

## 1 NISQとは

現在の量子デバイスはその物理的性質上、計算のノイズの影響を受け易く、エラーを完全に除去できない。このようなデバイスをNISQ(Noisy Intermediate-Scale Quantum device)といい、ノイズを含む数百量子ビットまでの小中規模デバイスである。NISQでは計算結果にエラーを含むこと、深い量子回路はコヒーレンス状態を保つことができないため、VQE(Variational Quantum Eigensolver)など浅い量子回路と古典コンピュータを組み合わせたアルゴリズムが考案され、実用に向けた研究が行なわれている。

## 2 フォールトトレラント量子コンピュータ(FTQC)

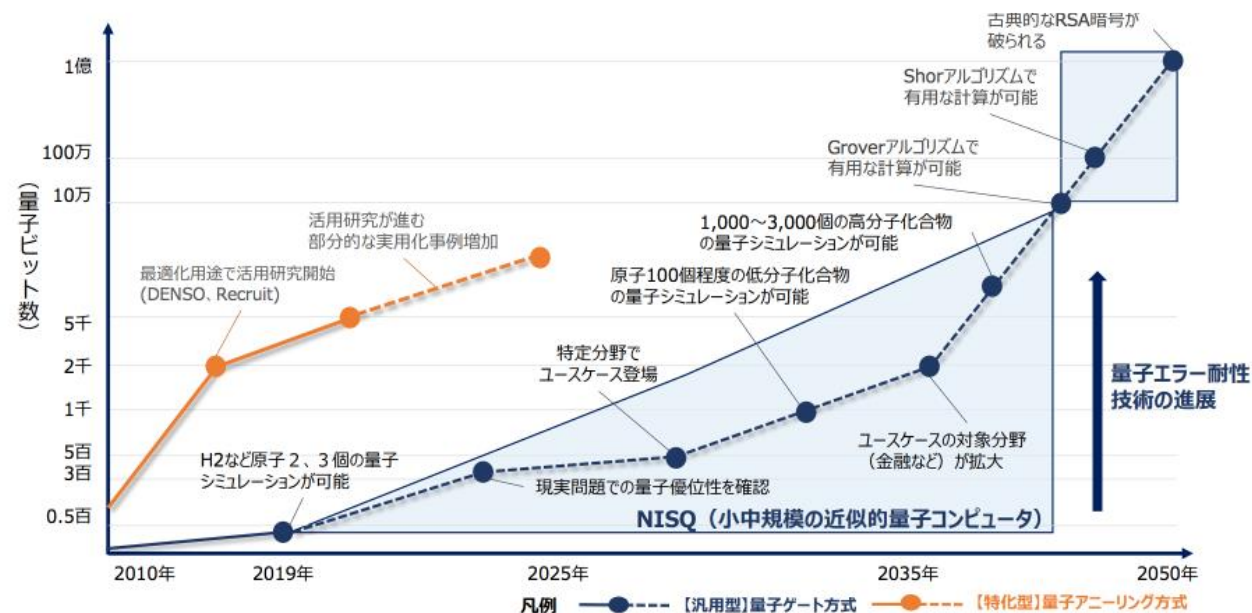
フォールトトレラント量子コンピュータ(FTQC)とは量子デバイスのエラー訂正機能により、ノイズなどのエラーの影響がなく、正しい結果を提供することができる。現在の量子デバイスでは、エラーのない量子ビット(論理量子ビット)を構築するためには1000程度の物理量子ビットが必要だと言われている。

## 3 量子超越性とは

量子超越性とは、ある特定分野での計算において量子コンピュータがスパコンを含む古典コンピュータの性能を上まわることをいう。2019年11月Googleは量子超越性に関する論文を発表した。そして2022年6月にはXanaduは光量子コンピュータであるBorealisを使って、量子コンピュータの計算能力が従来のスーパーコンピュータを上回ることを示す「量子超越性」を持つことを実証した。NISQにしてもFTQCしても実用的な領域において「量子超越性」を達成することが、実用化の鍵となる、

## 4 量子コンピュータの実用化に向けた展望

以下に量子コンピュータの実用に向けた展望を示す。



Copyright (c) 2020 The Japan Research Institute, Limited

参考文献「量子コンピュータの概説と動向」p.61 量子コンピュータの展望より

## 5 参考文献

[量子コンピュータの概説と動向](#)

[量子コンピュータとは | 古典コンピュータとの違い、実用化の最前線、AIとの関係まで](#)

## 1 量子コンピュータのエラー

量子コンピュータを構成する量子ビットは0、1のみの古典コンピュータのビットと異なり、アナログ状態を保持しているため、ノイズの影響を受けやすい。ゲート操作においては一定の確率で量子ビットの値が反転する、つまりXゲートが作用するbit flip errorやより一般的なX、Y、Zゲートが作用するDepolarizing error、さらに回転角  $\Delta \theta$  がかかるcoherent errorがある。さらに測定時のエラーもある。

ゲートがいかに忠実にゲート操作を行うかの指標としてgate fidelityがあり、各ハードウェアベンダーは量子ゲート数の向上だけでなく、このfidelityの向上のたゆまぬ努力をしている。

例えば単一ゲートのfidelityが99.9%だとしても100個のゲート操作を行うと全体のfidelityは99%となる。

さらに量子状態を保つ時間にも上限がある。量子状態を保持する時間をコヒーレント時間というが、量子計算はこの時間内で行われなければならないので、回路の深さにも制限があり、複雑な処理を行うことはできない。

## 2 量子古典ハイブリッドアルゴリズム

NISQデバイスでの計算ではこのようにエラーとコヒーレント時間の制約をもとにアルゴリズムを設計しないといけない。そのために登場したのが、量子、古典ハイブリッドアルゴリズムである。これは量子コンピュータと既存の古典コンピュータが役割分担しながら、処理を行う。量子古典ハイブリッドアルゴリズムの代表格は量子化学計算のVQEである。

