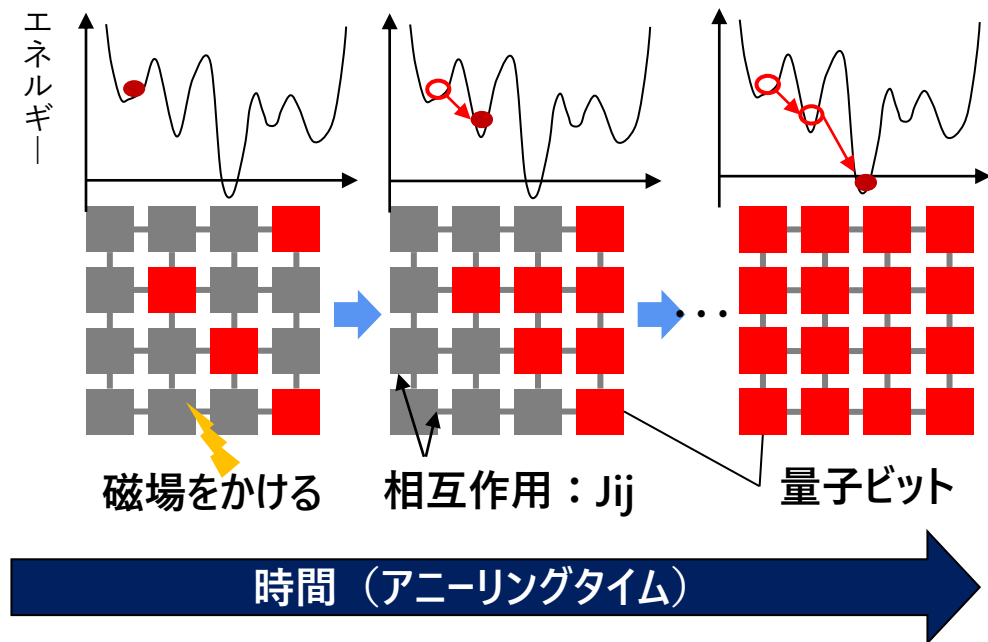
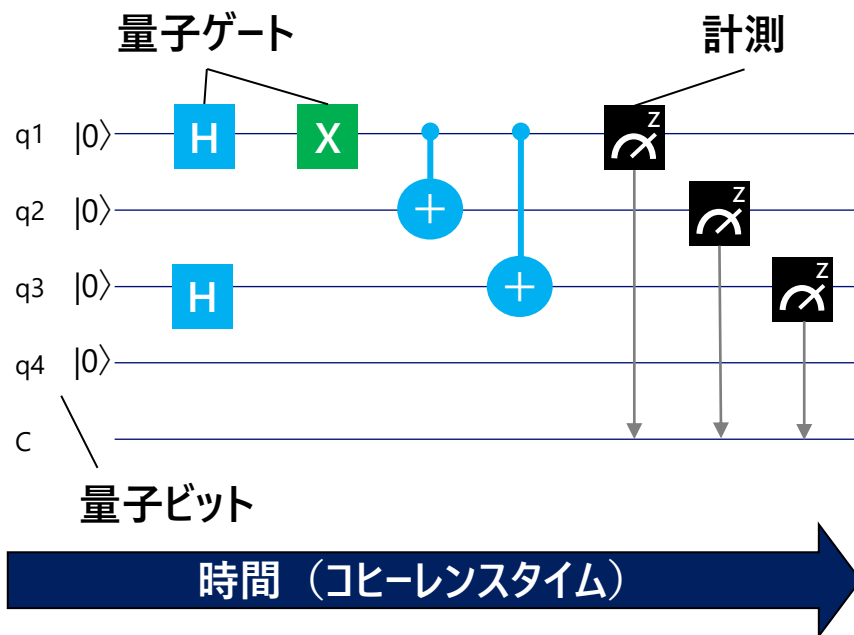
走行台数を変えることなく
1日当たりの運搬量を約10%増加

出所) https://www.magellanic-clouds.com/blocks/2020/10/09/kewpie/?_ga=2.13196987.1.1354823844.1613189831-1695352336.1611313614

量子コンピュータ開発の現在地

量子コンピュータの計算方式には、量子ゲート方式と量子アニーリング方式がある

	量子ゲート方式	量子アニーリング方式
取り組み	1980年代～	2000年代～
実現方法	量子ビットに対するゲート操作を適用。 ゲート通過後の状態を計測する。	量子ビットでイジングモデル（格子模型）を構成。 系のエネルギー基底状態を探す。
位置づけ	古典コンピュータの上位互換	物理実験装置（組み合わせ最適化計算用の演算装置）
ハードウェア開発	海外の複数のベンダーが開発に参入。 量子ビットを作るための複数の方式が、さまざまなプレイヤーから提案されている。	D-Wave Systems（カナダ）が代表的なプレイヤー。日立製作所、富士通、東芝、Fixstars Amplify、NTTが、古典コンピュータを使ってアニーリングを行う「量子Inspired」をハード、ソフトで提供。



量子コンピュータ開発の現在地

量子ゲート方式の実現手法が続々提案中

超電導やイオントラップに加え、2022年は冷却原子、フォトニクスの開発動向に注目

量子ゲート方式

超電導

グーグル 米	Rigetti Computing 米	IBM 米
Bleximo 米	インテル 米	Qutech オランダ
本源量子 中国	IQM フィンランド	理化学研究所 日本
Oxford Quantum Circuits イギリス	SEEQC 米	D-Wave Systems カナダ
Nord Quantique カナダ	Quantum Circuits 米	アマゾン AWS 米
QuantWare オランダ		

