

今回は量子コンピュータの動作原理とその技術課題についてレポートしたいと思います。量子コンピュータは創薬や素材、金融など、大量のデータを扱う様々な分野での活用が期待されており、2040年ごろまでに最大8500億ドル（約120兆円）の経済価値を生むとの試算もあります。レポートをする価値は大いにあると思います、このテーマを選んでいますが、このテーマは門外漢には相当の難物です。

その理由はいくつかありますが、そもそも量子力学の根本にかかわる問題を扱わざるを得ないため、量子力学の知識が必要なこと、その上にWebサイト上に山ほどある量子コンピュータの解説はなぜか肝心なところが省かれているために分かりにくいこと、などがその理由ではないかと思っています。ちゃんとした理解をするためには相当な覚悟が必要だということでしょう。

そこで量子コンピュータの不正確な解説をするよりも、今回は現状進められている量子コンピュータ開発の課題が何で、その理由は何か、が理解できる事を目標にレポートしてみたいと思います。一般人には、直感的に腑に落ちる分かり易い解説があると助かるのですが、なかなかそういうものが見つかりません。さらに悪いことに【5分でわかる】的な解説は仕組みの説明ではない枝葉の話が多く、さらに解説そのものが他の資料の孫引きではないかとさえ思えるものもあり参考になりません。

下段に、比較的分かり易そうなネット上のサイトと書籍を幾つか選んであげておきましたが、これ以外で上手な説明をしていると思った動画や、読んでスッキリしたと言う解説はほとんどありませんでした。

- ・ [量子コンピュータのポテンシャル | NTTデータ | DATA INSIGHT | NTTデータ - NTT DATA](#)
- ・ [【図解】量子コンピュータの仕組み・原理とは？計算方法をわかりやすく \(suz45.net\)](#)
- ・ [量子コンピューターが来た！：科学記者が答える量子Q&A=阿部周一 | 週刊エコノミスト Online \(mainichi.jp\)](#)
- ・ (書籍) 量子コンピュータが本当に分かる！ 武田俊太郎 著 株式会社技術評論社 2020年3月刊

そこで、門外漢でも納得できるような初歩的な説明を追加しながら、今回のレポートの主旨に沿って、必要のない数式や模式図を使った説明は省き、ざっくりとした量子コンピュータ全体像のレポートを試みたいと思います。

#### 【量子コンピュータの種類】

まず目下、話題になっている量子コンピュータには以下の2つの種類があります。現在使われているコンピュータと同じように、論理ゲートを組合せる考え方で作られているのは量子ゲート方式と言われているものです。

一方、量子アニーリング方式は昔のアナログ計算機のイメージの動くコンピュータです。従って、以下の説明はこの量子ゲート方式のコンピュータについて話を進めていきます。

	量子ゲート方式	量子アニーリング方式
目的	全ての計算	組合せ最適化問題
強み	・高速化が保証されているアルゴリズム有り	・組み合わせ最適化問題では高速
弱み	・計算処理には通常数千万以上のビットを必要とすることから、現実性低	・高速性は問題によって異なる
ビット数	約72量子ビット	約2000量子ビット
開発企業	IBM, Google, Microsoft, Intel等	D-Wave等

図表1：量子コンピュータの分類

#### 【量子ゲート方式コンピュータの開発課題】

10月27日に行われた、Nextech Week 2023 秋 グーグルの中井 悦司 氏の講演によれば、量子ゲート方式コンピュータの開発課題はだまか以下のようだと説明がされました。

- ① 量子の振る舞いについての基礎研究
- ② 安定した量子ビット素子システムの開発
- ③ 効率的な量子アルゴリズムの開発

さて、これがどう言う理由で開発上の課題になっているのか、その背景説明を追加しながらレポートをしていきます。

#### 【量子ゲート方式コンピュータ】

このコンピュータについての解説はWeb上に山ほどありますが、決まって最初に出てくる摩訶不思議な説明は、量子は粒子でもあり、波でもあるという解説です。確かに、あまたある初学者向けの量子力学の本の最初にはそんなことが書いてありますが、それを正直に理解しようと悩む必要はありません。何故なら、量子力学の正確な描像はいまだに誰も解明しておらず、実像はこうだと示されてはいません。その証拠に、2022年度のノーベル物理学賞は量子もつれという量子コンピュータの動作原理に関する研究に与えられており、いまだ解明途上の物理現象で、正しい描像など誰にもわかりません。正しいかどうか分からない事を理解しようと悩むより、多少不正確だったとしても自分なりにスッキリと腑に落ちる説明の方が当面の理解に役立つと言うものです。

