

【DRニュース・053】：なぜ高速演算ができるのか・量子コンピュータの仕組みと現状&動向

2020年01月31日発信

今年、初めてのSEEDのテーマは、物理現象の自然状態から量子力学や線形代数の数理論理学とどんな関係があるのか？ 今、話題の「量子コンピュータ」の原理・原則を探求してみよう。

なぜ、高速の演算が出来て、量子コンピュータの仕組みがどうなっているのか？ どんな利用効果が期待されるのかを調べて見ます。

そして、量子コンピュータの現状と動向を調べることで、何がこれから必要なのかを探って見ます。

1. 計算とは何か？ ・ ・ ・ 計算機の発展（そろばん～電卓・プログラミングによるコンピュータ）

計算とはなんでしょう？

小学生の頃、算数を習い始めたとき、1から9までの数字を習い、足したり引いたり掛けたり割ったりすることを学びました。これにより物を数えたり、時間を計算して、予定を立てたり、お金を計算したりして、日常生活を送ることができるようになりました。

その後、さらに複雑な計算の方法を学んで、製品を製造したり、建物を設計したり、地球環境を測定したり、さまざまな仕事で計算が使われていることを学んできました。

しかし、私たち人間は、大した計算能力をもっていないと高校生（15歳～）位のときに気づき始めます。

大きな数字の計算は、筆算で5桁くらい、図形の計算は単純な円や三角形が限界で、それ以上大きな数や複雑な図形などの場合、頭がこんがらがってしまい計算できません ・ ・ ・ **そこで、計算機を使います。**

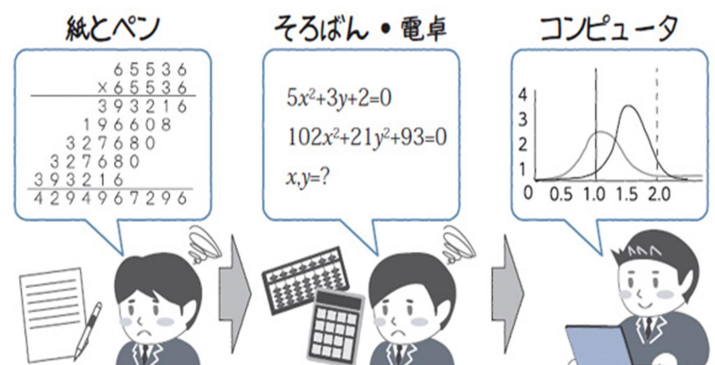
最も身近な計算機は「電卓（電子卓上計算機）」でしょう。

・ ・ ・ 昔は、「電卓」の代わりに「そろばん」を使い、桁数の多い計算が高速にできるようになりました。

そして、さらに複雑な計算になるとコンピュータを使います。「**XやYが出てくる方程式**」を習うと、数字を直接扱わずに計算式を立てられるようになります。

・ ・ ・ これを使い「**プログラム**」を作ること、手計算では困難な複雑な計算がコンピュータによってできるようになりました。

・ ・ ・ 1960年頃（今から60年前）に実用化され、現在のコンピュータにより人間の計算能力の限界を突破することが出来るようになりました。



2. 現在のコンピュータの限界 . . . 計算可能な問題の難しさ（計算量の限界）

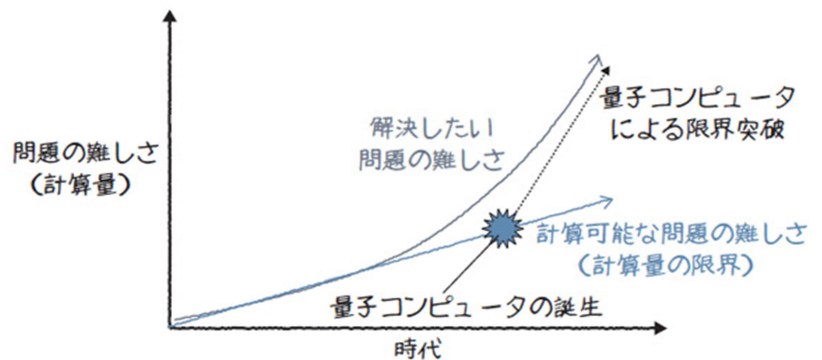
この電気を使った計算機である「現在のコンピュータ」でも . . . **やはりどこかに限界があります。**