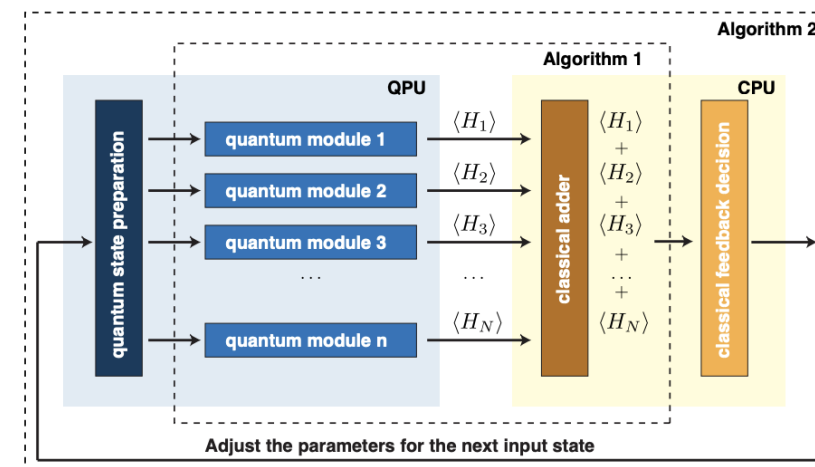
VQEは分子のハミルトニアンを初期値  $\theta$  を与えた規模の小さな量子変分回路によって行い、古典側では最適化を行い、 $\theta$  を収束する方向にもっていくことで、分子のエネルギーの基底状態を求める。

このようなハイブリッドアルゴリズムは組み合わせ最適化や機械学習でも用いられている。NISQデバイスにおいてエラーが発生することは本質的なので、実機で実行する際にはerror mitigationと呼ばれるエラー緩和の手法が取り入れられている。

### ibm\_nairobi

7	Status:	● Online	Avg. CNOT Error:	1.057e-2
Qubits	Total pending jobs:	522 jobs	Avg. Readout Error:	2.801e-2
32	Processor type ①:	Falcon r5.11H	Avg. T1:	118.97 us
QV	Version:	1.0.25	Avg. T2:	82.41 us
2.6K	Basis gates:	CX, ID, RZ, SX, X	Providers with access:	1 Providers ↓
CLOPS	Your usage:	0 jobs		

IBM Qのnairobiにおけるエラーやコヒーレント時間の情報、量子デバイスを公開しているベンダーはこのような情報をユーザーに提供している



## 1 量子ゲート方式の量子デバイスの種類

## ○量子ゲート方式の量子デバイスの種類

- ・量子ゲート方式の量子コンピュータを実現するため世界中の研究機関・企業がさまざまなデバイスに取り組んでいる。
- ・現在は量子ゲート方式では「超電導」が主流となっているが、コヒーレンス時間が長い「イオントラップ」にも注目が集まっている。

方式	原理	材料	現状の量子ビット数	コヒーレンス時間	スケール性	冷却	長所	短所	主要プレイヤー
超電導	ジョセフソン結合 (磁束型／電荷型／位相型)	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al	127	100 $\mu$ s	高い	必要 (mK)	集積化で有利	希釈冷凍機が必要	IBM Google Rigetti D-Wave
イオントラップ	イオンのエネルギー準位	Yb、Caイオン	160	15s	やや難	不要	コヒーレンス時間が長い	ゲート操作が低速	IonQ Honeywell
光	光子もしくは光波の偏光状態など	光／光学装置	18	0.15ms	高い	不要	常温、大気中で動作可能	一部の操作が確率的	XANADU PsiQuantum 東京大学
半導体量子ドット	量子ドットに閉じ込められた電子のスピン	Si/SiO <sub>2</sub> /Al	?	1 $\mu$ s	非常に高い	必要 (mK)	半導体技術が応用できる	コヒーレンス時間が短い	日立製作所 Cambridge大学

## 2 参考文献

[量子コンピュータの概説と動向（株式会社日本総合研究所）](#)

## 1 超電導型量子ビット

現在、最も主流となる方式で電子回路で量子ビットを実現するものである。量子現象を模した電子回路であり、現IBMやGoogle、Rigetti、日本の理研などではこの方式を採用している。希釈冷凍装置が必要であるが、大規模化がしやすいデバイスであり、各企業の量子ビット数を増やすマイルストーンはこの方式採用している企業が提示している。

## 2 イオントラップ量子ビット

イオントラップ方式は名前の通り、電荷電子を捕捉して量子コンピュータを実現する方式で、超伝導方式の次に実用化が進んでいるデバイスである。量子ベンチャーであるIonQは2020年に400万量子ボリュームを記録した。このようにイオントラップを利用することのメリットはフィデリティが高いことと、コヒーレンス時間が長いことも大きな特徴で、IonQの他、Honeywellはこの方式を採用している。

## 3 半導体量子ビット

ガリウムヒ素やシリコンなどの半導体に電子を挿入し、電磁波で量子状態を制御する。極低温を必要とし、量子もつれが作り難いという弱点をもつが、半導体と同じプロセスで製造できるため、大規模化が期待されており、いくつかの研究機関や企業によって研究が進められている。

## 4 光量子型量子ビット

現在、大きく光波型、光子型の2つの方式がある。光波型はカナダのXanaduや東京大学の古澤研、光子型はPsiQuantumやボソンサンプリングで量子超越性の論文を発表した中国技術科学大学があるが、実現は遠いとされており、参画団体は少ない。光量子型量子ビットの特徴は常温、大気中での動作が可能であることや、通信と組み合わせで大規模化が行いやすいといわれている。