イオントラップ

Quantinuum (Honeywell) 米	IonQ 米
Oxford Ionics イギリス	AQT オーストリア
Universal Quantum イギリス	AQTION オーストリア
MicroQC ブルガリア	NexGenQ フランス

フォトニクス (光)

PsiQuantum 米	Xanadu カナダ
ORCA イギリス	QuiX Quantum オランダ

電子スピン/シリコン

Photonic Inc カナダ	Silicon Quantum Computing オーストラリア
本源量子 中国	Intel/Qutech 米/オランダ
Quantum Motion イギリス	日立製作所 日本
EeroQ 米	Blueqat 日本

冷却原子

Atom Computing 米	ColdQuanta 米
Pasqal フランス	QuEra Computing 米

ダイヤモンド

Quantum Brilliance オーストラリア

トポロジカル

マイクロソフト 米	Nokia/BellLabs 米
--------------	---------------------

量子アニーリング方式

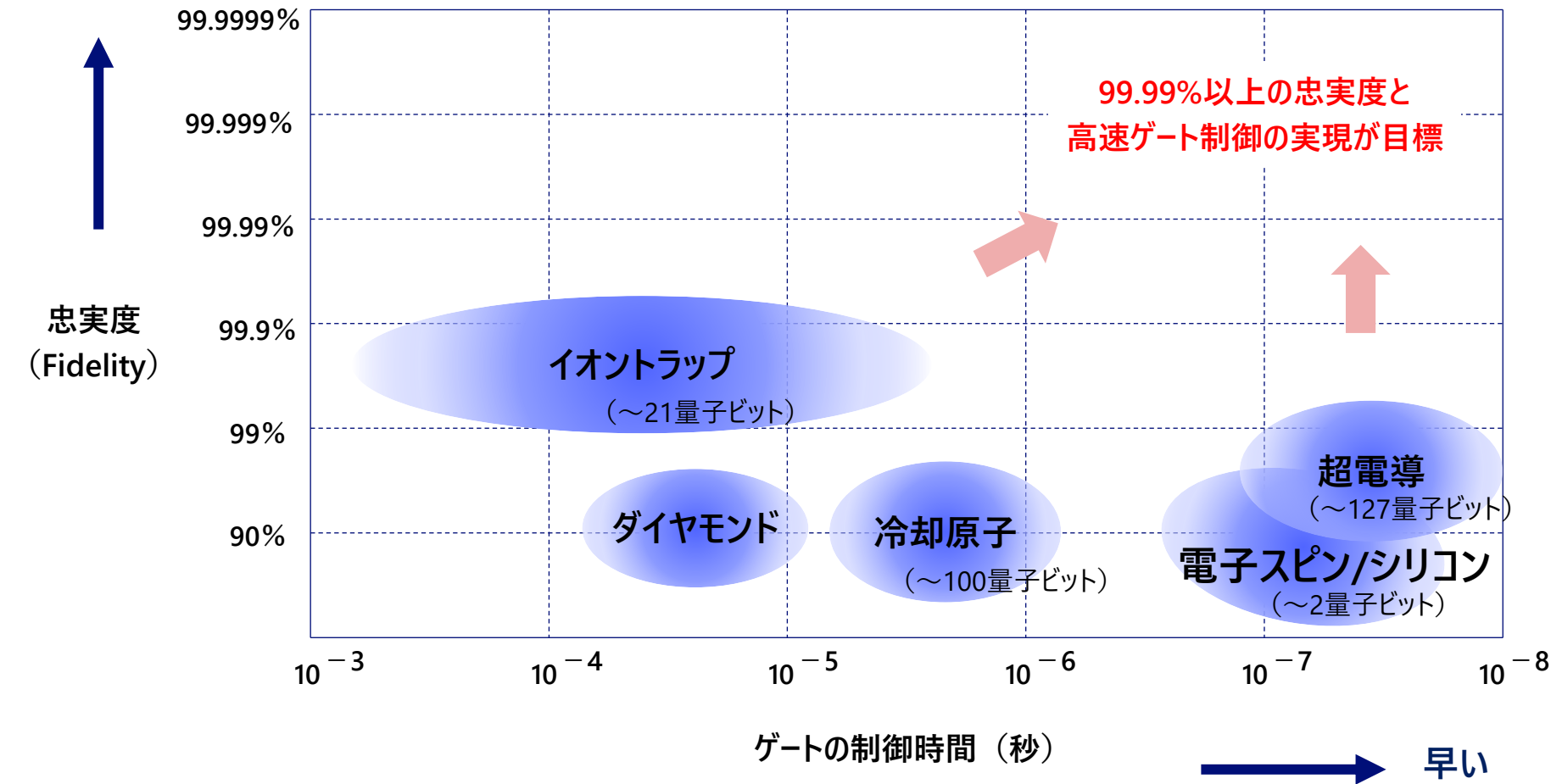
NEC/ParityQC 日本/オーストラリア	Qilimanjaro スペイン	D-Wave Systems カナダ
----------------------------	---------------------	-----------------------

量子コンピュータ開発の現在地

量子ゲート方式の課題は、高い忠実度（Fidelity）を達成しつつ大規模化できるかどうか
方式ごとにゲートの制御時間が異なるため、用途ごとに使い分けが必要となる可能性も

2量子ビットを利用してゲート操作を行う場合の忠実度とゲート制御時間
(カッコ内の量子ビット数は、2022年3月時点の参考値)

