

第262回 NRIメディアフォーラム

量子コンピュータの動向

2018年3月8日

株式会社野村総合研究所
IT基盤イノベーション本部
ビジネスIT推進部

藤吉 栄二

〒100-0004
東京都千代田区大手町1-7-2 東京サンケイビル20F



本日の内容

- 「高い演算性能をもつ」と言われる量子コンピュータへの関心、期待が高まっています。「量子コンピュータはスパコンを超える性能を持つ」、「量子コンピュータが実用化すると、現在の暗号技術は瓦解する」などと称されることがありますが、実現するためにはさまざまな制約を乗り越えなければならず、現時点では実験装置的な位置づけにとどまっている点に注意が必要です。
- しかしながら、D-Wave Systemes社による世界初の量子コンピュータ商用製品の登場以降、GoogleやIBM、Microsoftなどの大手クラウドプレイヤーが量子コンピュータへの取り組みを強化しています。さらに、国家レベルでの開発プロジェクトが世界中でスタートするなど、量子コンピュータの開発競争が過熱しています。
- 量子コンピュータは“遠い未来の技術”から、“少し先の未来の技術”へと変わるなか、量子コンピュータの開発動向を紹介するとともに、実現に向けた課題について紹介いたします。

量子コンピュータブームの再来

加熱する量子コンピュータのハードウェア開発

量子コンピュータのアプリケーション

今後の展望

量子コンピュータとは

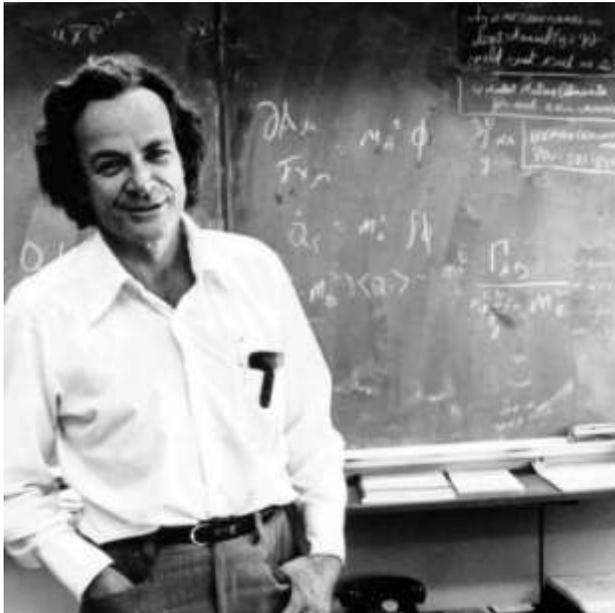
- 量子力学の重ね合わせ現象を利用し、**同時並列計算が可能**
- スーパーコンピュータでも膨大な時間を要する計算を高速に処理

	演算単位 (ビット)	計算方法	特徴
古典コンピュータ	ビット 0 もしくは 1 0と1のどちらかの値	<p>全ての入力に対して毎回計算</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・チューリング機械である ・入力数が増すと、計算コスト増
量子コンピュータ	量子ビット (Qubit) 0 1 0と1の重ね合わせ状態	<p>重ね合わせ状態を利用して一括計算</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・並列計算による高速処理 ・量子状態の維持

量子コンピュータのアイデアは海外から、実装技術開発は日本が先行

R.ファインマン教授

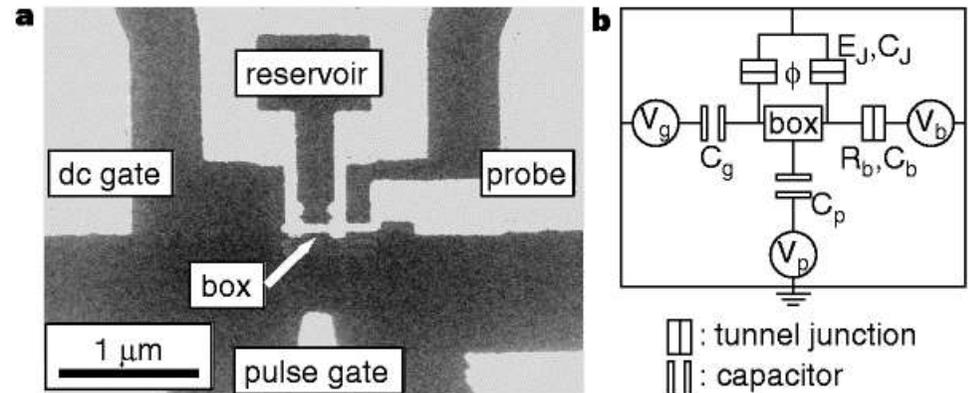
「自然は古典力学の世界でなく、量子力学で動いている。自然の降るまいを計算するなら、量子力学的にするべき」(1981年 物理学会@MITにて)
(1982年 Int. J. Theor. Physに論文発表)



出所) カルフォルニア工科大学
<https://eands.caltech.edu/2016/04/27/no-rest-for-a-nobel-list-richard-feynman/>

NEC 基礎研究所

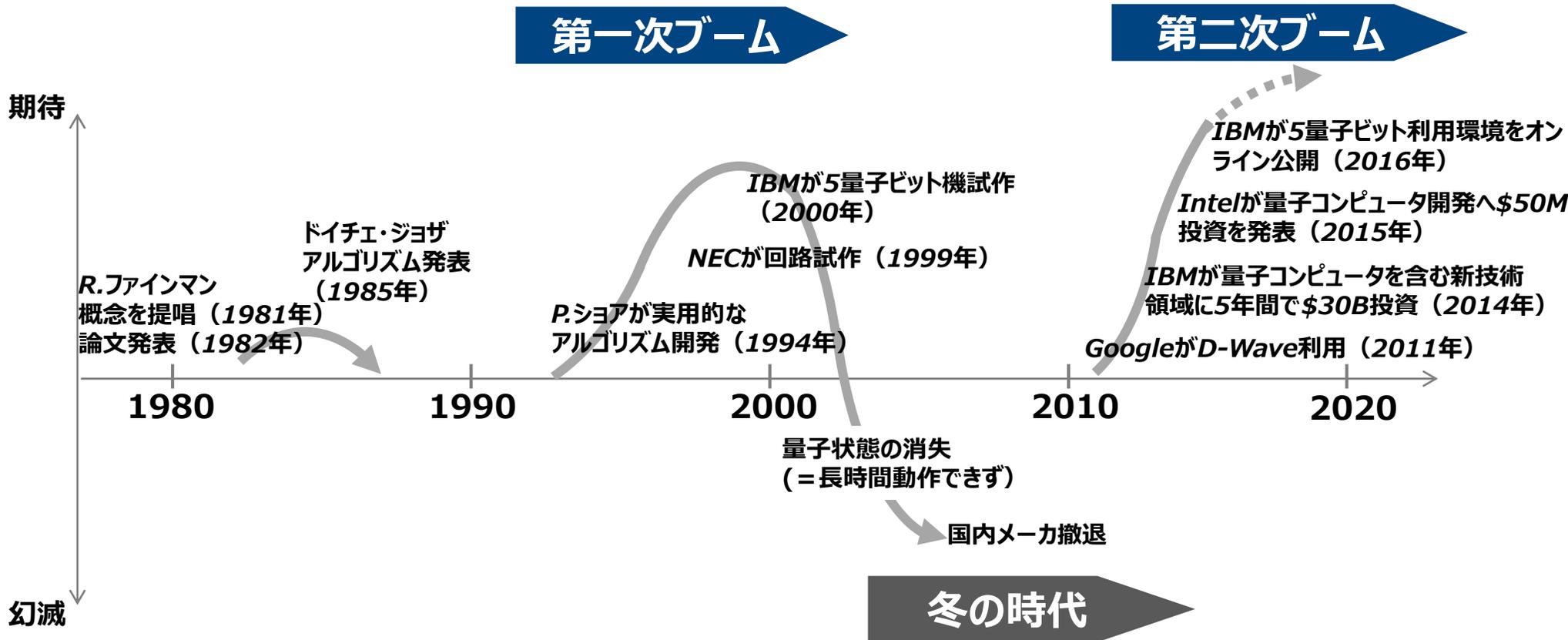
中村 (現 東大)、Tsai (現 理化学研究所) らが、
世界で初めて超電導量子ビットを実現
(1999年 Natureに「Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box」論文発表)



出所) Nature
<https://www.nature.com/articles/19718>

量子コンピュータは第二次ブームへ

- 第一次ブームは、1990年代。量産化のハードルは高く、基礎研究止まり。国内メーカーは撤退
- 第二次ブームは、2010年以降。商用量子コンピュータD-Waveの登場、大手ITベンダーが参入。ムーアの法則の限界も見えてきており、期待が高まっている