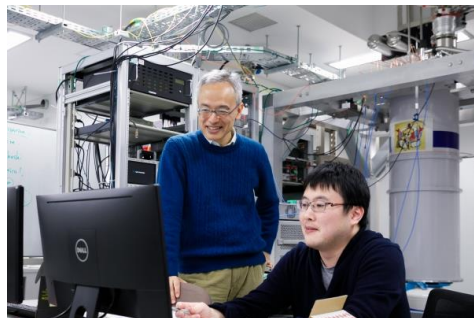
## 5 その他の量子ビット

- **ダイヤモンド量子ビット**
  - ガリウムヒ素やシリコンなどの半導体に電子を挿入し、電磁波で量子状態を制御する。極低温を必要とし、量子もつれが作り難いという弱点をもつが、半導体と同じプロセスで製造できるため、大規模化が期待されており、いくつかの研究機関や企業によって研究が進められている。
- **NMR(核磁気共鳴)量子ビット**
  - MRIでお馴染みの核磁気共鳴による核スピンの制御、計測技術には50年以上の歴史がある。そして1996年にはNMRを用いた小型量子コンピュータを構築する方法が提案された。2021年には大阪大学が世界最大規模の量子機械学習を実現した。25個の核スピンを利用した量子カーネル法によって計算量を削減することに成功したのである。
- **トポロジカル量子ビット**
  - 1937年にエttore・マヨラナが提唱したマヨナラ粒子は粒子そのものが反粒子としても振る舞う特性を持ち、電気的には中性である。2つのマヨラナ粒子を入れ替えると、元の状態と異なる状態に変化するという特殊な性質を持っており、そうした性質を応用することでトポロジカル量子コンピュータを実現できると言われている。この方式に注目したマイクロソフトはデルフト大学と提携して研究を進めていたが、この大学の研究グループはのちにマヨナラ粒子の存在を示す論文を撤回した。その結果、マイクロソフトの量子コンピュータの研究は後退したと言われている。



## 1 概要

現在、最も主流となる方式で電子回路で量子ビットを実現するものである。量子現象を模した電子回路である。1999年に当時NECに所属していた中村泰信氏と蔡 兆申氏が超伝導方式の量子ビットを初めて実現した。中村氏は現在、理研で超伝導量子コンピュータの開発を主導している。



中村泰信氏(左)

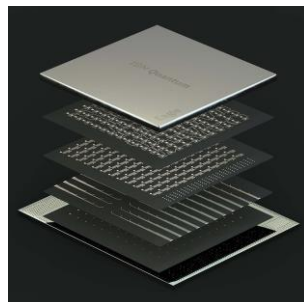
出典:<https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/features/voices066.html>

ジョン・マルチネス(John M. Martinis)はカリフォルニア大学バークリー校の博士学生時代にデヴォレらとともに信頼性の高い超伝導の量子コンピュータを実現した。さらにジョン・マルチネスは2020年にGoogleにて量子超越を実現したとした超伝導量子プロセッサを開発した。



出典:<https://www.acm.org/articles/people-of-acm/2017/john-martinis>

そしてIBMは2021年11月に100量子ビットを超える127量子ビット Eagleプロセッサを発表した。最近のロードマップでは2022年後半には433量子ビットのプロセッサである「IBM Osprey」、2023年には1,000量子ビットを超える、世界初のユニバーサル量子プロセッサ「IBM Condor」を発表する予定



出典:<https://www.ibm.com/blogs/think/jp-ja/ibm-quantum-eagle-breaks-the-100-qubit-barrier/>

## 2 量子ビットの構成

エネルギースケールの小さい量子LC共振回路では離散化したエネルギー準位が得られるが、エネルギー準位が等間隔なので、マイクロ波を照射すると下位2準位だけを利用できない。そのため非線形な離散化エネルギー準位が得る必要である。

そのためにはジョセフソン接合素子を用いて、トランズモンqubitsを実現する。非線形な離散化エネルギー準位を実装し、その中で基底エネルギー状態と第1励起状態を利用する。トランズモンqubitには臨界電流が変更可能な周波数変動型のトランズモンqubitがあり、GoogleやRigettiはこちらを利用している。



出典:<https://arxiv.org/pdf/2106.11352.pdf>

## 3 量子ビットの操作

1qubitの操作はトランズモンqubitにマイクロ波を当ててユニタリ変換のための操作する。マイクロ波は角度 $\phi$ と照射時間でqubitのx方向、y方向の操作を行う。1量子ビットの任意のユニタリ操作はx方向とy方向の回転によって得られるのでこの2つの方向の操作のみで行われる。

2qubitsの操作は交差共鳴ゲートもしくはパラメトリックゲートにてコントロールビットとターゲットビットを接続することで実現する。交差共鳴ゲートはコントロールビットにターゲットビットの共鳴周波数のマイクロ波を照射する。交差共鳴ゲートはIBMなどが採用しており、回路はシンプルだがゲート時間(ゲートを作用させるのに必要な時間)が長い。他の方式としてgoogleなどが採用しているパラメトリックゲートがある。こちらはゲート時間は短い、回路は複雑になる。

## 4 測定

測定は分散読み出し、つまり量子ビットの間に共振器を介して入射マイクロ波を照射すると反射波が発生する。その反射波の位相によって、基底状態か励起状態かを判別する。反射波のパルスを室温で取り出して読み出すと熱雑音に埋もれて判別できない。そのため、段階的に反射パルスを増幅させて読み出す。

## 5 物理特性

超伝導量子ビットは数100mKの極低温で動作するため、希釈冷凍機が必要である。コヒーレント時間であるT1時間、T2時間は数10から200 $\mu$ 秒程度、ゲート時間は数100nsである。

## 6 長所・短所など

- 伝導量子コンピュータとして採用されている実績が多く、大規模集積かも容易である。
- 2量子ビットの操作は回路を複雑にするので、量子ビット間の結合は2、3の量子ビットにとどまり、回路が巨大化する。
- 量子ビットを増やす巨大な冷凍機が必要となり、大規模化を阻む要因となる。