これまで 60 年くらい、コンピュータはどんどん進化し、高速に計算できるようになり、使いやすくなりました。
. . . しかし人間の解きたい問題も同じくらいのスピードでどんどん進化（複雑化、煩雑化）してきました。

複雑な「**3次元物体のシミュレーション**」や、「**量子力学的なふるまいをする物質（薬や化学）のシミュレーション**」は、現在の最先端のコンピュータを使ってもなかなか計算できません。

最近では、**ブロックチェーンという技術**が注目を集めており、これは現在のコンピュータでも計算するのが難しい問題が存在することを利用して作られたシステムです。

また、**機械学習という技術**も注目を集めていますが、これも計算するのに多くの時間がかかる問題を解く必要があります。



そのため、現在のコンピュータの限界を突破することは、

. **とても重要なことであり、これによりさらに世の中を良くすることができると信じられています。**

ではどうすれば、現在のコンピュータの限界を突破できるのでしょうか？

. **その答えの1つが、「量子コンピュータ」だと期待されているのです。**

3. 量子コンピュータとは何か？

量子コンピュータは、次世代の高速計算機として研究・開発が進められています。

現在の量子コンピュータでは、困難な問題をすべて解決できるわけではないのですが、

. . . そのうちいくつかでも解決できれば、社会に大きなインパクトを与えると期待されているのです。

まずここで、量子コンピュータとは何か、について簡単に説明します。

. . . **量子コンピュータとは、「量子力学特有の物理状態を積極的に用いて高速計算を実現するコンピュータ」と、ここでは定義します。**

. . . **量子コンピュータの「量子」は、量子力学の「量子：物理現象における物理量の最小単位」です。**

(粒子性（物質の性質）と波動性（状態の性質）を併せ持つ、このような存在を「量子」(quantum) と呼ぶ)

3.1 量子力学とは

量子力学とは、大学レベルで学ぶ「物理学」の1つで、

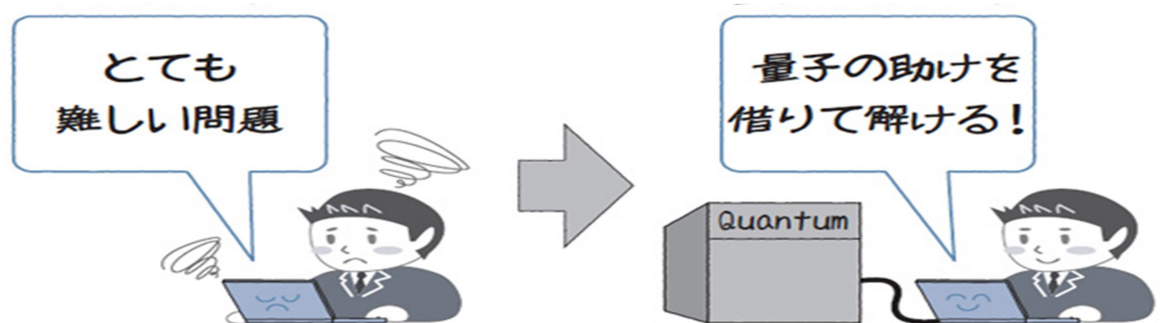
・・・ 原子、電子などの非常に小さなものの動きを説明するために発展してきた理論です。

この量子力学によると、原子や電子、光の粒である光子などの微小なものや、超伝導などの非常に低温に冷やした物質においては、

・・・ 私達が普段目にしない不思議な現象が起きることが知られており、実験的に確かめられています。

例えば、後で説明する量子力学特有の物理状態である「重ね合わせ状態」や「量子もつれ状態」などが実現されています。そして、この量子力学特有の物理状態を積極的に用いてコンピュータを作ろうというのが、量子コンピュータです。