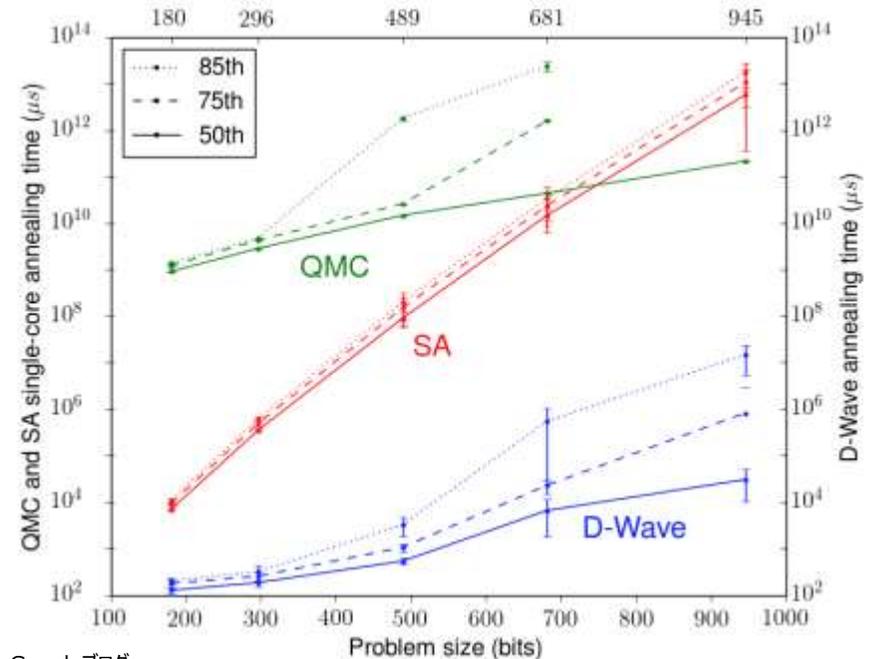


加ベンチャーのD-Wave Systemsは、世界初の商用量子コンピュータを提供。 GoogleやNASAが、“1億倍速い”研究成果を発表

- ベンチャーキャピタルなどからの投資総額は、2018年1月時点で約\$220M（約233億円）
- ゴールドマンサックス、フィデリティ、In-Q-Tel、カナダ銀行など、16社が出資

筐体は3 m x 3 m。重量約1トン。内部は15mk極低温状態で動作
最新機種で\$15M（約16億円）

グーグルは従来型デスクトップPCの10の8乗倍の性能
を発揮したと発表



出所) D-wave Systemses メディア向け資料
<https://www.dwavesys.com/resources/media-resources>

出所) Googleブログ
<https://research.googleblog.com/2015/12/when-can-quantum-annealing-win.html>

D-Waveの実現には、日本の研究成果が貢献

磁束量子パラメトロン (QFP) による 量子ビットの信号増幅

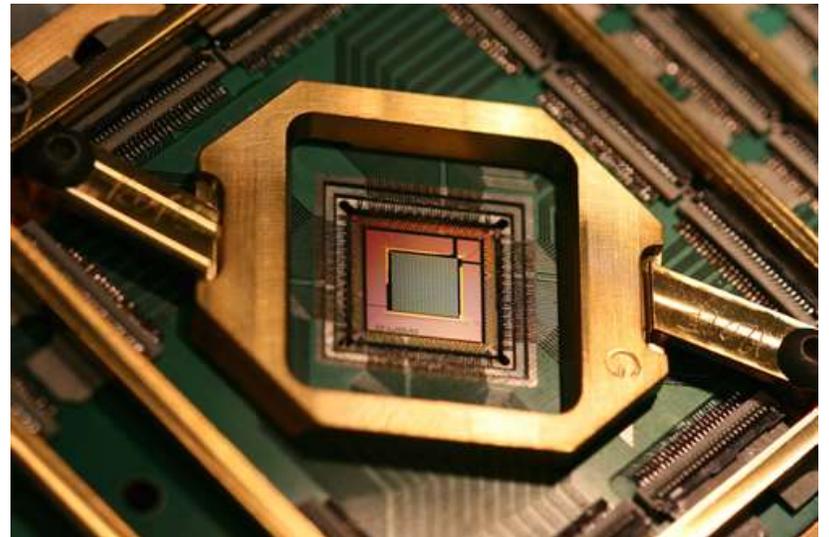
東京大学 後藤教授 (故人) と日立製作所
の共同研究プロジェクトで誕生

超伝導回路による量子ビット発生

NEC 基礎研究所 中村 (現 東大)、
Tsai (現 理化学研究所) 研究成果の応用

解導出方法の基礎理論

「横磁場イジングモデルにおける量子アニーリング」
(1998年) 東工大 西森教授、門脇正史氏



出所)

・ [量子コンピュータ5] 基礎技術は日本で生まれた 日経コンピュータ
<http://tech.nikkeibp.co.jp/it/article/COLUMN/20140514/556568/?P=2>
・ 「量子コンピュータが人工知能を加速する」 (西森秀稔、大関真之)

出所) D-waveSystemes メディア向け資料

<https://www.dwavesys.com/resources/media-resources>

量子コンピュータブームの再来

加熱する量子コンピュータのハードウェア開発

量子コンピュータのアプリケーション

今後の展望

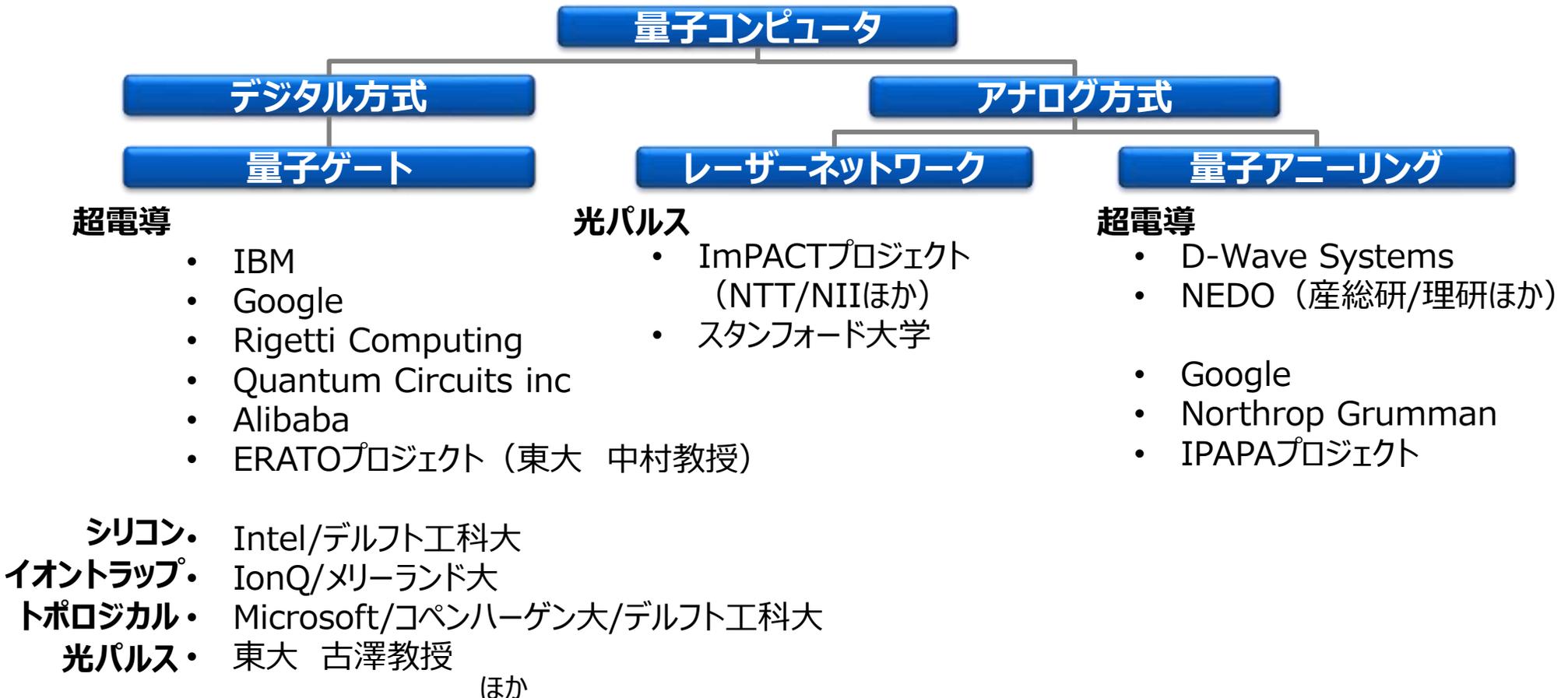
量子コンピュータの実現方式

- **デジタル方式、アナログ方式**の2種類に大別。計算に量子状態を利用するが、**実現方式は全く異なる**。
- アナログ方式は「可能な限り良い解を探す」最適化問題を解くための、専用機

		デジタル方式	アナログ方式
研究開始時期		1980年代～	2000年代～
位置づけ		古典コンピュータの上位互換	最適化計算用演算装置
回路・計算方法		論理回路（量子ゲート）を構築	量子ビットで多次元格子を形成
解くことができる問題		素因数分解、DB探索 多体系の計算	組合せ最適化問題 （目的関数を解く）
必要な学問知識		量子情報処理	数理最適化、統計物理
利用 ※	機器提供	なし	D-Wave
	クラウドでの提供	IBM、Rigetti、Alibaba	D-Wave、NTT