## 7 参考文献

[Introduction to Transmon Physics](#)

## 1 概要

イオントラップ方式はIonQやHoneywellが利用している量子デバイスであり、その高い精度が注目されている。イオントラップ自体は質量分析などの測定技術で実現されており、その他様々な用途で応用研究されている。その応用一つとして、イオントラップ方式の量子コンピュータに利用されている。のコンピュータへ利用するための研究の歴史は古く、冷却イオンの計算機への応用は1994年にはCiracとZollerが既にその方式を提案している。

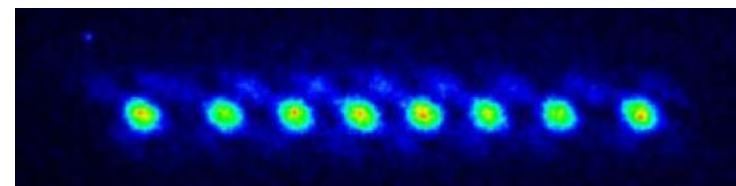


出典: <https://ionq.com/posts/may-17-2022-ionq-forte>

## 2 量子ビットの構成

イオントラップはイオン(電荷を持った原子)を電磁気学的に捕捉することで量子ビットとする。電極つまり電場や磁場を掛けることで一直線上にイオンを捕捉する。さらにレーザー冷却を行うことで、量子ビットに適した性質を持たせ、捕捉したイオンに対してレーザーを照射することで、量子状態を制御する。

イオン原子には特定の波長のレーザー光を照射することでその光子を吸収して、内部の電子状態を遷移する。例えば $40\text{Ca}^+$ イオンでは729nm等の特定波長のレーザー光により基底状態(S状態)から、励起状態(D状態)に遷移する。この基底状態と励起状態をそれぞれ量子ビットとして対応させる。

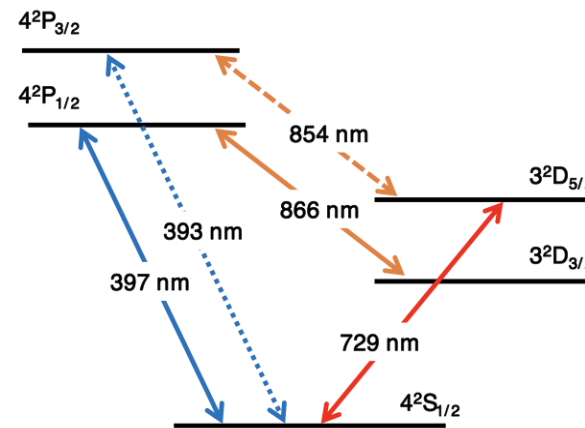


捕捉されたイオンが発光している様子

出典: <https://www.qmedia.jp/basic-of-iontrap/>

## 3 量子ビットの操作

量子ビットの操作は励起状態のイオン原子と光(あるいは電磁場)の相互作用を用いることで行う。1量子ビットの操作はレーザー光や外部電磁場をイオンに作用させる。これらが相互作用することで、励起状態のイオン内電子状態が変化し量子状態を制御する。このような操作によってRxゲートとRyゲートを実現し、このゲートの組み合わせですべての1量子ビット操作を行うことができる。



出典: <https://www.qmedia.jp/basic-of-iontrap/>

## 3 量子ビットの操作(続き)

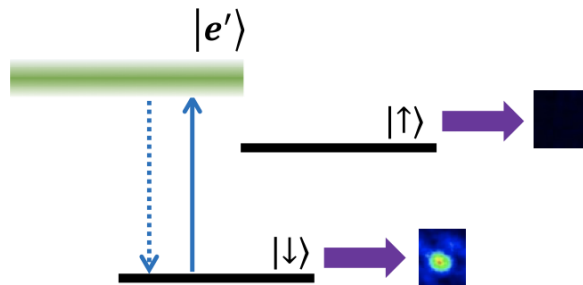
また、量子ビット間の操作はイオン原子と光の相互作用及びフォノンを用いて実現される。一般的にイオントラップ方式の2量子ビットの操作はXXゲートを用いて行われ、Mølmer-Sørensen gateにて実現される。尚、フォノンとは量子化された振動状態のことであり、イオントラップでは補足したイオン鎖の調和振動をさらにレーザー冷却することで集団的に量子化された振る舞いを実現する。この量子化された振動状態はすべての同じイオン鎖のイオンの励起状態がすべてが参加しており、捕捉したイオン間で全ての相互作用を与えることができる。

## 4 測定

量子の読み出しは発光、非発光で基底状態もしくは励起状態が判断できる。

40Ca+イオンではS状態、つまり基底状態のものに397nmの光を照射するとP状態になり一瞬(〜7ns)だけ発光するので、S状態であることが分かる。

一方、D状態のものは同じ波長の光を照射しても発光、つまり、P状態に遷移しないので発光せず、励起状態であることが観測できる。



出典: <https://www.qmedia.jp/basic-of-iontrap/>

## 5 物理特性

イオントラップ方式のコヒーレンス時間は数10秒である。さらに hyperfine qubitではT1は無限大でT2は1時間程度である。

## 6 長所・短所など

- ・ イオントラップ方式の一番の特徴はコヒーレンス時間が長いことである。
- ・ フォノンを介して、全ての量子ビットで相互作用を行うことができるので全結合が実現可能である。
- ・ ゲートのフィデリティも高く、デバイスの光との相性も良い。
- ・ 短所はゲート時間が長いこと。そしてイオン鎖に数10程度の上限がある。
- ・ 大規模化する場合はイオン鎖をインターコネクトするQCCD architectureが提案されている。

## 7 参考文献

[quantum computations with cold trapped ions\(J.I.Cirac, P.Zoller\)](#)