量子コンピュータ = 量子力学特有の物理状態（「重ね合わせ状態」や「量子もつれ状態」）を積極的に用いて、高速計算を実現するコンピュータのことです。



この量子計算は、従来の計算とは本質的に異なるポテンシャルを有していることが研究によって明らかになりつつあります。

量子コンピュータの開発は、「量子」を高度に制御（コントロール）することで・・・現在のコンピュータの限界を突破するコンピュータを作るという・・・「物理学とエンジニアリングの挑戦」なのです。

3.2 量子コンピュータと古典コンピュータ

ここで、量子コンピュータと通常のコンピュータの違いを整理しましょう。

・・・ まず「計算」には大きく分けて2種類あると考えることができます。

物理学の1つの分野である古典物理学に基づく「古典計算」と、

・・・ 量子物理学（量子力学とも呼ばれる）に基づく「量子計算」です。

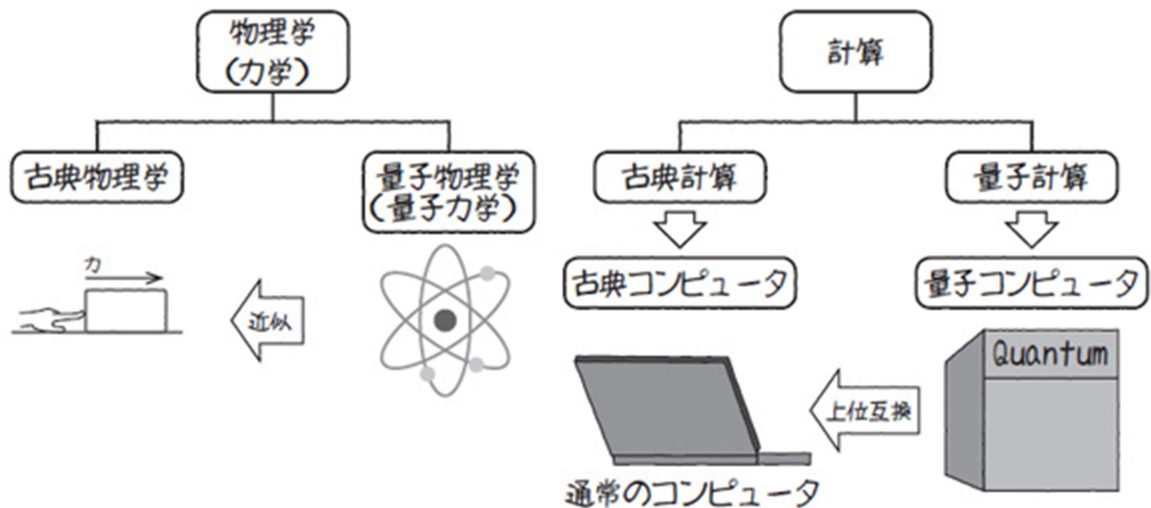
古典物理学とは中学校や高校の物理の授業で習う「物の運動」や「力の作用」、「電磁気の性質など」を扱う物理学です。**一方、量子力学は理系の大学レベルで習う「原子や電子の性質」などを扱う物理学です。**