大手ITベンダーも参入し、ハードウェア開発競争が過熱

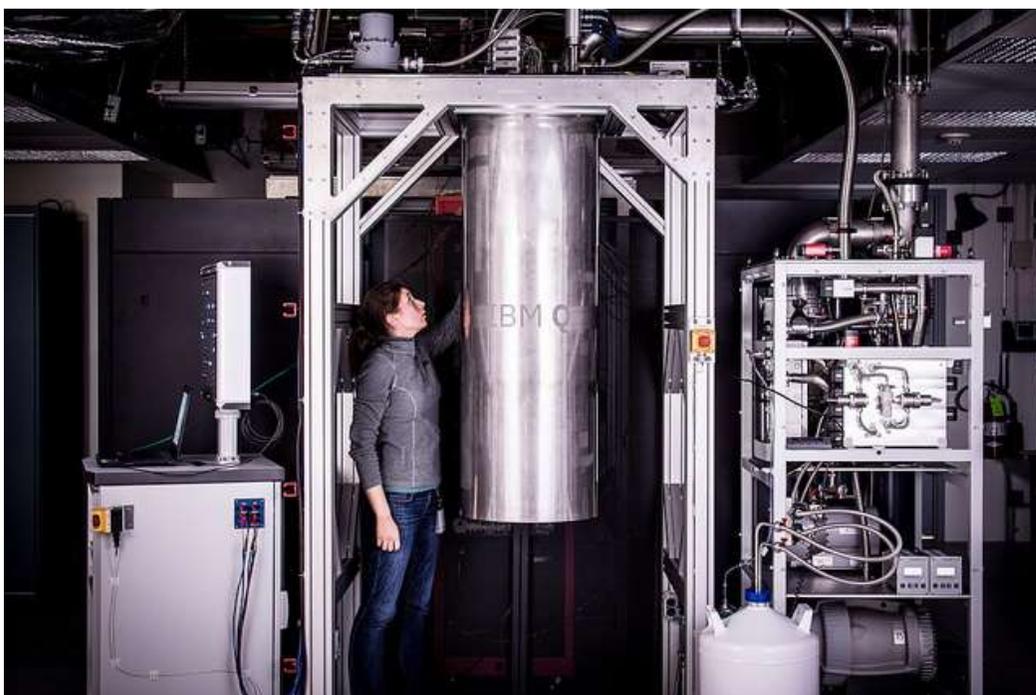
- 大学やメーカーに加え、**クラウドビジネスを提供する大手ITベンダーも開発に参入**
- 量子ビットを作るさまざまな方式が提案、試作がはじまっている



IBM ハードウェア開発で先行。 5 Qubit版2台、16Qubit版1台の量子ゲートマシンをクラウド上で一般公開

- 「IBM Q」公開中。誰でも無償でIBM社にある量子コンピュータを実際に利用できる（要ユーザ登録）
- 有償のパートナー企業は、20Qubit版の量子コンピュータを利用可能

IBM Q ハードウェア概観



IBM Q Network操作画面



出所) IBMリサーチ
https://www.flickr.com/photos/ibm_research_zurich/34662903516/in/album-72157663611181258/

出所) IBM Q Network
<https://quantumexperience.ng.bluemix.net/qx/editor>

Google

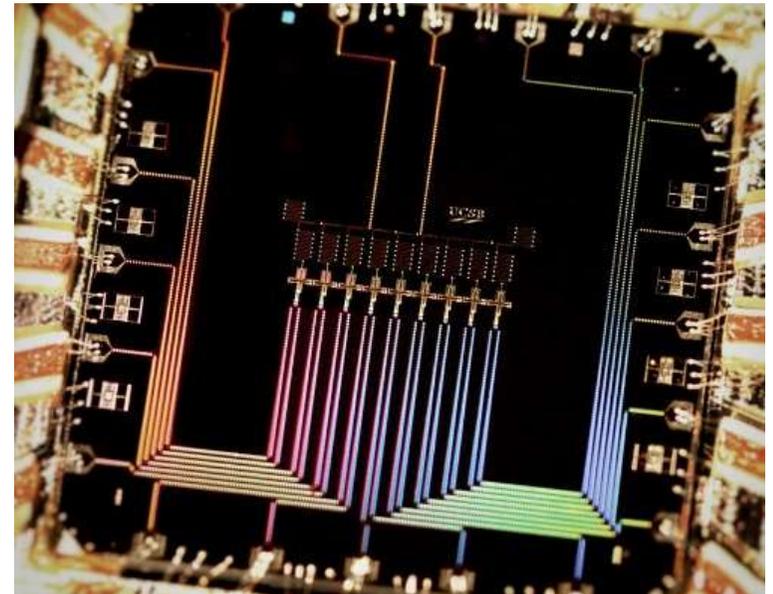
量子コンピュータの権威が所属する研究室ごと、Quantum A.I. Labに吸収

- 2014年、**JOHN MARTINIS教授**（カリフォルニア大学サンタバーバラ校）を招へい
- 量子コンピュータが安定して稼働できる技術をテーマに研究を進めており、Quantum Error Correction (QEC) という機能がプロセッサに実装してエラーを検出してエラー発生を抑える研究では権威。2014年に5 Qubit版、2015年に9Qubit版の量子チップを開発済み

Google
Quantum
A.I. Lab



9Qubit版の量子チップ

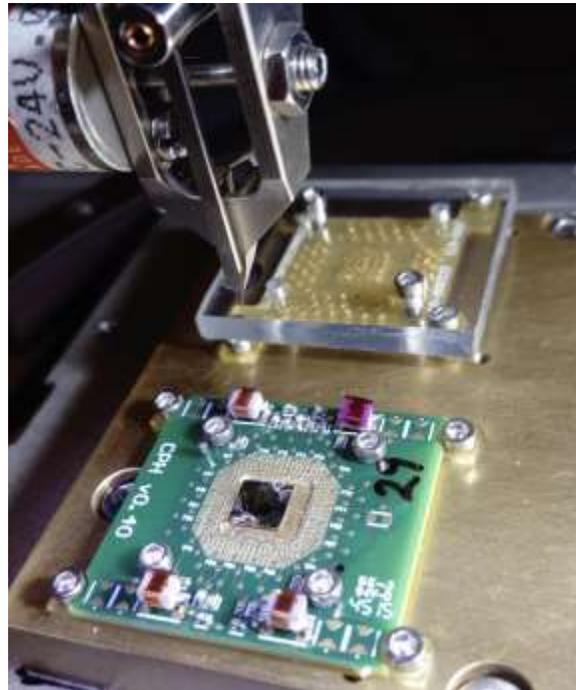


出所) UCSBニュース
<http://www.news.ucsb.edu/2014/014064/and-fritz-london-memorial-prize-goes-to%E2%80%A6>

出所) UCSBマルティネス研究室
<https://web.physics.ucsb.edu/~martinisgroup/index.shtml>

Microsoft 新方式の量子コンピュータ開発に着手

- マヨラナフェルミオンを用いた**トポロジカル量子コンピューターを開発中**。Ignite2017にて、試作機公開
- 量子コンピュータに関する先端研究を行う世界中の大学、研究機関と連携中
 - デルフト工科大学、ニールスボーア研究所、シドニー大学、パデュー大学、メリーランド大学、チューリヒ工科大学



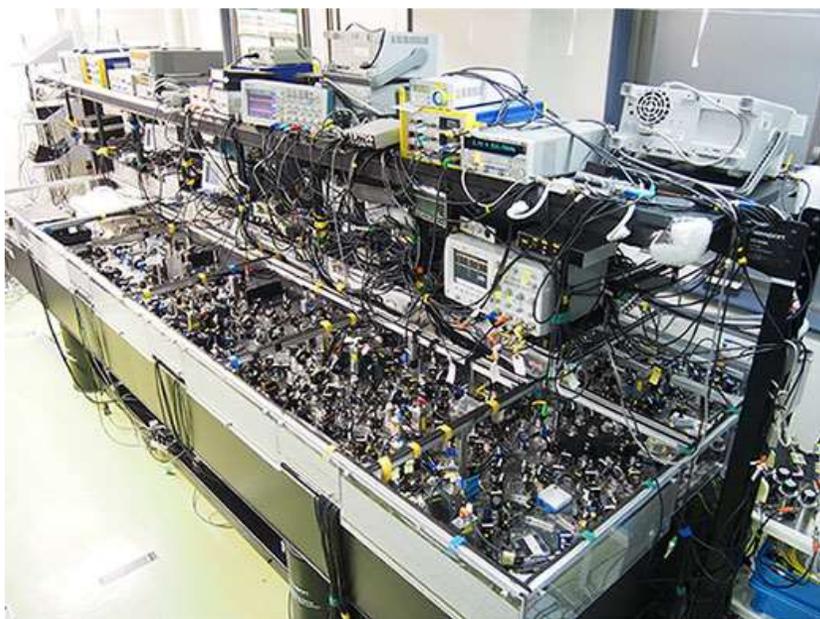
出所) Microsoft
<https://news.microsoft.com/ja-jp/features/general-purpose-quantum-computing-moves-closer-to-reality/>