精度が高い

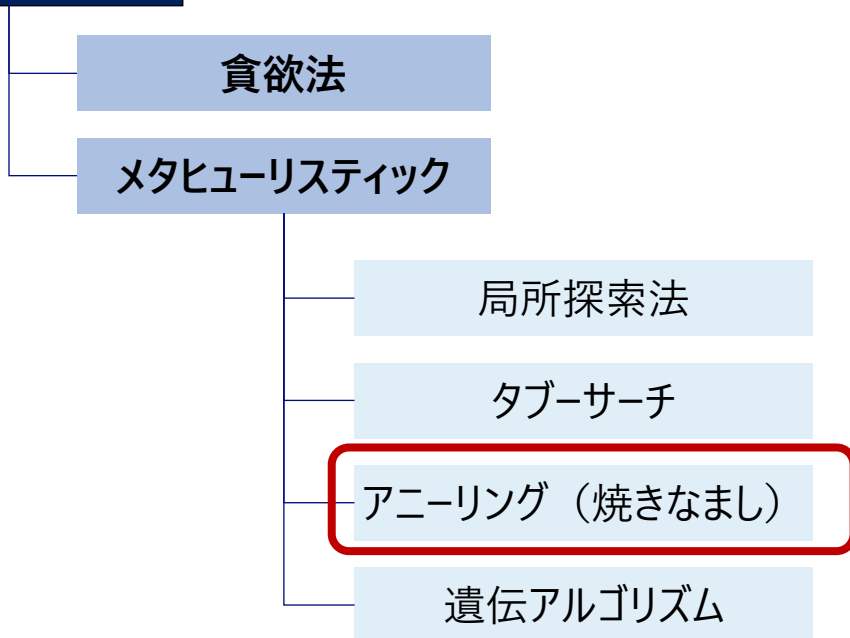


量子アニーリング方式の課題は、高速性が保証された実用的な問題が見つかっていないこと ただし最適化問題の適用範囲は広範。有効なシーンの地道な探索と解法の工夫が必要

- 大規模な問題であれば、数%の改善であってもビジネス上の効果は大きい
- アニーリングを実装するための解法の設計、調整は難しいが、ノウハウとして蓄積できる

そもそも、組み合わせ最適化問題の近似解法は複数存在する。アニーリングは唯一の手法ではない。

近似解法



量子アニーリングや量子Inspiredは、ビット数を増やし、大規模の問題を扱えるようになると、他の近似解法との差別化につながる可能性がある。

	ベンダー	製品名	ビット数 (※)
量子	D-Wave Systems	D-Wave Advantage	5760 (疎結合)
	日立製作所	CMOS アニーリング	10万 (全結合) 14万 (疎結合)
古典 (量子 Inspired)	富士通	デジタル アニーラ	8192 (全結合)
	東芝	SQBM+	100万 (全結合)
	Fixstars Amplify	Fixstars Amplify AE	10万 (全結合)
	NTT	コヒーレント イジングマシン	10万 (全結合)

(※) 「スピン数」と表記される場合もある。また、東芝の場合、PoC利用は1万スピンまで

「量子Inspired」は、量子入門機、あるいは量子コンピュータが本格化するまでの中継ぎとなる可能性

■ 時期は明言していないが、D-Wave Systemsも量子ゲート方式への参入を表明

	量子Inspiredサービスと主なPoC	関連ソリューションの整備	量子コンピュータ開発
日立製作所	<p>CMOS アニーリング</p> <ul style="list-style-type: none"> ・自然災害を考慮したの損害保険のポートフォリオ最適化検討 (SOMPO)。2020.1~2021.9 	<ul style="list-style-type: none"> ・勤務シフト最適化ソリューションを提供開始。2020.10~ 	<ul style="list-style-type: none"> ・シリコン量子ビットによる量子コンピュータを2027年から始まる中計期間中に公開することを検討。2021.9発表
富士通	<p>デジタル アニーラ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・自動車専用船の積み付け計画作成業務を効率検証化 (日本郵船)。2021.9発表 ・イベント施設のコロナ禍対応座席配置検証 (ドイツ)。2021.6発表 ・大規模物流の配送ルート効率化 (トヨタシステムズ)。2020.9発表 	<ul style="list-style-type: none"> ・富士通、ペプチドリーム、みずほキャピタル、竹中工務店、キンダ化学の5社でペプチエイド株式会社を設立。計算にはデジタルアニーラやHPC利用。2020.11発表 	<ul style="list-style-type: none"> ・理化学研究所、東京大学と超伝導方式量子コンピュータの共同研究を実施。 ・デルフト工科大学とスピン量子ビットを利用した量子コンピュータの開発を行う。2020.10発表
東芝	<p>SBM、SQBM+</p> <ul style="list-style-type: none"> ・HFT取引におけるミスプライシング検出検証 (ダルマキャピタル)。2021.5発表 	<ul style="list-style-type: none"> ・Toshiba OPEN INNOVATION PROGRAM 2021にて創薬ソリューションを検討 2021.9発表 	
NEC	<p>NEC Vector Annealing</p> <p>(2021年9月よりサービス開始)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・D-wave Systems 「Leap Quantum Cloud Service」販売代理店、日本語サポート提供。2021.12~ 	<ul style="list-style-type: none"> ・量子アニーリングマシンの2023年実用化を宣言。2018.1発表 ・量子アニーリングの実現に向け、多ビット化が可能な基本ユニットを開発。2022.3発表

性能評価のベンチマーク指標も必要

- IBMが提唱した「量子ボリューム」が有名だが、2021年11月に新たな指標を提案
- 米国では、DARPAが量子ベンチマークプログラムを開始（2021年4月～）