(⇒ 実際に使われている技術の中にも、こうした理解のままに使われている職人技的な技術は沢山あります。)

さて、今回のような主旨で量子コンピュータ開発の課題を理解しようとする場合、量子は干渉を起こす波だと思おうのが最も腑に落ちる描像だと思います。波であれば一つの波源の変化が瞬時にすべての干渉縞に影響し、状況が変わります。色々な状態が重なったまま、一挙に計算をする量子コンピュータのふるまいを理解するのにうってつけの描像です。そう言う訳で、以降の説明は量子現象は波であるとイメージしながら読んでいただくと分かり易いと思います。ただし、かなりデフォルメしたイメージの波で、実際の波動とは違う部分も出てきますが、今回は開発課題の背景理解に目標を絞るのでそれには目をつぶります。とは言っても、実際の量子コンピュータと無関係ではいけませんので、そこには注意をしながら説明をします。

### 【量子ビット】

量子ビットは普通使われる古典ビットと比較する意味で使われます。古典ビットは1と0で表されますが、量子ビットは状態1と0がある比率で重なった状態を想定します。例えば、**量子ビット状態** $= \alpha * 1 + \beta * 0$  と言うように記述した場合、状態1の出現確率が $\alpha$ 、状態0の出現確率が $\beta$ を意味し、状態は1とか0とか一つに決まりません。波のピークが1と0であっても、中間の値もあるイメージです。この重ね合わせの状態のまま、1である場合と0である場合が同時に計算され、答えも確率を含んだ重ね合わせの状態のまま算出されます。

ただ、実際に確認できる答えとしては**出現確率に従って、最も可能性の高い結果が一つだけ観測できます**。ついでながら、ビットが1とか0とか言っていますが、実際にそのような数値を計算するわけではなく、何か区別のできる2種類の物理状態を操作し、変化させることで計算をします。例えば、光の偏波を使い、偏波面が水平か垂直かなどで1とか0とかを区別します。ここで、操作されたり観測されるものはあくまでも偏波現象です。

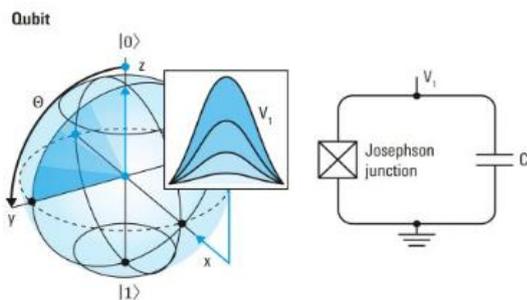
### 【量子ゲート】

この量子ビットを操作し、アルゴリズムに沿って量子ビットを変化させる実際の装置が量子ゲートです。量子ゲートを実現する方法は様々な物理現象、例えばジョセフソン素子や光の偏光現象などで考えられていますが、微妙な量子現象を扱うため、実現性や安定性などで一長一短があるようです。量子ゲートにはデータの入出力端子のほかに制御用端子、データ読み出しの端子などがあり、これの実現には最先端の半導体技術などが使われています。

どんな種類の量子ゲートがあるのか列挙してみると

- ① アダマールゲート：量子ビットを状態1と0の重ね合わせの状態に初期化する機能を持ったゲート。
- ② Xゲート：量子ビットの状態を反転させる機能を持ったゲート。
- ③ CONTゲート：**制御ビットの状態に応じて**対象となる量子ビット状態を反転させる機能を持ったゲート。
- ④ 量子位相ゲート：位相を変更する機能を持ったゲート。