日本における取り組み

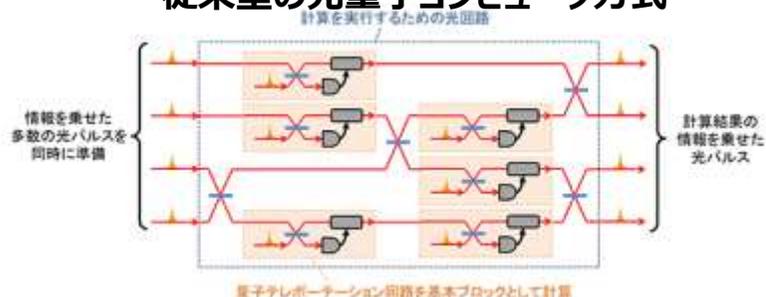
①東京大学 古澤 教授、武田 助教

- **ループ構造を持つ光回路**を用いて、計算の基本単位となる「量子テレポーテーション」回路 1 個を無制限に繰り返して大規模量子計算を行う研究を実施。**2017年9月に、「実現法を発明」したと発表**
 - 成功すれば、原理上、100万個以上の量子ビットの処理が可能
- 科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業（CREST）の助成を受けて実施

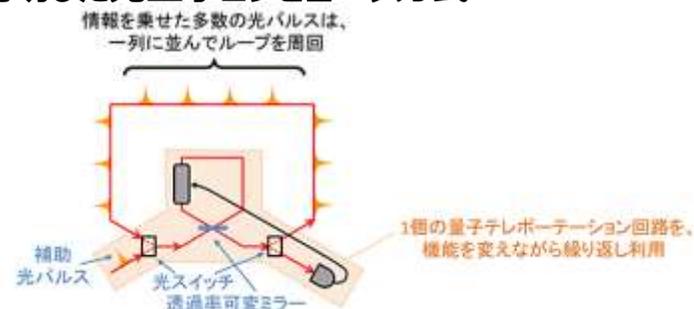
量子テレポーテーション回路（2013年に開発）



従来型の光量子コンピュータ方式



今回発明した光量子コンピュータ方式



出所) JST 東京大学

<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20170922/index.html>
Copyright(C) Nomura Research Institute, Ltd. All rights reserved.

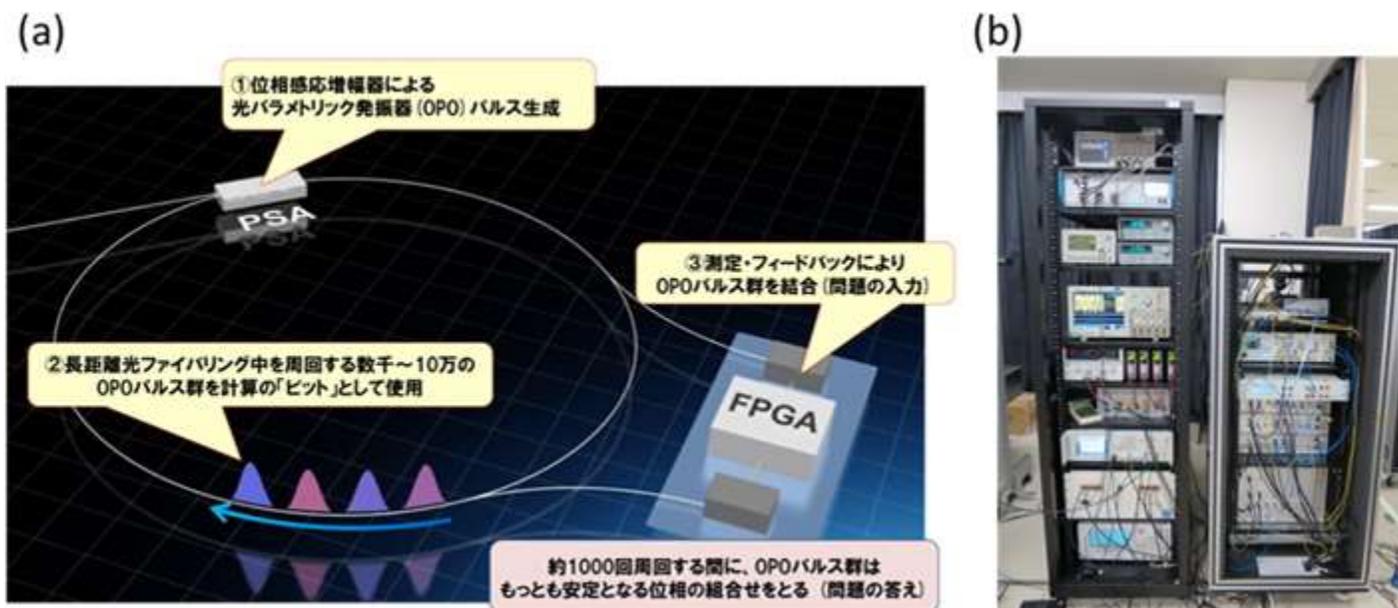
出所) JST 東京大学

<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20170922/index.html>

日本における取り組み

②ImPACTプロジェクト（NTT、国立情報学研究所）

- 光ファイバー内のレーザーパルスを量子ビットとして計算を行う。組合せ最適化問題用計算機
- 2017年11月より、「QNN（量子ニューラルネットワーク）」として、クラウド上で一般公開中
- クラウド公開中の計算機は、パルスを外部装置を用いて計測。FPGAで計算した変調パルスを光ファイバループに戻す。量子ビットは利用するが、量子のもつれ（量子エンタングルメント）が確認されていないため、量子コンピュータと呼べるかどうかの議論がある



出所) 日本電信電話株式会社 (NTT)、情報・システム研究機構 国立情報学研究所、東京大学 生産技術研究所、科学技術振興機構 (JST)

<http://www.ntt.co.jp/news2017/1711/171120a.html>

量子コンピュータブームの再来

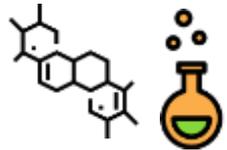
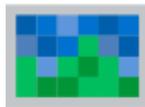
加熱する量子コンピュータのハードウェア開発

量子コンピュータのアプリケーション

今後の展望

量子コンピュータの適用先

- デジタル方式は、HPCを使っても解導出が困難な計算での利用に適する。**創薬などの化学分野や新素材開発**など。
- 近年は、最適化問題に特化したD-Waveの登場により、大量データを扱った**人工知能向けの活用**（機械学習のクラスタリングやボルツマン機械学習向けサンプラー）、クオンツ（金融工学）への適用に関心が集まる

	デジタル方式	アナログ方式	
アルゴリズム	量子アルゴリズム（素因数分解、DB探索 多体系計算など）	組合せ最適化問題	
適用先	<p>暗号 暗号解析、 暗号通信</p>  <p>量子検索 ビッグデータ検索</p>  <p>量子シミュレーション 量子化学、 創薬、シミュレーション</p>  <p>量子ダイナミクス エネルギー、 原子物理</p>  <p>物性物理 （資材開発）</p> 	<p>最適化 医療診断</p>  <p>タンパク質 折り畳み</p>  <p>大規模 経路探索</p>  <p>機械学習 画像判定、 パタン認識</p>  <p>教師なし分類</p>  <p>モンテカルロシミュレーション クオンツ、 ポートフォリオ</p> 	<p>ボルツマン 機械学習 サンプリング マシン</p>