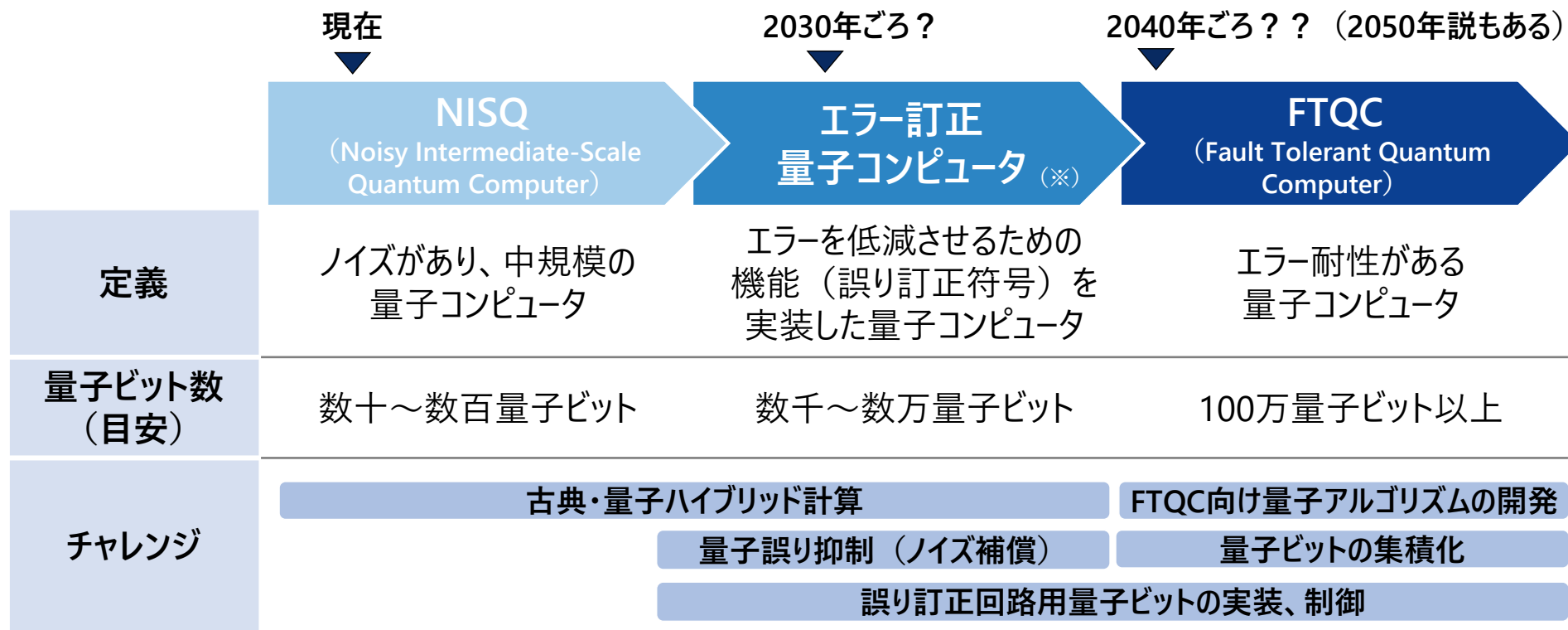
ベンチマーク指標	提唱企業/組織	概要
SupermarQ	Super.Tech	アプリケーション中心、スケーラブル、フルシステム評価、適合性の4原則で開発された評価ツール。オープンソース公開中。
Novel Approach	QED-C	実用的なアプリケーションを対象としたベンチマーク指標。オープンソース公開中。
Q-score	Atos	量子プロセッサの変数の最大数を評価。最適化問題のパフォーマンスを評価できる。
Circuit Layer Operations Per Second (CLOPS)	IBM	1秒あたりのゲート操作。 (量子回路を1秒間にどれだけ実行できるか)
量子ボリューム (QV)	IBM	量子ビットの制御と読み出しに関わるエラー、デバイス間の接続性やクロストーク、ソフトウェアのコンパイラ効率なども考慮した指標。

今後の展望（ロードマップ）

今後の展望（ロードマップ）

量子コンピュータの開発目標は、NISQからエラー訂正、FTQCへと移行

- 海外ベンダーは、市場獲得に向けて積極的なロードマップを公表。日本への影響はあるか
- ハードウェアの動向に関心が集まりがちだが、量子アルゴリズムや関連ソフトウェアの開発も必要