この他にも量子ゲートはありますが、基本的にこの4種類の量子ゲートをうまく組み合わせて、量子ビットを制御し、目的の計算を行います。この量子ゲートを正確に動かすためには、精密な量子ビットの制御が不可欠で量子コンピュータ実現のための重要な開発課題になっています。

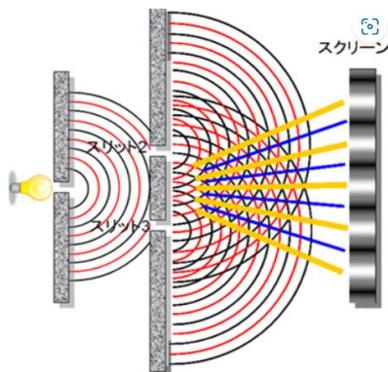


左図は具体的な量子ビットの構成例ですが、この例ではジョセフソン接合を使った回路が示されており、ジョセフソン素子の量子ビットの状態を制御電圧 $V_1$ によって変化させます。

[量子ビットの制御方法 | Rohde & Schwarz \(rohde-schwarz.com\)](https://www.rohde-schwarz.com/ja/quantum-computing/qubit-control-methods)

### 【回折格子による干渉縞】

[物質科学実験 Ice Crystal : 宇宙実験サクッと解説 : 氷の結晶成長実験編 第2回「干渉計って何？」 \(jaxa.jp\)](https://www.jaxa.jp/ice-crystal/)



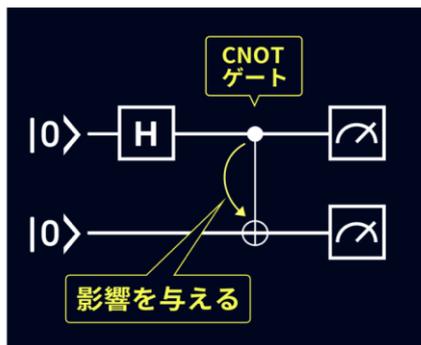
量子ビットの干渉をイメージするために、最初に回折格子による干渉の様子を見てみたいと思います。

回折格子による光の干渉は左の図のように見えますが、スクリーン上の縞模様はスリットからの波の干渉によって、濃くなったり、薄くなったりします。

位相が揃っている場所では強まり、逆に逆転している部分では打ち消されて模様が弱まります。これを量子コンピュータに当てはめると、各スリットが量子ビットに当たり、互いに干渉する状態の波を作ります。干渉で波の強さが強くなると出現確率が大きくなり、波の強さが弱くなると出現確率が小さくなると読み替えます。

つまり、量子ビットの状態の波が他の量子ビットの状態の波と干渉することにより、 $\alpha$ 、 $\beta$ の値が変化して、結果的に観測される現象も変化するわけです。