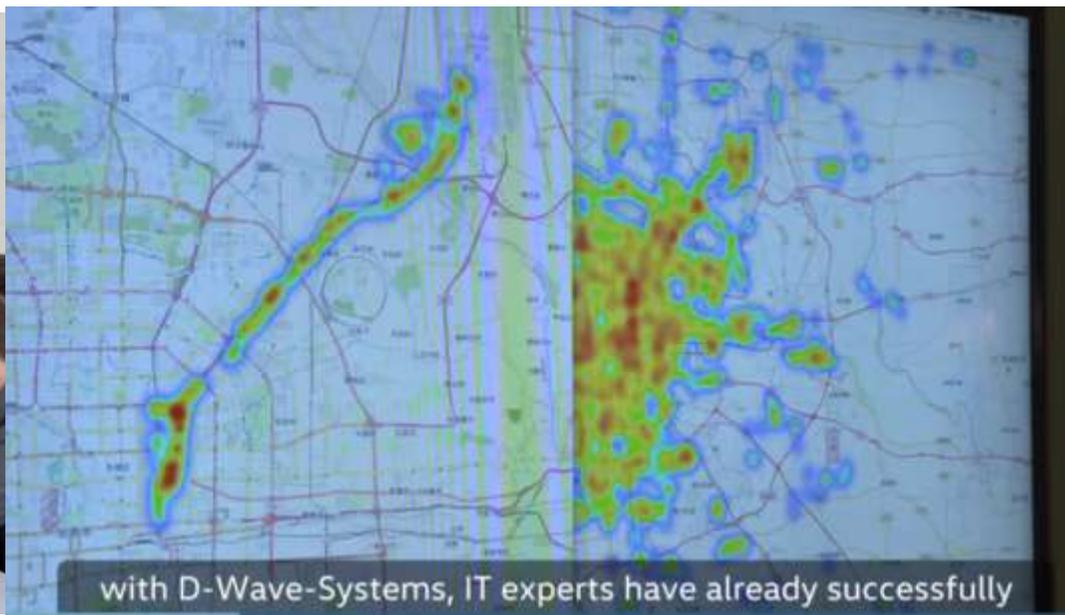
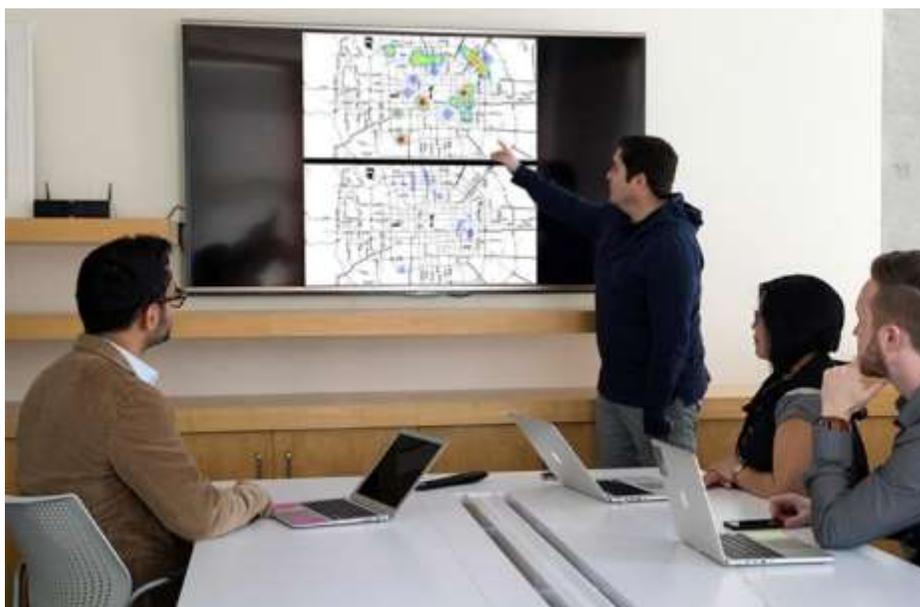
D-Waveを利用する企業、活用テーマ

■ 軍事企業、国家組織だけでなく、**グーグル**や**金融機関**、**自動車メーカー**も利用

企業・組織	活用目的	概要
グーグル	動体認識	<ul style="list-style-type: none"> ・2×10^4個の画像データを用いた自動車認識の精度確認を実施。 ・QBoostアルゴリズムを開発
	機械学習 (画像認識)	<ul style="list-style-type: none"> ・Googleグラス操作のための、まばたき判別アルゴリズムを開発 ・顔認識アルゴリズム開発
CMEグループ	ポートフォリオ最適化	<ul style="list-style-type: none"> ・アービトラージ（裁定取引）の最適化検証
		<ul style="list-style-type: none"> ・FXマーケット予測
NASA	スケジュール最適化	<ul style="list-style-type: none"> ・火星探査ロボットの行動計画最適化の研究 ・宇宙ステーション内の実験スケジュール最適化の研究
	データ融合	<ul style="list-style-type: none"> ・ボルツマン機械学習のサンプラーとして利用
ロッキードマーチン	ソフトウェアのバグ発見	<ul style="list-style-type: none"> ・ボルツマン機械学習のサンプラーとして利用
フォルクスワーゲン	交通量シミュレーション	<ul style="list-style-type: none"> ・中国都市部の交通量を最適化する研究を実施
ロスアラモス研究所	アプリケーション開発	<ul style="list-style-type: none"> ・多体シミュレーション ・大規模グラフ処理（ソーシャルグラフ、たんぱく質相互作用） ・物体識別（ボルツマン機械学習のサンプラーとして利用）
ハーバード大	たんぱく質解析	<ul style="list-style-type: none"> ・格子タンパク質折り畳みモデルの折りたたみパターンを予測

フォルクスワーゲンのルートシミュレーション

- 渋滞問題が顕著な北京の約420台のタクシーデータを使って、**市内の全公共タクシーの移動時間を最適化**を検証。量子コンピュータに適したアプリケーション分野を特定することが目的
- 2017年11月には量子コンピュータの応用に関する、**グーグルとの協業**を発表



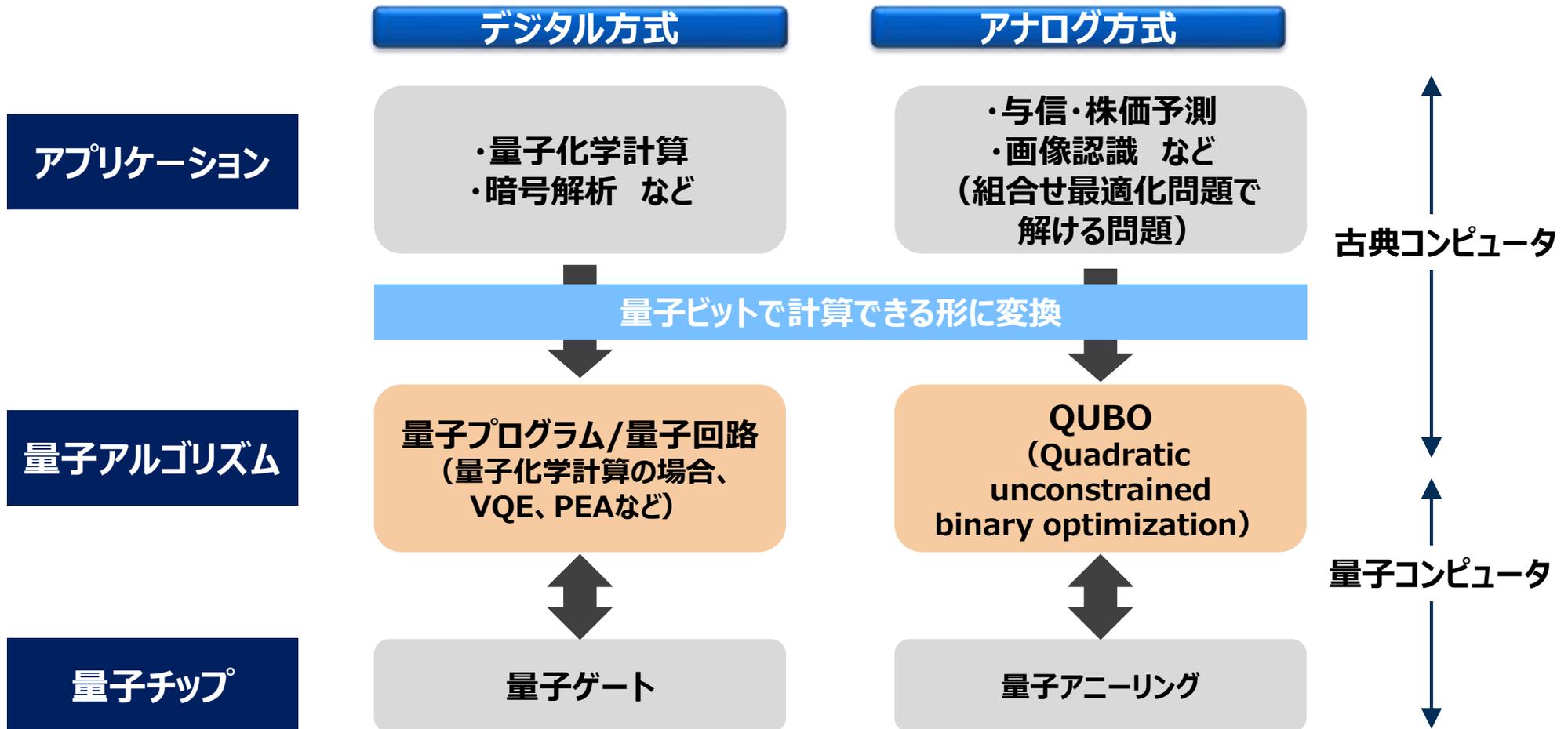
出所) Volkswagen AG
<https://www.volkswagenag.com/en/news/stories/2017/03/the-beginnings-of-a-quantum-leap.html>

量子ゲート型コンピュータの開発を進める大手ITベンダーは、量子シミュレーションに関心。 将来の量子コンピュータ普及に備え、ソフトウェア開発環境を公開

- なかでも、創薬につながる量子化学（Quantum Chemistry）計算は注力分野
- アンモニア合成の「ハーバー・ボッシュ法」を革新する製造プロセス解明を目指す