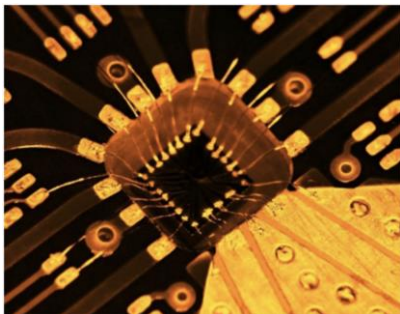


## 1 概要

量子ドットは半導体の中に電子を閉じ込めてその量子状態を利用して計算を実現する方式である。量子ドットは半導体の技術を利用できることで、量子ビットの集積化と大規模化が期待できることで注目を浴びている。量子ドットによる量子コンピュータの実用化にはまだまだ時間がかかると考えられているが、インテルや理化学研究所、日立製作所、大阪大学などがその研究を進めている。

## 2 量子ビットの構成

半導体量子ドットは1個の電子をポテンシャルで閉じ込めて極低温で冷却して、外部磁場をかけることでアップスピン、ダウンスピンを発生させて、重ね合わせ状態を作り出す。半導体量子ドットでは核スピンの揺らぎにより、スピン位相の正確さがなくなり、コヒーレンスが失われるが、GaAsからシリコンに変えることでコヒーレンス時間を向上させることができる。



理研により実現されたシリコン量子ビット

出典:[https://www.riken.jp/press/2022/20220120\\_1/](https://www.riken.jp/press/2022/20220120_1/)

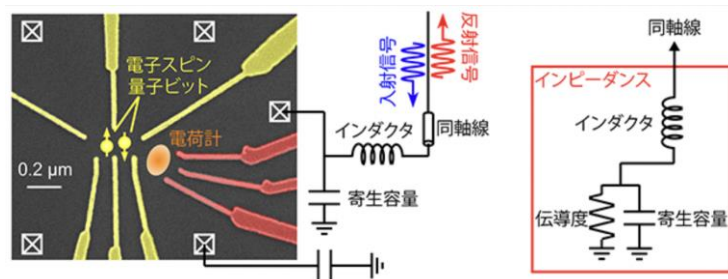
## 3 量子ビットの操作

1量子ビットの計算にはいくつかの方式があるが、その一つの方法としてコイルを用いて量子スピン共鳴というNMRと類似した方式で操作を行う。共鳴条件からなる周波数をスピンの軸と直交する方向でスピンを回転させる。回転させるスピンの位相を変えることでX方向、Y方向の回転を実現する。そしてスピンの時間を調整することで、角度 $\theta$ を調整する。  
2量子ビットの計算には結合性軌道と反結合軌道で発生する交換相互作用という物理の特性を用いて量子もつれを発生させることで行う。このようなことを行うことでアップ・ダウンすなわち $|\uparrow\downarrow\rangle$ から両者のもつれ状態である $|\uparrow\downarrow\rangle + i|\downarrow\uparrow\rangle$ 、さらに、ダウン・アップである $|\downarrow\uparrow\rangle$ を発生させる。

## 4 測定

測定はアップスピン、ダウンスピンを読み取ることになる。スピンの磁気は微量で直接読み取ることはできないので、量子ビットの読み出しは、量子ビットの情報をスピン電荷変換によって測定が容易な電荷状態に変換し、電荷検出することで達成している。

このスピン電荷変換はスピン状態に応じて電荷遷移の有無が生じる現象を利用して、スピンの情報を電荷状態に変換する。



高周波反射測定セットアップと等価回路

出典:[https://www.riken.jp/press/2020/20200214\\_1/#note6](https://www.riken.jp/press/2020/20200214_1/#note6)

## 5 物理特性

GaAsでは核スピンが揺らぎとして影響するが、シリコンでは核スピンが発生しないので、コピーレンス時間は20μ秒まで向上する。静電的に作られた量子ドットは極低温で動作し、主に電氣的に制御されるが、自己組織化量子ドットはより高い温度で動作し、主に光学的に制御される。

## 6 長所・短所など

- 半導体技術をそのまま利用できるので、非常にスケーラビリティが高い。
- 量子ドットは2量子ビットゲートや量子誤り訂正を実現するために必要な交換相互作用が短距離であり実現するのが難しい。

## 7 参考文献

[量子コンピュータを実現するハードウェア\(後編\)](#)  
[シリコン量子ビットで高精度なユニバーサル操作を実現](#)  
[シリコンスピン量子ビットの高速読み出しに成功](#)  
[大規模集積シリコン量子コンピュータの研究開発](#)

## 1 概要

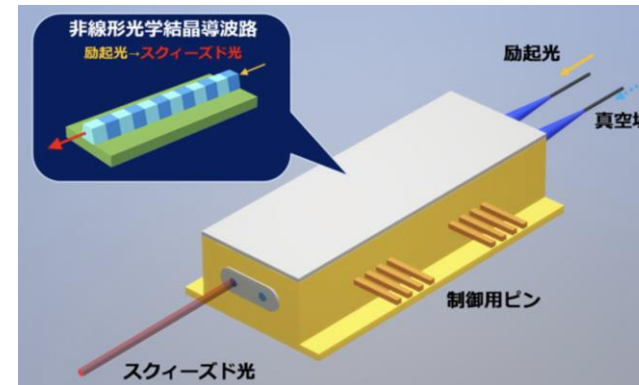
光(光子または光波の偏光状態)による量子計算が注目されている。光量子ビットの特徴としては常温、大気中で動作すること、他の方式と比較して大規模化が容易だと言われている。光は他の方式と比較して、量子コンピュータへの応用は実現が遠いと言われているが、その要素技術は年々進歩している。大規模な量子もつれや中国の研究グループがガウシアンボソンサンプリングで量子超越を実現した論文が発表されている。

## 2 量子ビットの構成

光を量子計算に用いる方法として、光子を利用する方法と光波を利用する方法の大きく2つの方式がある。

光子型は光子の各モードにおける最小エネルギー単位であり、偏光、エネルギーの広がり、時間の広がりモードとなる。光子型量子ビットは操作が行いやすく、光損失を検知できるDual-Rail型量子ビットが用いられる。光子型量子ビットはパラメトリック下方変換という2次の効果を利用するのが主流である。