また、波の描像で重要なことは、変化が逐次的ではなく、瞬時に同時に起きることです。状態の変化が一度に起きる事、これが量子コンピュータの特徴になります。



よく出てくる量子回路図で、この様子を表現すると左図のようになります。

$|0\rangle$  はスリットを意味し、H はアダマールゲート、● はCONTゲート、最後のメータマークは測定装置を意味しています。

回路図全体では、CNOTゲートを使って他の量子ビットに変化を与え、測定結果が変化するということを表現しています。

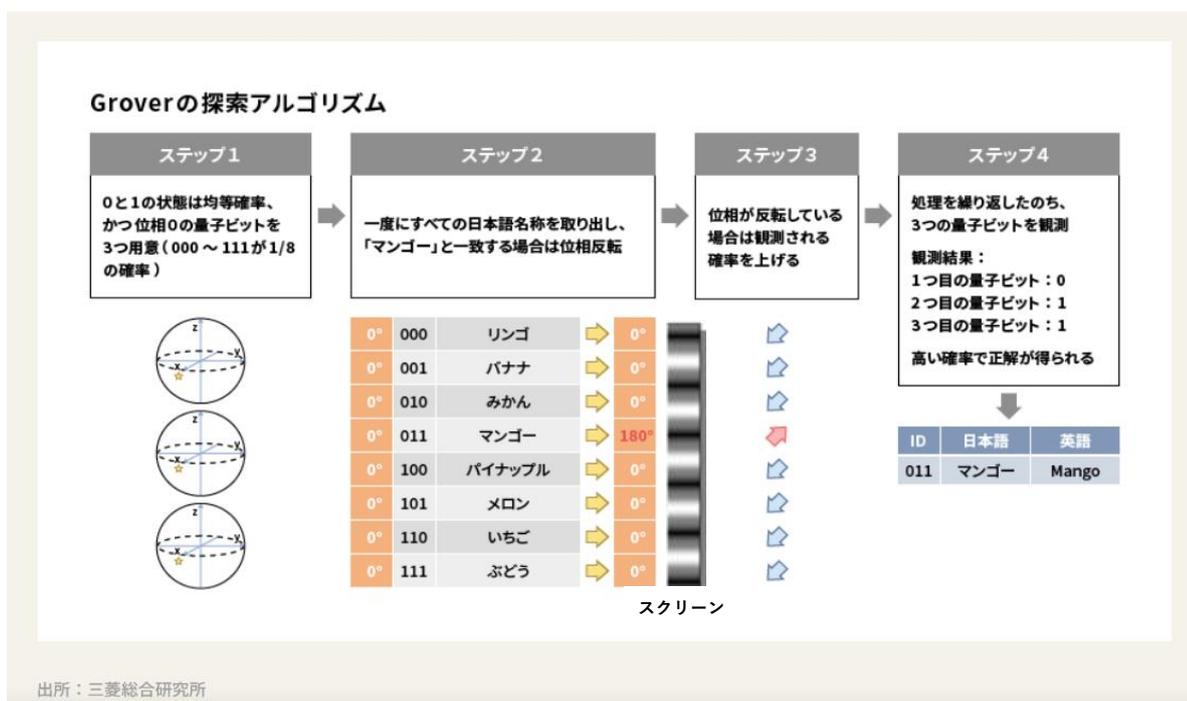
【図解】量子コンピュータの仕組み・原理とは？計算方法をわかりやすく (suz45.net)

【グローバの量子アルゴリズム】

次に、よく出てくるグローバのアルゴリズムを参考に、量子コンピュータがどのように答えをだすのか見てみます。

出典：<https://www.mri.co.jp/50th/columns/quantum/no03/>

を参考にします。



この説明も、重要な部分の説明が省略されているために、どんな仕組みで動いているのかわかりません。そこで、少々、追加の解説を加えながら、このアルゴリズムの動きを追いかけてみたいと思います。

説明文に従って、ステップ1から確認していきます。

**ステップ1**：ここでしていることは量子ビットの初期化です。従って、スクリーンの上には一様な干渉縞が出ており、どれがマンゴーなのか区別はつきません。しかし、一度に8種類の干渉パターンが重ね合わせの状態で見えているはずですが。

**ステップ2**：マンゴーと一致する場合には位相反転？ どのような操作をするのか明記されていませんが、CONTゲートを使って、マンゴーの特徴を示す制御ビットを入力するのだろうと推測すると、影響を受けた量子ビットが変化し、スクリーン上の幾つかの干渉縞に変化が出てくるはずですが。それがマンゴーの候補になります。ここではまだ回答を読み出すことはしません。

**ステップ3**：位相が反転している場合には観測される確率を上げる？というよりは、アルゴリズムに根拠があれば、その操作が更に繰り返されることにより、必然的に観測される確率は上がるはずですが。

**ステップ4**：操作を繰り返した後、量子ビットを観測する、の意味は、観測確率が高くなるように量子ビットの観測確率振幅を増幅し、結果を読み出すことだと思います。この操作の後、最後に**全量子ビットの状態を読み出せば、高い確率で正解の検索結果が得られる**ということですが。普通のアルゴリズムに慣れている我々には何故こんな非効率な手順をとるのか戸惑うわけですが、量子に特有の現象を利用した量子ゲートの動きを利用し、それによって答えを得ているということです。量子コンピュータは重ね合わせの状態を使って、**瞬時に沢山の組合せの計算結果を得るメリット**がありますが、その代わりに、知ることのできる結果は出現確率の高いひとつだけで、しかも確定した答えではありません。確定した答えを知るには、補助的に古典コンピュータを使う場合もあります。量子コンピュータと古典コンピュータが役割分担をするわけです。どのように量子ビットの振幅を変化させて、最終的に正しい結果を得るのかは**量子現象をうまく使って作られた量子アルゴリズム**に抛ります。実はこれが**量子コンピュータの肝心な所**で、現在でも量子現象を上手に使って有用な結果を得たアルゴリズムの例は少ないと報告されています。