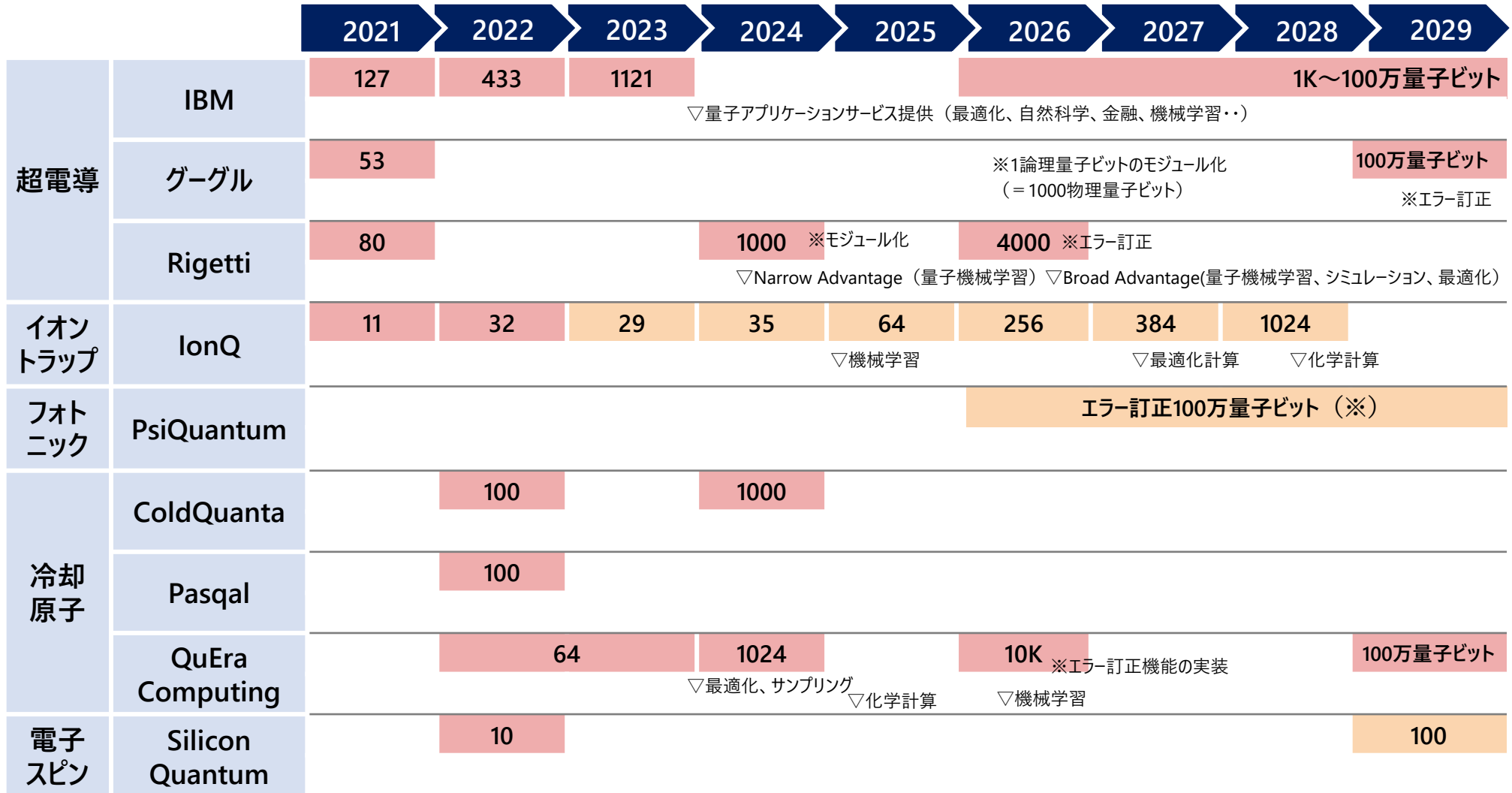


量子コンピュータは進化するが、古典コンピュータ（ハード、ソフト）の進化も止まらないはず
ビジネス課題、社会課題に対して量子コンピュータの優位性はどこにあるのか、どこで活かすべきかなどの議論も必要

今後の展望（ロードマップ）

主要ベンダーは今後10年のマイルストーンを発表

エラー訂正ありのハードウェアの早期提供と利用可能な計算方式を宣言し、ユーザーにアピール



今後の展望（ロードマップ）

主要スタートアップは、巨額の資金を調達。今後、開発スピードが速まると期待

プレイヤー	設立国	事業の概要	資金調達総額	最新調達年月	
ハードウェア	PsiQuantum	米国	光量子コンピュータ開発	\$665M（約800億円）	2021年7月
	Rigetti Computing	米国	超電導方式量子コンピュータ開発	\$440M（約520億円）（※1）	2021年12月
	IonQ	米国	イオントラップ方式量子コンピュータ開発	\$432M（約515億円）（※2）	2021年10月
	D-wave Systems	カナダ	量子アニーリング、超電導量子コンピュータ開発	\$280M（約334億円）（※3）	2022年3月
	Xanadu	カナダ	光量子コンピュータの開発	\$135M（約160億円）	2021年5月
	Atom Computing	米国	冷却原子量子コンピュータ開発	\$81M（約96億円）	2021年7月
	IQM	フィンランド	超電導方式量子コンピュータ開発	€70.8M（約93億円）	2020年10月
	ColdQuanta	米国	冷却原子量子コンピュータ開発	\$71.6M（約85億円）	2021年5月
	Pasqal	フランス	冷却原子量子コンピュータ開発	\$30M（約36億円）	2021年6月
	QuEra Computing	米国	冷却原子量子コンピュータ開発	\$17M（約20億円）	2021年11月
	Quantum Circuits	米国	超電導方式量子コンピュータ開発	\$18M（約21億円）	2017年11月
	Universal Quantum	イギリス	イオントラップ方式量子コンピュータ開発	£ 11M（約17億円）	2021年11月
	Nord Quantique	カナダ	超電導方式量子コンピュータ開発	\$7.6M（約9億円）	2022年2月
ソフトウェア	Zapata Computing	米国	ソフトウェアプラットフォームOrchestra開発	\$67.4M（約80億円）	2020年11月
	Classiq Technologies	イスラエル	量子回路設計不要のソフトウェア開発	\$48.8M（約58億円）	2022年2月
	Q-CTRL	オーストラリア	量子アルゴリズム、量子センシングソフト開発	\$43.4M（約51億円）	2017年11月
	1QBit	カナダ	量子コンピュータ用ソフトウェア開発	\$35.6M（約42億円）	2021年11月
	Multiverse Computing	スペイン	金融向け量子アルゴリズム開発	€24M（約32億円）	2021年12月
	Riverlane	イギリス	量子コンピュータ用ソフトウェア開発	\$24.1M（約29億円）	2021年3月
	Qunasys	日本	量子化学計算アルゴリズム、ソフトウェア開発	12.4億円	2022年3月
	Jij	日本	量子アニーリング向けソフトウェア開発	2.4億円	2020年8月
	Rahko	イギリス	医薬向け量子機械学習アルゴリズム開発	£ 1.3M（約2億円）	2019年10月
	Blueqat	日本	量子ソフトウェア開発、ハードウェア開発も着手	2億円	2018年10月