光波型は連続量型とも呼ばれ、複数の光子の集まりである光波を利用する。非線形光学結晶に対して強いポンプ光を与えてスクィーズ状態と呼ばれる特定のところでピークを持つような状態を作り出す。スクィーズ状態の2つをそのまま利用すると光損失などのノイズに弱いので一定間隔でピークをもつGKP状態を作り出す。



出展:<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20200330/index.html>

## 3 量子ビットの操作

1量子ビット操作についてまず、光子型では位相変調により、 $R_z(\theta)$ ゲートを実現し、ビームスプリッターにより、 $R_y(\theta)$ ゲートを実現することで、この2つの組み合わせにより、任意の単一量子ビットのユニタリー操作を行う。2量子ビット操作については光子型での実現は困難である。Nonlinear Sign Shift Gateでは確実性がない。その代わりに測定型量子計算が用いられる。Fusion Gateと呼ばれるものである。

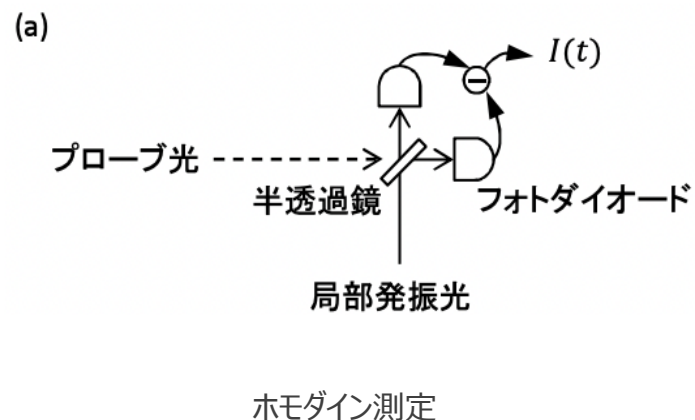
光子型では位相変調により、 $R_z(\theta)$ ゲートを実現し、ビームスプリッターにより、 $R_y(\theta)$ ゲートを実現することで、この2つの組み合わせにより、任意の単一量子ビットのユニタリー操作を行う。

## 3 量子ビットの操作(続き)

2量子ビット操作について、光子型では位相変調により、 $R_z(\theta)$ ゲートを実現し、ビームスプリッターにより、 $R_y(\theta)$ ゲートを実現することで、この2つの組み合わせにより、任意の単一量子ビットのユニタリー操作を行う。光波型では線形光学とスクイーミングでクリフォードゲートを実現し、GKP 状態をテレポートすることでTゲートを実現する。光波型でのゲート操作は光子型より確実に行うことができる。

## 4 測定

光波型ではホモダイン測定という振幅を測定するための測定をフォトダイオードを用いて行う。ホモダイン測定は複数光の強度を測定するので、光子型よりも簡単に測定を行うことができる。主としてZ測定、X測定を行う。



## 5 物理特性

常温、大気中で動作すること、光を利用するので原理的にゲート操作は高速であることである。

## 6 長所・短所など

常温、大気中で動作すること、原理的に高速であること、光通信と親和性の良いことが挙げられる。実現方式には一つの光子を利用する光子型と複数の光子を一定間隔を持つGPK状態を利用する光波型があるが、光子型はゲート操作を確実に行うことができず、光波型はGPK状態を生成することが非常に困難など実現に向けて課題が多い。

## 7 参考文献

[Xnaduのサイト](#)



## 1 量子コンピュータには、どんなベンダーがあるの？

○量子コンピュータについては、IT大手やスタートアップ企業が覇権争いを繰り広げている。

ベンダー	方式・特徴	現状(2022年9月現在)	トピックス・備考
Google	超電導	64量子ビット	米カリフォルニア州サンタバーバラに新しい拠点を開設し、2029年までに100万量子ビットを搭載した誤り訂正ができる量子コンピューターを開発
IBM	超電導	127量子ビット	2022年に発表された新たなロードマップでは2022年後半に433量子ビット、2023年に1121量子ビット、2025年には4000量子ビットを実現する計画を発表
Intel	シリコン	49量子ビット	2018年に49量子ビットの超伝導量子プロセッサのテストチップ、2019年にシリコン製量子プロセッサの極低温ウェハー・プローバーを開発
Microsoft	トポロジカル	未だ実現せず	「マヨナラ粒子」の存在が疑問視されており、量子コンピューター計画が後退との話も出ている。
Honeywell	イオントラップ	量子ボリューム512	2021年6月、量子コンピュータの製造を手掛ける子会社のHoneywell Quantum Solutions (HQS)と量子ソフトウェア開発のCambridge Quantum Computing (CQC)の経営統合を発表。
Rigetti	超電導	80量子ビット	2022年、80量子ビットの量子コンピュータを発表、さらに2024年には1000量子ビット、2026年には4000量子ビットを開発予定
IonQ	イオントラップ	32量子ビット	2028年に1024アルゴリズムミック量子ビットのロードマップ、高忠実度を実現するための誤り訂正オーバーヘッドは32:1で見積もりと発表(=32,768物理量子ビット)
D-Wave	超電導(量子アニーリング)	5000量子ビット *1)	商用量子アニーリングマシンを提供。 *1)仕組みが異なるため量子ゲート方式のビット数とは比較出来ない
Xanadu	光連続量	216光スクイーズ状態	2022年6月にガウス・ボソン・サンプリングによる乱数実験を行い、量子超越を達成したと発表

## 2 参考文献

## 1 量子ゲートコンピュータを利用するには？

量子コンピュータを個人で実装・調達するのは困難・高価であり現実的でない。大手のクラウドベンダー〔□シラバス 6-1-3〕等が実機をクラウドサービスとして提供しているため、主にこれらを利用する。