【量子コンピュータに即した定性的な動作の説明】

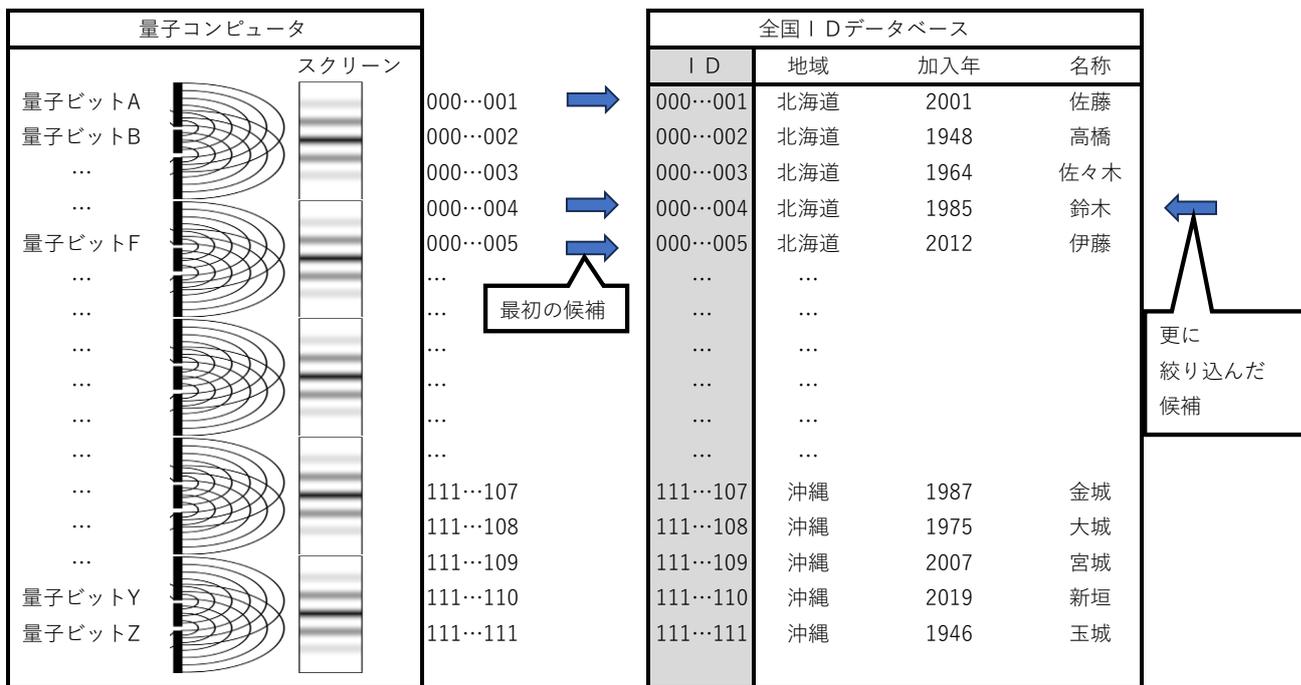
次に、下図のような量子コンピュータを使って、仮想的な全国の電話帳から000…004の番号が誰なのかを検索する手順を考えます。

まず、前提として、電話番号はラフな規則に従って付与されているとします。例えば地域、加入した時期で順番に付与され、大まかに区分されているものの、古典コンピュータでできるような規則的、逐次的な手順で調べるには不向きなデータベースだとします。