	IBM	Microsoft	Google
研究部門	IBM Q	QuArC (Quantum Architectures and Computation Group)	Quantum A.I. Lab
主な取り組み	・水素化ベリリウム(BeH ₂)の最低エネルギー状態(基底状態)を求める6Qubit向けアルゴリズムを開発したと発表 (2017/9/20)	・ブログ「What problems will we solve with a quantum computer?」(2017/7)にて「窒素固定(nitrogen fixation)プロセスの反応機能解明に適用できる」と言及	・マイクロソフト、IBMと比べて後発だが、量子化学研究者がQuantum A.I. Labに参画。
ソフトウェア開発	・クラウド公開中の量子コンピュータを利用するためのライブラリ QISKit を公開	・プログラミング言語 Q# を公開。30Qubitのシミュレーターをローカルマシンで利用できる。	・量子化学計算用ライブラリのオープンプラットフォームである Open Fermion を公開。

実際に量子コンピュータを利用する場合には、 量子アルゴリズムが必要



量子コンピュータブームの再来

加熱する量子コンピュータのハードウェア開発

量子コンピュータのアプリケーション

今後の展望

IBMやGoogleは、“量子超越性”の実現を目指す。 50Qubit級の量子コンピュータの数年内でのクラウドサービス化を宣言

- “量子超越性”は、量子コンピュータが従来型のコンピュータでは実現不可能な計算能力を備えていることを示す用語

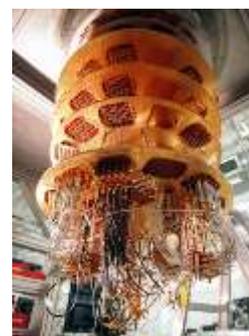
IBM

- ・“量子システムおよびサービス「IBM® Q」は、**IBMクラウド・プラットフォームを通じて提供**”
- ・“ 商用の**最大50量子ビットのIBM Qシステム**を今後数年間で構築し、従来型システムを超える能力を実証することを目指す”
(2017年3月 IBMプレスリリース)

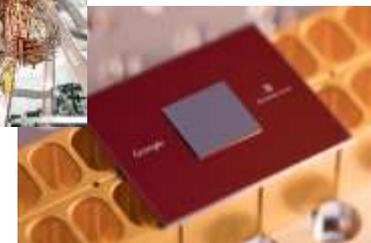


Google

- ・“アナログ、デジタルのハイブリッド方式の量子コンピュータを**5年以内に商用化する**”
(2017年3月 雑誌Natureに寄稿)
- ・“**2017年中に49Qubitのチップ**を製造、性能検証を実施する”
(2017年6月 spectrumにて紹介)
- ・**72Qubit**を搭載した、「Bristlecone」を開発
(2018年3月 Googleブログにて発表)



Bristleconeチップ



出所)

<http://spectrum.ieee.org/tech-talk/computing/hardware/ibm-expanding-cloud-quantum-computer-10fold>

<http://spectrum.ieee.org/computing/hardware/google-plans-to-demonstrate-the-supremacy-of-quantum-computing>

<https://research.googleblog.com/2018/03/a-preview-of-bristlecone-googles-new.html>

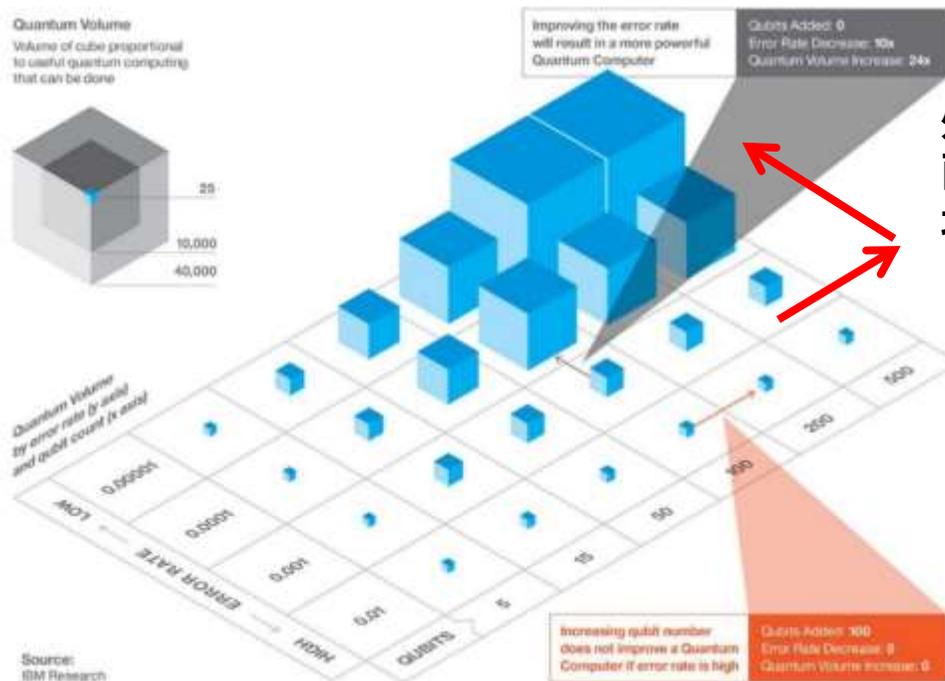
量子超越性≠実用的。 エラー訂正を実現した、汎用量子コンピュータの登場に期待

- ノイズの影響や量子ビットの演算操作が影響し、計算誤差発生率（エラー率）が上昇
- 汎用（ユニバーサル）量子コンピュータは、エラー訂正が施された量子コンピュータ。
実現には、数万～数億量子ビットが必要

IBM “Quantum Volume”

A Quantum Computer's power depends on more than just adding qubits

If we want to use quantum computers to solve real problems, they will need to explore a large space of quantum states. The number of qubits is important, but so is the error rate. In practical devices, the effective error rate depends on the accuracy of each operation, but also on how many operations it takes to solve a particular problem as well as how the processor performs these operations. Here we introduce a quantity called **Quantum Volume** which accounts for all of these things. Think of it as a representation of the problem space these machines can explore.



処理性能向上とエラー発生率抑制とを両立させる場合、必要な量子ビットが増加する

出所) IBMリサーチ

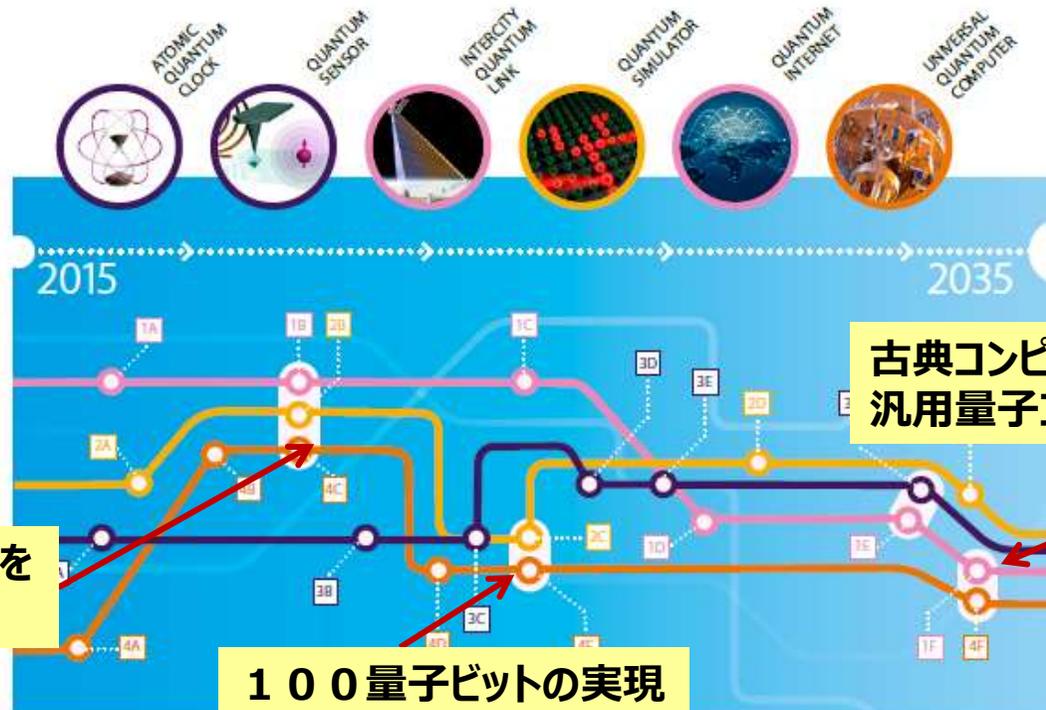
https://www.flickr.com/photos/ibm_research_zurich/34662903516/in/album-72157663611181258/
Copyright(C) Nomura Research Institute, Ltd. All rights reserved.