## 2 量子ゲートシミュレータとは？

「量子ゲート」の操作を解釈し、量子ビットの状態をシミュレーションし、「もし量子コンピュータで計算したらどういう結果が得られるか」を計算するプログラムのこと。〔□シラバス 6-3-4〕

	量子コンピュータ	シミュレータ
なにで動くか？	量子デバイス	従来のコンピュータ
量子加速は？ (量子特性による計算量削減)	あり☞	なし☞
量子ビット数	65量子ビット (IBM, 2020)	スペックによる。メモリや計算時間が指数関数的に増加。
エラー	現状はあり☞	なし(意図的に追加可能)☞
量子状態の直接確認	できない☞	できる☞

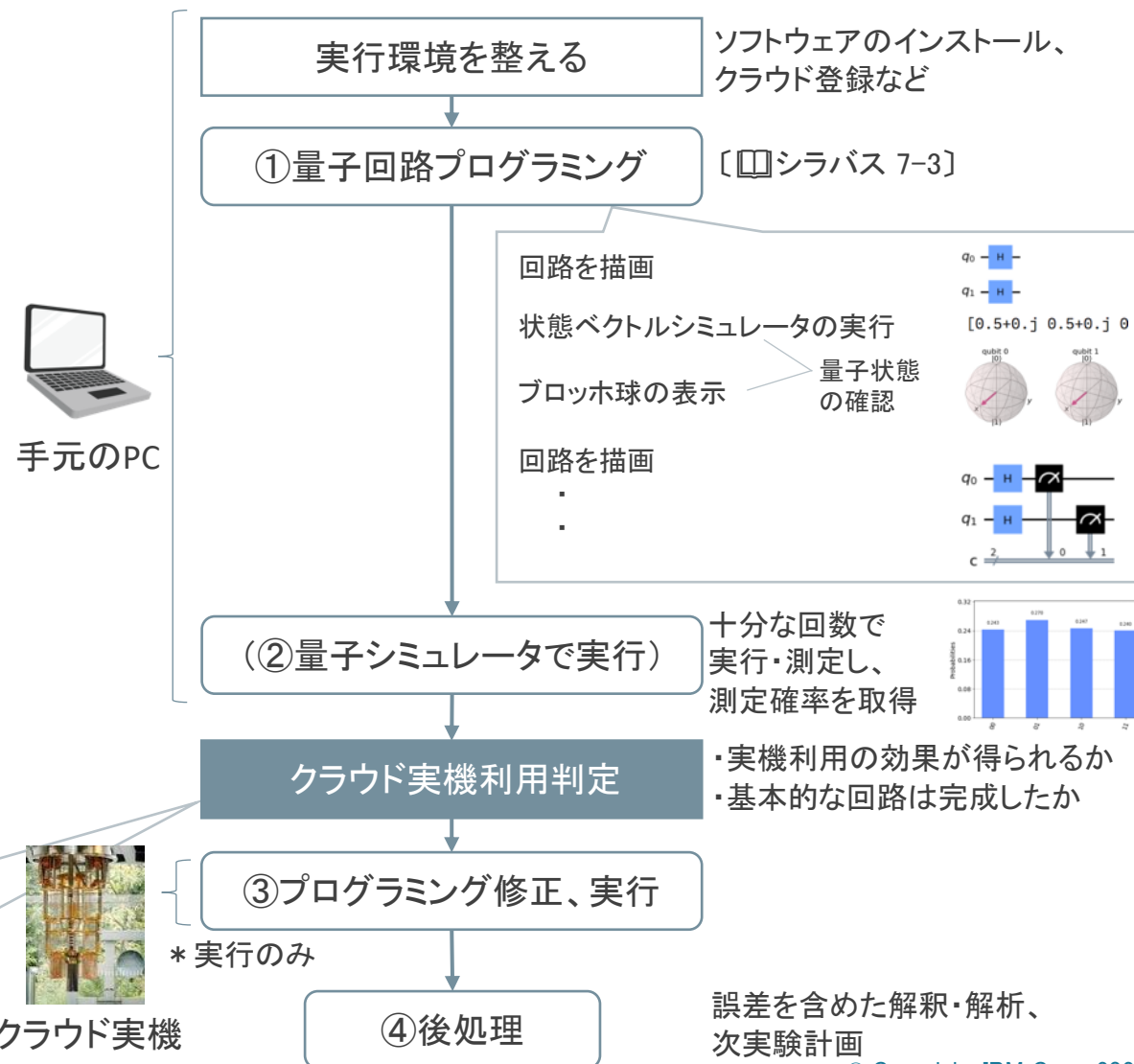
[初心者向け]量子ゲートシミュレータとは? より編集

実機は上記のような特性を持ち、費用が発生する場合もあるため、次のようなケースでシミュレータを利用・併用することが考えられる。

- ✓ 初学者の学習
- ✓ 量子ビット数が少なくて済む処理の実行
- ✓ 実機利用前の量子回路実装や量子状態の確認、少ビットでの効果確認

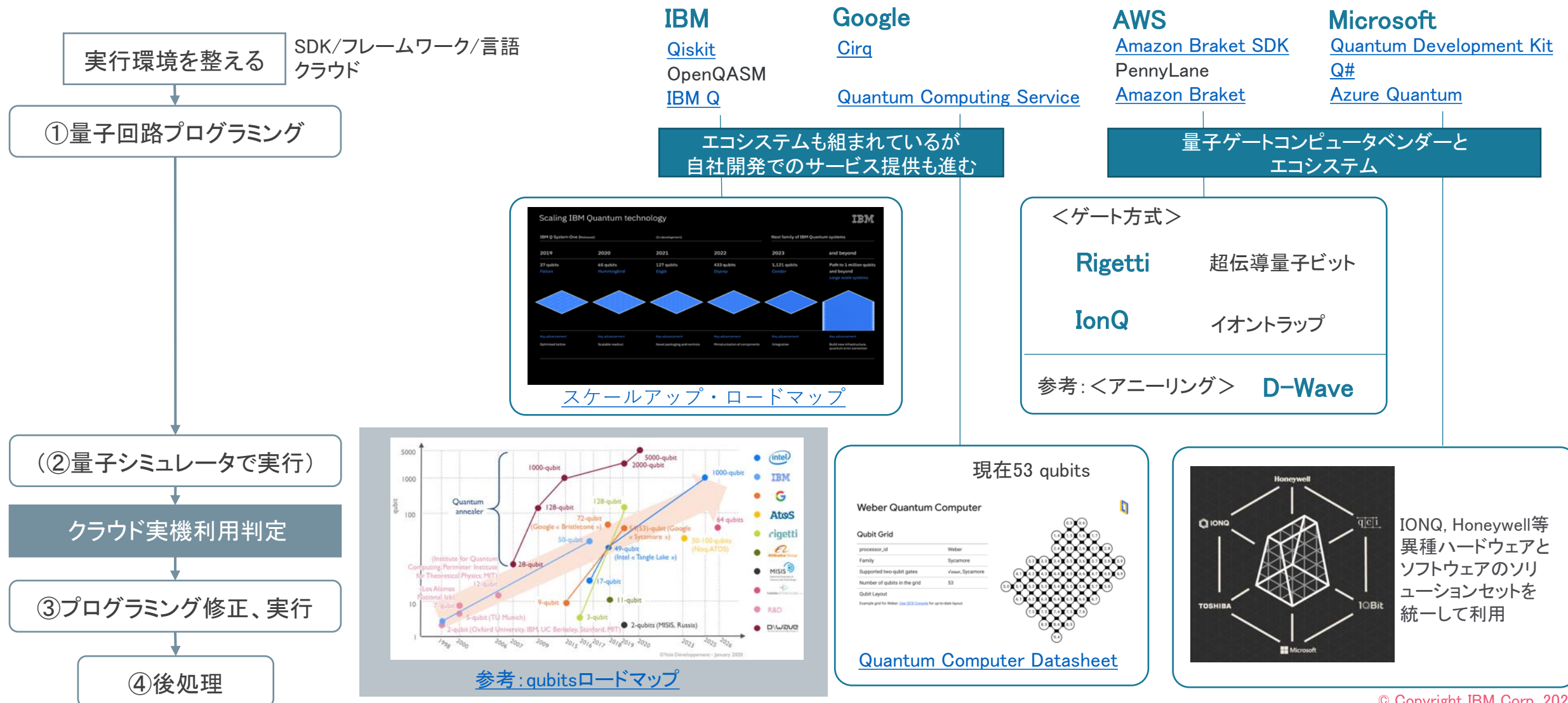
## 3 利用フロー

典型的には以下のようなフローで利用することができる。



## 1 大手クラウドベンダーでの量子ゲートコンピュータ利用方法

本詳説では、量子コンピュータ関連サービスを提供するクラウドベンダーによる開発フレームワークやクラウドサービスのリンク、実機のサイズ等を記す。



本資料の著作権は、日本アイ・ビー・エム株式会社（IBM Corporationを含み、以下、IBMといいます。）に帰属します。

ワークショップ、セッション、および資料は、IBMまたはセッション発表者によって準備され、それぞれ独自の見解を反映したものです。それらは情報提供の目的のみで提供されており、いかなる参加者に対しても法律的またはその他の指導や助言を意図したものではなく、またそのような結果を生むものでもありません。本資料に含まれている情報については、完全性と正確性を期するよう努力しましたが、「現状のまま」提供され、明示または暗示にかかわらずいかなる保証も伴わないものとします。