**いくら量子コンピュータでも何の規則も無いデータベースでは、アルゴリズムが作成できないために検索はできません。**

まず、量子ビットを初期化します。その時点ではスクリーン上に到達する波の様子はどの場所でも同じですから、模様は一様であろうと想定されます。次に、この電話番号の規則に関係する制御ビットを入力してやると、該当する量子ビットの位相が変化し、この変化に関係する名称の部分の干渉縞に変化が出てくるはずですが、目的とする氏名が50音の前半にあるというような規則がさらにあれば、それに応じた制御ビットを入力すると、さらに鮮明な干渉縞がどこかに出てきて、氾濫しに調べなくても該当する名称の候補が徐々に浮かび上がって来ます。

最後の観測をしないと答えは見えませんが、古典コンピュータでこれと同じことをしようとすると、電話番号を順に変化させて、氾濫しの検索をせざるをえず、検索時間が莫大に掛かる事になります。量子コンピュータではこの氾濫しの検索時間が大幅に省けるという利点があるのです。ある程度、候補が絞り込まれれば、確定した答えを得るために、古典コンピュータを使って**氾濫しの検索**をすることも可能になります。



ここまでの説明で量子コンピュータを実現させるための技術課題の背景がいくつか明らかになりました。それは

- ① 波の持つ物理的な動きの理解。これは量子コンピュータの場合、量子現象の正確な理解ということになります。
- ② 正確な波を起こすための仕組みの実現。正確な制御ができる量子ビット素子およびゲート素子の開発が必要とということです。
- ③ 波を干渉させるための手順。これは量子現象を理解した上で、量子状態の出現確率を高めるアルゴリズムの開発です。

これまでの説明で示しましたが、色々課題が多く、量子コンピュータが実際に使われるまでには、まだ時間がかかりそうということが分かります。我が国のムーンショットプロジェクトでも掲げられているゴールの目標は2050年とされています。

今年の8月25日に開催された大学見本市2023でのセミナー「未来を拓く量子情報科学」の中で、量子コンピュータ ムーンショットプロジェクトのリーダーであるCRDSフェロー嶋田 義皓氏がいみじく言われていましたが、【量子コンピュータにとって、今はちょうどトランジスタが発明された頃と同じ。ラジオ、テレビはできるかもしれないが、（大規模量子チップの開発が成功して初めて実現する）汎用量子コンピュータができるかどうかはやってみないと分からない。】とのこと。これだけの技術課題があり、ブレークスルーが必要となればなるほどと納得できる主張ではあります。

また、12月15日に行われたセミコンJAPAN2023の産総研 更田 裕司氏の講演でも、【観測プローブの開発でもまだまだ課題があり、実用化の途上。】との話もあり、観測プローブなどの周辺機器の開発も同時に必要なことから、量子コンピュータが実際に使われるようになるのはまだ時間がかかりそうです。

【量子現象は不思議】

さて、量子コンピュータの動作について種々説明してきましたが、量子現象はまだ解明途中の段階で、世界中の学者が新しい理論を提示し、その確認のための実験を繰り返しています。更に量子コンピュータに限らず、量子現象には私たちの世界観を変えるような主張もあり、今後もこの分野からは目が離せません。なぜなら我々が今認識しているこの世界をマクロの世界=常識の世界とすると、我々の常識とは別のミクロの世界=量子の摩訶不思議な別の世界が実際にあるかも知れないからです。

その主旨で、朝日新聞社の尾関 章 氏が著書【量子の新時代 朝日新聞出版 p65】の中で、私達の常識に対し、興味深い問題提起をしています。

量子力学は常識破りといわれる。だが、もしかしたら常識の方に問題があるのではないか。いったん取り払うべき常識は次の二つである。

- (1) 物事は、いつも一つに決まっている。
- (2) 物事は、私が見ていようがいまいが、ずっと続いている。

その代わりに、次のようなイメージを描いてみよう。

- (1) 物事は、もともといくつもの状態が**重なり**合っている。
- (2) 物事は、私が見る瞬間ごとに、**とびとび**に決まっていく。

ミクロの世界は今までの常識とはかなり違う世界ですが、量子現象を素直に理解しようとすれば納得のいく主張です。

ただし、信じるか信じないかはあなた次第です。

以上