※1） Supernova II と合併し、SRAC上場した際のエクイティ投資1.03億円とSupernova IIの保有現金の合算、※2） SRAC上場、

※3） DPCMキャピタルと合併し、SPAC上場。SPAC株式の償還がない場合の受取額（S4報告書より抜粋）

調達総額、最新調達年月の出所はCrunchbase、日本円は2022年3月18日時点の為替レートをもとに算出した。

今後の展望（ロードマップ）

海外では早期の顧客獲得に向けた提携や買収が進行中 長期戦に敗れたベンダーの市場撤退が起こる可能性もある

プレイヤー	提携・買収した相手	内容	発表年	買収した会社の保有技術（または、提携による取り組み）
Terra Quantum	Novarion	提携 合併	2022年	合併会社QMwareを設立。「ハイブリッド量子クラウド・データセンターα」を立ち上げ、欧州の企業、科学研究所向けに提供。ウィーンのNTTグローバルデータセンターへの導入が決定。
Rigetti Computing	Zapata Computing	提携	2022年	Rigetti ComputingのクラウドサービスにZapata Computingのソフトウェアを統合。
	QxBranch	買収	2019年	金融、保険、製薬向けのデータ分析技術を保有。量子断熱計算のシミュレータを開発。
Multiverse Computing	Xanadu	提携	2022年	Xanaduの量子機械学習ソフトウェアPennyLaneを専用ライブラリとして位置づけ。
Keysight Technology	Quantum Benchmark	買収	2021年	量子コンピュータのノイズ診断・対策技術。2020年に富士通研究所と提携。
	Labber Quantum	買収	2020年	測定器制御とラボ自動化のためのソリューションを提供。
	Signadyne	買収	2016年	非常に短い時間間隔（最大1Gs /秒、1秒あたり100万サンプル）で多くの測定を実行できる、測定デバイスを開発。
ODYSSEY THERAPEUTICS	Rahko	買収	2022年	量子機械学習のソフトウェアを開発。
ColdQuanta	Classiq Technologies	提携	2022年	量子回路生成のソフトウェアを提供するClassiq Technologiesと提携し、企業や研究者に100量子ビットの量子コンピュータ利用環境を提供する予定。
Pasqal	Qu & Co	買収	2022年	量子コンピューティング関連のアルゴリズム、ソフトウェア、サービスなどを開発。
Honeywell	Cambridge Quantum	事業 統合	2021年	量子暗号、量子コンパイラ（TKET）、化学計算（EUMEN）などのソフトウェアを開発。事業統合後、Honeywellは、新会社Quantinuumを設立。
ROHDE & SCHWARZ	Zurich Instruments	買収	2021年	100個以上の超伝導およびスピン量子ビットを制御するために設計された、初の商用量子コンピューティング制御システムを提供。

大手企業は、量子コンピュータ研究チームを自社内に立ち上げ、研究を加速

- JPモルガン・チェースやゴールドマン・サックスは、量子コンピュータの開発者を招へい

企業名	取り組み
JPモルガン・チェース	IBMに24年勤め、量子アルゴリズム・チームをけん引したMarco Pistoia氏が2020年1月に参加。JPモルガン・チェースの先端研究を行うFLARE (Future Lab for Applied Research and Engineering)のトップに就任。
ゴールドマン・サックス	元Rigetti ComputingのWilliam Zeng氏が2020年1月に参加し、「Quantum Research」のトップに就任。デリバティブ価格設定、ポートフォリオ最適化、機械学習における量子コンピュータの活用を研究する。
BBVA	2018年から量子技術の調査を開始。量子技術を専門とするさまざまな専門家からなる学術チーム「BBVA Quantum Hub」を設置し、ビジネス部門と共同で取り組むべき課題の候補を選定。 2019年から20年にかけて、5つの金融ユースケースを研究する6つのPoCを実施。
ダイムラー	2018年、シリコンバレーに専門家チームを立ち上げ。 IBM、グーグルとバッテリーの新素材に関する共同研究を開始。
フォルクスワーゲン	2017年にD-Wave Systemsと提携後、複数のPoCを実施。 米国とドイツのフォルクスワーゲンでは、約10人が量子コンピューティング研究に従事（2021年時点）。

今後の展望（ロードマップ）

ゴールドマン・サックスは、5年後の量子コンピュータで利用できる量子アルゴリズムを開発
2020年代後半には金融分野における量子ゲート方式の実用例が登場する可能性が出てきた

ゴールドマン・サックス

『5年～10年以内に提供される量子コンピュータで実装可能な、速度を多少犠牲にした浅いモンテカルロ計算アルゴリズムを開発。』（QCwareとの共同研究。2021年4月発表）

『IonQのハードウェアを用いて、開発したアルゴリズムを実装できることを実証した。』

（IonQ、QCwareとのPoC。2021年9月発表）

ゴールドマン・サックス社ホームページコメント

In a giant leap forward for the world of finance, Goldman Sachs announced **we can introduce quantum algorithms to price financial instruments in as soon as five years.**

出所) ゴールドマン・サックス
<https://www.goldmansachs.com/careers/possibilities/quantum-computing/>