汎用量子コンピュータの実現は、2030年以降？

■ EUの量子コンピュータ開発プロジェクトでは、汎用量子コンピュータの開発ロードマップを公開

- 0~5年：コア技術の開発、新たな量子アルゴリズムの発見
- 5~10年：100Qubit級チップの開発。小型化
- **15~20年：汎用量子コンピュータの開発。**ヨーロッパ主要各都市を結ぶ、量子ネットワーク網の構築

Quantum Technologies Timeline



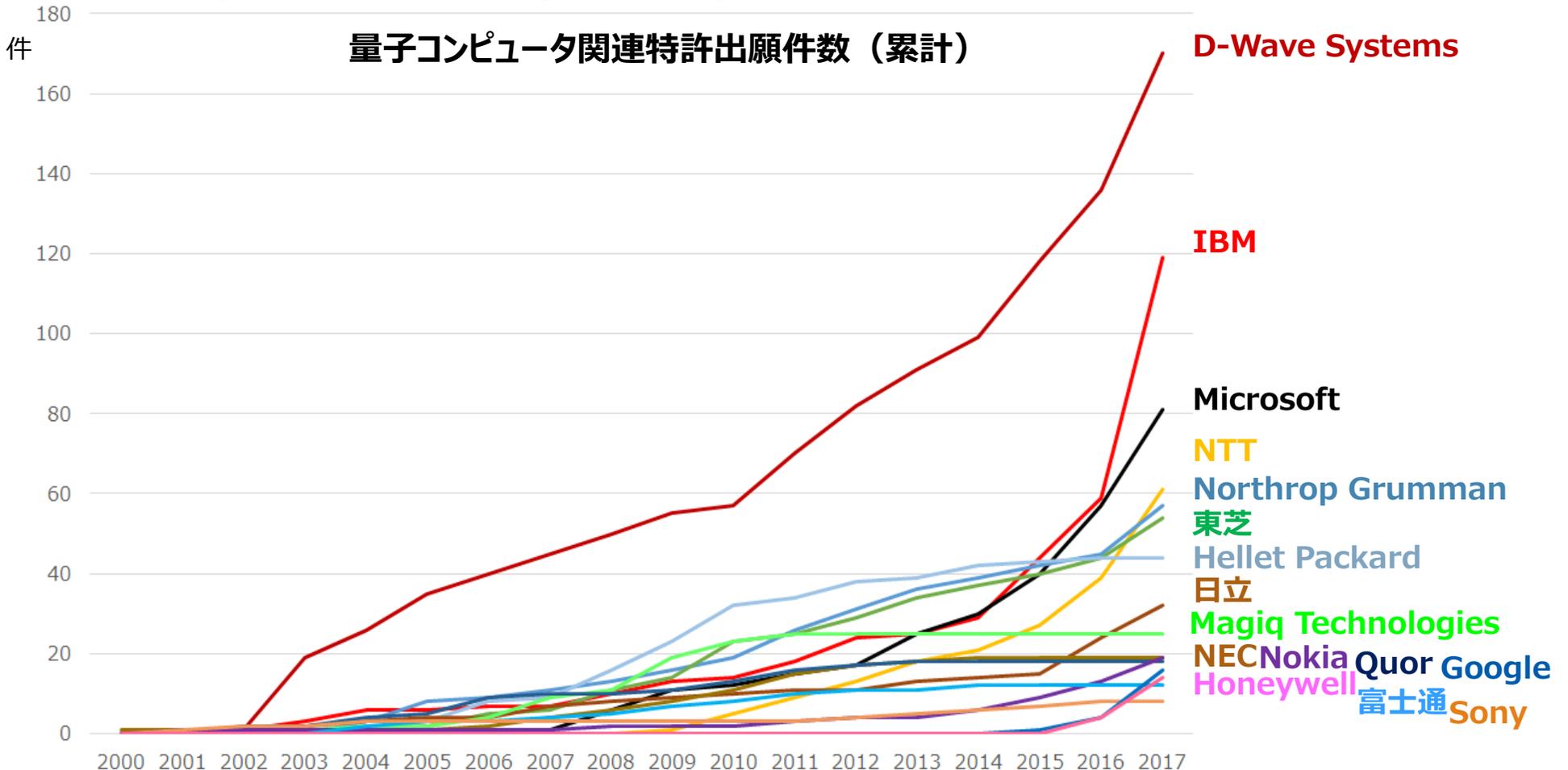
信頼性のあるアルゴリズムを少量の量子ビットで実行

100量子ビットの実現

古典コンピュータの性能を凌駕する汎用量子コンピュータの実現

量子コンピュータ特許では、日本企業も健闘しているが、近年は海外勢が躍進

■ **D-Wave Systems**が突出。GoogleやHoneywellは、2016年以降増加



海外では、巨額予算のプロジェクトが進展中

- **数百億～数千億円規模**の国家プロジェクトがスタート
- 日本の開発プロジェクトと比べると、**海外は長期・大型案件化**

国家プロジェクト



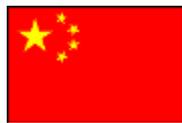
・国防省などが**毎年2億ドル（約210億円）**を投資



・2019年から**10年間に10億ユーロ（約1,310億円）**を投資



・**5年で2億7000万ポンド（約390億円）**の研究資金を英国工学・物理科学研究会議に量子情報分野向けとして出資



・社会科学院所属の「量子技術研究開発センター」を2020年に開設予定。**総工費100億ドル（約1兆円）**



・量子コンピュータ研究に**10年間で10億スウェーデンクローナ（130億円）**を投資



・光・量子飛躍フラッグシッププログラムで**2018年度予算で22億円を申請（7～9億円／拠点／年。原則5年、最長10年間）**

ITメーカー、クラウド事業者

Intel

・QuTech社に**5000万ドル（約52.6億円）**出資

IBM

・半導体、量子コンピュータやニューロシナプティックなどのポストシリコン技術に**5年間で30億ドル（3,160億円）**投資

Microsoft

・コペンハーゲン大学のニールス・ボーア研究所と新たなR&D拠点を共同設置（**数百万ドル投資**）

アリババ

・**3年間で150億ドル（約1.6兆円）**を投入。データ・インテリジェンス、量子コンピューター、IoT、HCIなどの研究開発を推進

量子コンピュータ向けのソフトウェア・スタートアップが登場

■ カナダや米国が中心。AIやセキュリティ、化学計算など

カナダ

1QBit	金融、エネルギー、ライフサイエンス、先端材料などを中心に、企業のビジネス課題の解決を目指す（ 富士通と協業、アクセンチュアと戦略的提携 ）
Anyon Systems	量子コンピュータ デバイス開発のためのシミュレータを開発
Artiste-qb.net	量子化学計算のためのソフトウェア開発
Everettian Technologies	量子機械学習を用いた実世界の問題解決に取り組む
evolutionQ	量子コンピュータ時代のセキュリティ、リスクアセスメントを提供
ISARA	次世代のセキュリティを開発
Quantum Benchmark	量子コンピュータ ハードウェア設計の支援ツールを提供

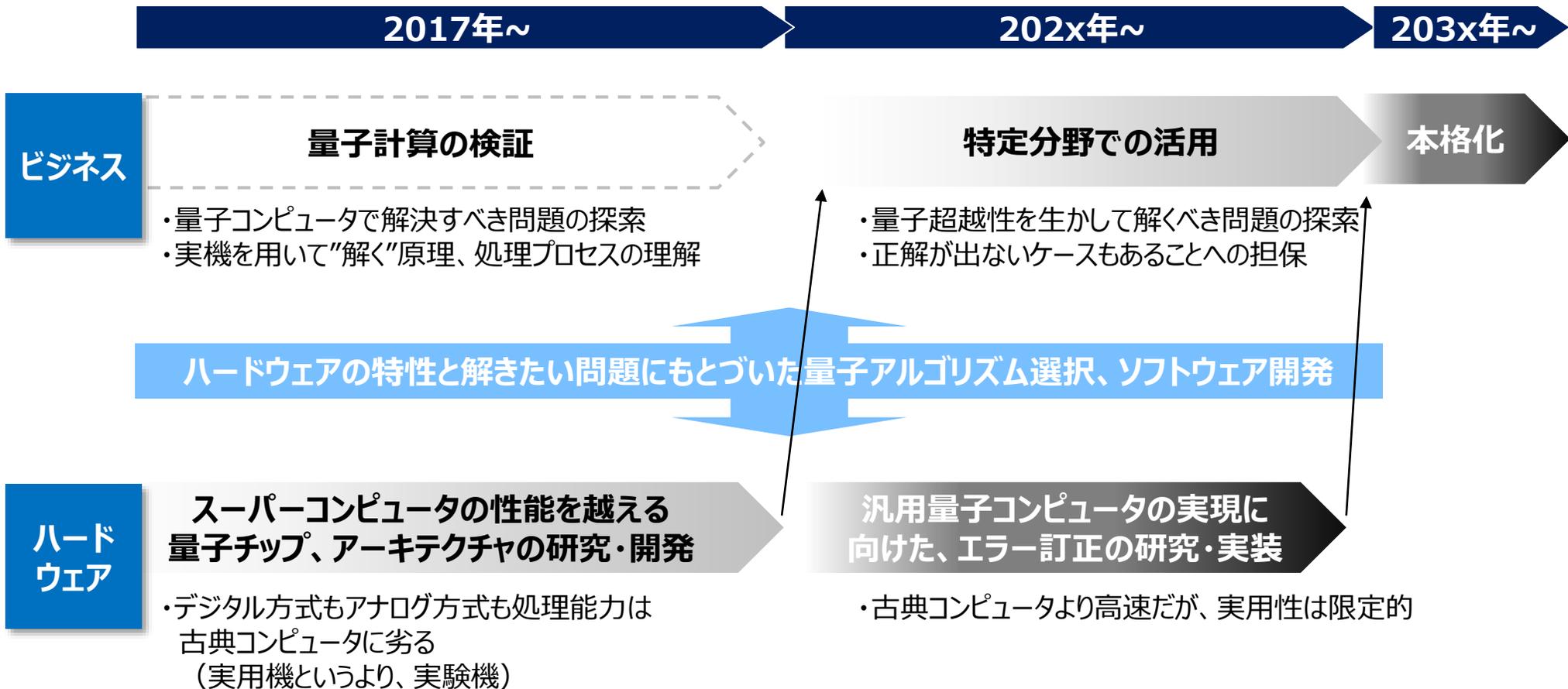
米国

QbitLogic	量子コンピュータ向けのAIアルゴリズム開発
QC Ware	量子コンピュータのPaaS提供を目指す。 NASAやUSRAが顧客
QxBranch	金融、保険、航空業界向けのデータ分析、AI、量子コンピュータ活用支援を提供。 Aerospace Concepts社からのスピンオフ
Zapata Computing	量子コンピュータ用化学アプリケーションを開発