本資料またはその他の資料の使用によって、あるいはその他の関連によって、いかなる損害が生じた場合も、IBMまたはセッション発表者は責任を負わないものとします。本資料に含まれている内容は、IBMまたはそのサプライヤーやライセンス交付者からいかなる保証または表明を引きだすことを意図したものでも、IBMソフトウェアの使用を規定する適用ライセンス契約の条項を変更することを意図したものでもなく、またそのような結果を生むものでもありません。

本資料でIBM製品、プログラム、またはサービスに言及していても、IBMが営業活動を行っているすべての国でそれらが使用可能であることを暗示するものではありません。本資料で言及している製品リリース日付や製品機能は、市場機会またはその他の要因に基づいてIBM独自の決定権をもっていつでも変更できるものとし、いかなる方法においても将来の製品または機能が使用可能になると確約することを意図したものではありません。本資料に含まれている内容は、参加者が開始する活動によって特定の販売、売上高の向上、またはその他の結果が生じると述べる、または暗示することを意図したものでも、またそのような結果を生むものでもありません。パフォーマンスは、管理された環境において標準的なIBMベンチマークを使用した測定と予測に基づいています。ユーザーが経験する実際のスループットやパフォーマンスは、ユーザーのジョブ・ストリームにおけるマルチプログラミングの量、入出力構成、ストレージ構成、および処理されるワークロードなどの考慮事項を含む、数多くの要因に応じて変化します。したがって、個々のユーザーがここで述べられているものと同様の結果を得られると確約するものではありません。

記述されているすべてのお客様事例は、それらのお客様がどのようにIBM製品を使用したか、またそれらのお客様が達成した結果の実例として示されたものです。実際の環境コストおよびパフォーマンス特性は、お客様ごとに異なる場合があります。

IBM、IBM ロゴは、米国やその他の国におけるInternational Business Machines Corporationの商標または登録商標です。他の製品名およびサービス名等は、それぞれIBMまたは各社の商標である場合があります。現時点でのIBMの商標リストについては、[ibm.com/trademark](http://ibm.com/trademark)をご覧ください。