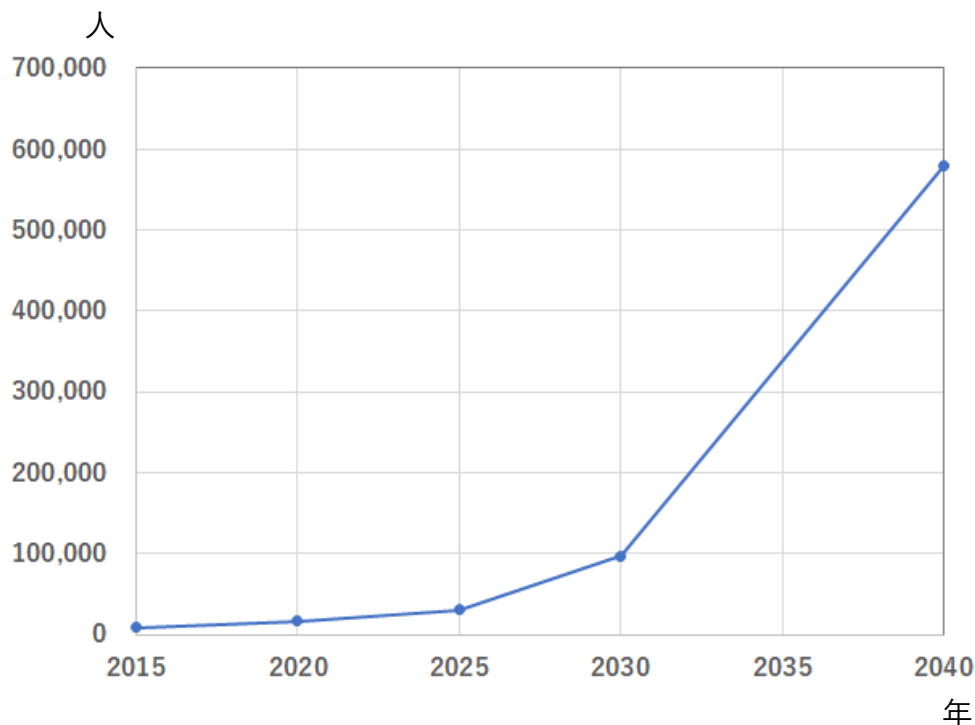
ナスダック

不正検出、注文照合、およびリスク管理の解決に向けたアルゴリズムとソフトウェアをRigetti Computingと共同開発

量子時代の到来に向け、「量子人材」の育成が必要

- 国内では大学が中心となって協議会を立ち上げ、企業向けに量子コンピューティング講座を開催
- アカデミア主導の取り組みから、業界主導の取り組みに移行できるかにも注目

グローバルにおける量子コンピュータ関連の雇用予測
(Qureca社による推計)



出所) Qureca
<https://qureca.com/the-quantum-ecosystem-and-its-future-workforce/>

政府「量子技術イノベーション戦略」の策定を踏まえ、
量子科学委員会では量子人材育成の推進方策を取りまとめ





推進方策	概要
国内外の連携・交流の仕組み・枠組みの構築	・量子分野に関する情報をワンストップで集約・発信 ・海外機関との共同研究、人的交流を推進
教育プログラムの体系化、「〇〇×量子」人材の育成	・良質な教育プログラムを広範に提供 ・量子を第2言語として扱う「〇〇×量子」人材の育成
量子分野への持続的な支援	・個人で独立した研究が可能なグラント等を分野全体で継続的に確保
幅広い層への量子技術の導入・アウトリーチ活動	・教育啓蒙コンテンツなどを利用した若年層等へのアウトリーチ活動を推進
産業界への裾野を広げる研究・人材育成エコシステムの構築	・教育と社会実装の協調領域でアカデミアと産業界が連携する仕組みの構築 ・産業界との交流機会の拡大

出所) 「量子人材育成・確保の推進方策について」科学技術・学術審議会 研究計画・評価委員会
https://www.mext.go.jp/content/20220128-mxt_kiso-000020510_1.pdf

まとめ

まとめ

現時点でビジネス課題や社会課題の検証に利用できるのは量子アニーリングと量子Inspired 2020年代後半には量子ゲート方式の方向性が具体化。量子時代に向けた準備は不要か？

	基礎研究				PoC (Proof of Concept)		PoB (Proof of Business)		導入
	基礎理論	技術 コンセプト	技術コンセ プト検証	実験室 での検証	関連環境 でのデモ	関連環境 での検証	実効性 検証	実現性 検証	実運用
量子ゲート方式 (エラー訂正あり)									
量子ゲート方式 (NISQ)									
量子アニーリング									
量子Inspired (古典コンピュータ)									

理論提案中。**大規模化と集積化は課題。**
IBMやグーグルなどが、長期ロードマップを公開。100万量子ビット化を宣言。
NISQの性能問題もあり、エラー訂正の研究が活発化。