欧州

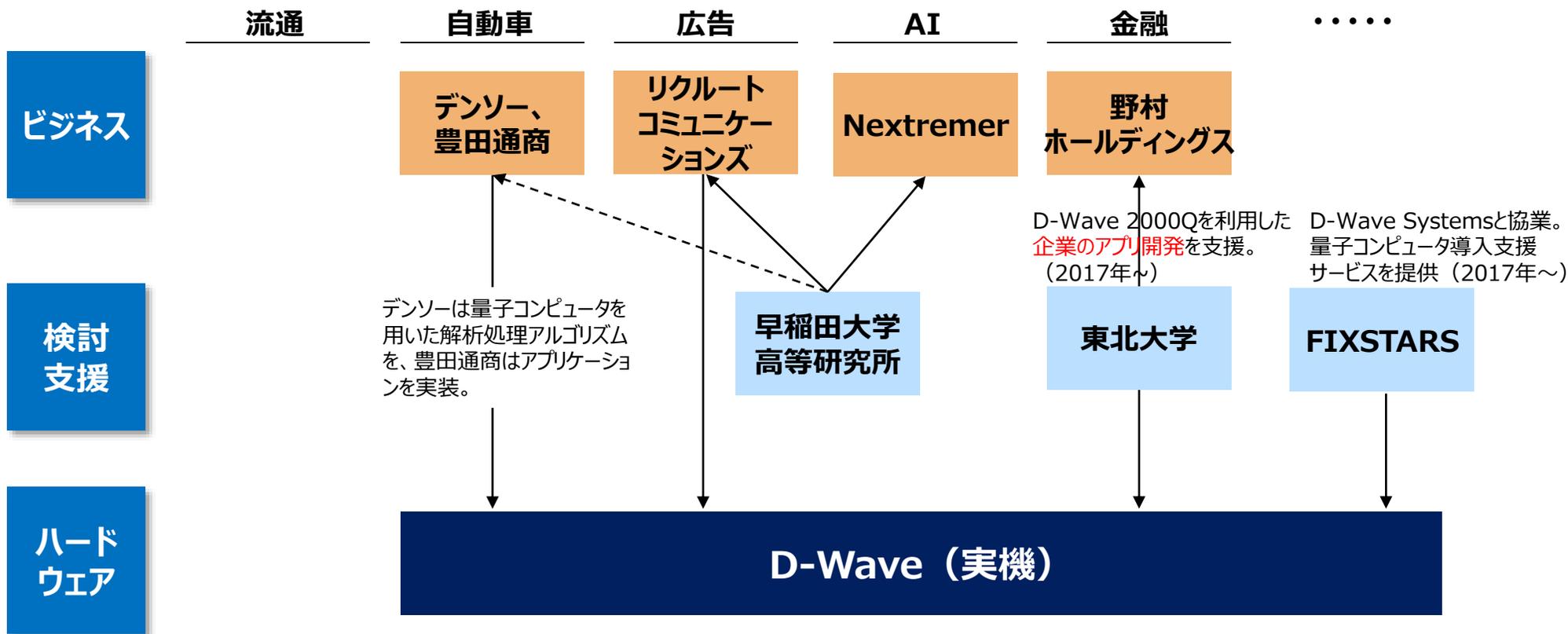
Cambridge Quantum Computing	量子コンピュータ向けOSを開発
IDQ	量子暗号ソリューションを開発

現時点の量子コンピュータ市場は萌芽期。過度な期待は禁物。 ビジネス適用に向けては、ハードの特性理解と解くべき問題の探索が必要



国内では、利用可能な量子コンピュータの実機（D-Wave）を活用し、量子状態による解導出の可能性を検証

- アナログ方式の量子コンピュータを利用するため、**実問題の組み合わせ最適化問題への落とし込みが必要**
- 量子アニーリングの研究を行う早稲田大学高等研究所や東北大学などが支援



IBMは、50Qubit量子コンピュータの提供に備え、自社製量子コンピュータのビジネス活用を検討するコミュニティ「 IBM Q Network 」を設立

- 日本より、**JSR、日立金属、本田技術研究所、長瀬産業、慶應義塾大学が参画**
- 参加メンバーは、20Qubitの量子コンピュータを利用可。次世代（50Qubit）機のアクセス権もオファーされる

ニュースルーム | ニュースリリース
IBM、量子コンピューティングの開発を加速する
IBM Q Networkを発表、日本から、JSR、日立金属、本田技術研究所、長瀬産業、慶應義塾大学が参画、ビジネスおよびサイエンス向けの量子コンピューティングの実用的用途を探求

Select a topic or year

↓ ニュースリリース

↓ 関連する XML feeds

TOKYO - 18 12 2017:
2017年12月18日

【米国ニューヨーク州ニューヨークタウン・ハイツ - 2017年12月14日（現地時間）発】
IBM (NYSE: [IBM](#)) は本日、IBM Q 早期アクセス版量子コンピューティング・システムを活用し、ビジネスとサイエンスに重要な、実用的な用途を探求する最初のお客様を発表しました。JP Morgan Chase、Daimler AG、Samsung、JSR、Barclays、日立金属、本田技術研究所、長瀬産業、慶應義塾大学、オックスブリッジ国立研究所、オックスフォード大学、メルボルン大学をはじめとする企業・大学・研究機関です。



この初期12メンバーは、新しく設立された [IBM Q Network](#) (英語) に参加します。このネットワークは、世界有数の Fortune 500 企業、学術研究機関、国立研究所のコラボレーションであり、IBMと直接連携し、量子コンピューティングを進化させるのが目的です。また、IBM Q Network は、IBMのオープン・ソースの量子ソフトウェアと開発者ツールに基づく量子コンピューティング・エコシステムの拡大も推進します。

50Qubitのハードウェアを試作（2017年11月発表）



出所) IBMリサーチ

<http://www-03.ibm.com/press/jp/ja/pressrelease/53520.wss>

Copyright (C) Nomura Research Institute, Ltd. All rights reserved.

出所) IBMリサーチ

https://www.flickr.com/photos/ibm_research_zurich/38239092692/in/photostream/

量子コンピュータのビジネス活用への備え

- 短期では、アナログ方式の量子コンピュータ本体の性能評価とビジネス適用の有効性評価から
- 長期では、新産業の創出に向けた量子アルゴリズム、ソフトウェア開発も視野に

デジタル方式

アナログ方式

視点

- ・10~15年後のビジネス適用を想定
- ・新産業の創出

- ・3~5年でのビジネス適用を想定
- ・AI（機械学習）開発の高度化

有望領域

創薬、化学

量子
セキュリティ

その他

サプライ
チェーン

マーケ
ティング

金融工学

アクション

量子アルゴリズムの活用、新アルゴリズム開発

組合せ最適化問題で解くべき問題の探索

量子クラウドサービスへの実装

ハード
ウェア

- ・Google、IBM、Microsoft
- ・Rigetti Computing、IonQ ほか

- ・D-Wave Systems、NTT など
- ・（参考）富士通、日立 ※

※D-Waveと同様の計算方式を古典コンピュータで実現する新型ハードウェアを開発中

まとめ

- 量子コンピュータの第二次ブームが到来
「アナログ方式」量子コンピュータの登場。D-Waveが先行。国家プロジェクトもスタート
「デジタル（量子ゲート）方式」は、大手クラウド事業者参入で開発競争が過熱

量子コンピュータの利用シーン

- アナログ方式：組み合わせ最適化問題が適用可能な分野。AIやクオンツなど
- デジタル方式：量子シミュレーションによる創薬、化学
 - ・将来的には汎用量子コンピュータへと進化し、利用シーンを拡大

提言

- 量子コンピュータのハードウェア開発には、長期ロードマップ、大規模投資が不可欠。
国は既存の枠組みを超えた強力なリーダーシップで開発を主導すべき。
- 量子コンピュータが真価を発揮する問題とは何か？。ハードウェア毎の特性を加味した
“解くべき”問題の探索と量子アプリケーション開発、ソフトウェア技術者の育成を。