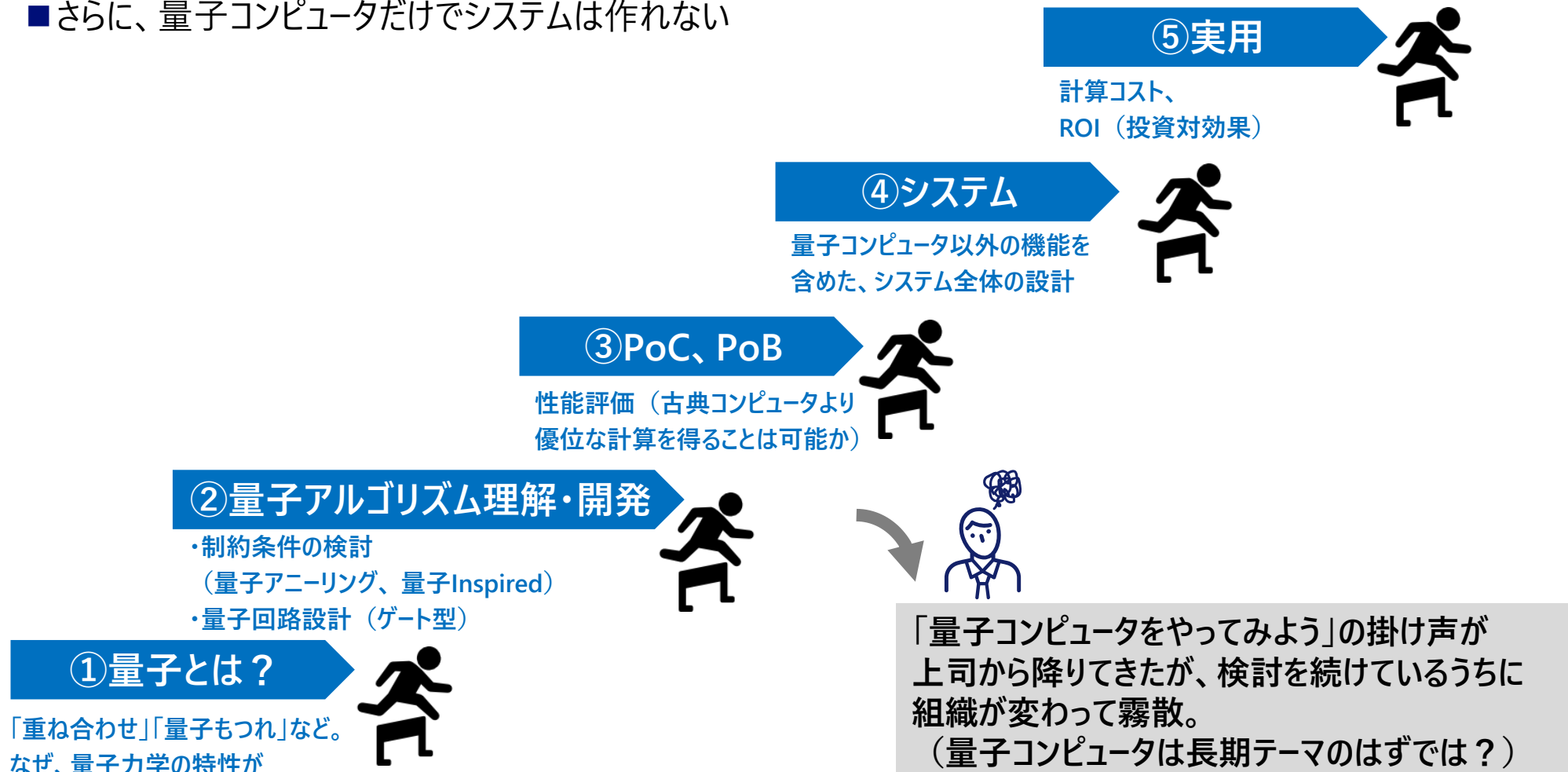
IBM、アマゾンAWS、マイクロソフトAzureがクラウド公開中。**一部はPoC利用も可能だが、現時点の性能は古典コンピュータ以下。**
2025年前後に**機械学習や最適化計算、シミュレーション用途のアプリケーション**が登場する可能性（ただし、ビジネスインパクトは小）

D-WaveSystemsが商用提供。アマゾンAWSでも利用でき、**PoC事例は豊富。**
大規模化、古典コンピュータ向けのツール/近似解法との性能比で苦戦。

日立製作所/富士通/東芝/Fixstars Amplifyがサービス提供中。組み合わせ最適化計算における**アニーリング/イジングモデルが有効なシーンの探索が必要。**

量子コンピュータのビジネス活用に向けて超えるべきハードル

- 多くの量子コンピュータでは、Pythonによるプログラミングが可能。しかし、量子アルゴリズムは難解
- 量子アルゴリズム理解に必要な教材は実務向けというより、アカデミック。かつ、習得には時間を要する
- さらに、量子コンピュータだけでシステムは作れない



量子人材への期待

- 量子コンピュータや量子アルゴリズムに関する理解はボトムライン
- ただし、“**量子コンピュータしか使わない**”のではなく、問題次第では古典コンピュータを利用、あるいは量子コンピュータを使って古典コンピュータの計算を加速させるなど、**アナロジー思考でビジネス課題や社会課題の解決に必要なITを選択し利用**できる人

陥りがちな量子コンピュータ活用とあるべき姿



目的と手段が逆転

量子コンピュータは課題解決手段の一つ

本日のまとめ

- **最適化、機械学習、シミュレーション、暗号**への量子コンピュータ活用に期待
- 政府の後押しやユーザーの関心も高く、**今後国内における量子コンピュータの取り組みが一層活発化**
- 量子ゲート方式は、現時点ではどの方式も課題があり実用の域に達していないが、**主要プレイヤーが今後10年のハードウェア開発ロードマップと適用可能な計算分野を提示**。ユーザー企業は取り組みの方針を描きやすくなった

企業における量子コンピュータ活用に向けたポイント

- **量子人材の育成**
 - 量子コンピュータの関連知識は膨大。習得には時間を要するため早期の着手が有効。
 - 量子人材育成の産学連携プログラム活用も有効。ただし、ビジネス視点での課題選定や古典コンピュータの活用も考慮したアルゴリズム、ツールの選定は企業がノウハウ化すべき領域。
- **“戦略テーマ”としての位置づけ**
 - 量子コンピュータは長期テーマ。多くが研究開発段階だが、5年～10年以内には量子ゲート方式のビジネス検証と実用に向けた方針を具体化できるようになると期待。企業は量子を戦略テーマとして位置づけ、将来の取り組みへの道筋を残しておくべき。

The text is framed by two decorative swooshes. The top swoosh is a gradient bar transitioning from blue on the left to red on the right. The bottom swoosh is a solid blue bar.

Share the Next Values!