この2つの物理学に対応して、2つの計算が存在すると考えることができます。

「量子計算」を行う装置を「量子コンピュータ（量子計算機）」と呼び、

・・・ 「古典計算」を行う装置を「古典コンピュータ（古典計算機）」と呼びます。

これ以降は、通常の「現在のコンピュータ」のことを「古典コンピュータ」と呼びます。



現在、量子コンピュータの決まった定義があるわけではありません。

ここで注意すべき点は、通常の現在の古典コンピュータも、量子力学的な現象を使った半導体デバイス（トランジスタやフラッシュメモリなど）によって動いていますが、

・・・ できる「計算」は古典物理学に対応する「**古典計算**」であるという点です。

実現のために使われている物理現象と、実際にできる計算は明確に区別する必要があり、

・・・ 量子力学で説明されるような現象を用いているから「**量子計算**」ができるわけではありません。

しかし、量子計算を行うためには、量子力学で説明されるような現象を高度に制御し、

・・・ 「量子力学特有の物理状態」と呼べるような特殊な状態を実現することが不可欠となります。

3.3 量子コンピュータの種類

量子コンピュータと呼ばれているものの中にも複数の種類が存在します。

・・・ 量子コンピュータを以下の3つに区別して説明します。

(1) 非古典コンピュータ

(2) 非万能量子コンピュータ

(3) 万能量子コンピュータ

(1) **非古典コンピュータ**

量子力学特有の物理状態を用いて計算を行う。または、それを目指すコンピュータで、古典コンピュータに対する優位性が示されていないコンピュータです。

・・・ 現在開発されている「**量子アニーラー**」がここに分類されます。

(2) **非万能量子コンピュータ**

万能な量子計算はできないが、一部の量子計算を行うことができ、古典コンピュータに対する優位性が示されている量子コンピュータです。

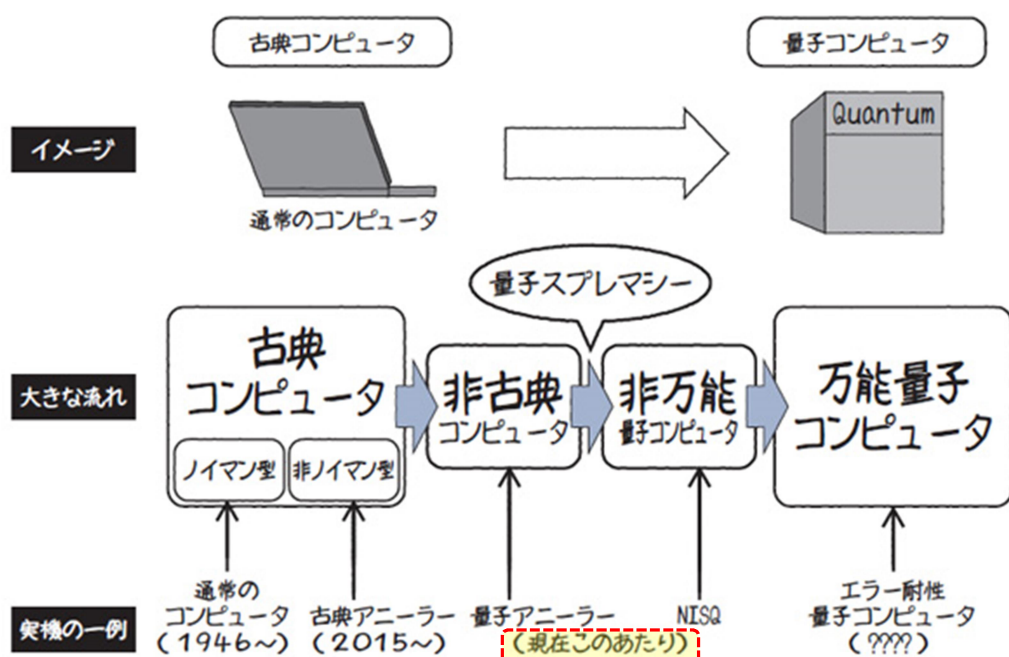
・・・ 現在実現されつつあるエラー耐性がない（または不十分な）、ノイズのある中規模の(50～100量子ビット)Noisy Intermediate Scale Quantum (**NISQ**) と呼ばれる量子コンピュータが分類されます。

(3) **万能量子コンピュータ**

万能な量子計算を行うことができる量子コンピュータです。

・・・ もう少し詳しく説明すると「任意の量子状態から任意の量子状態への変換を十分な精度で実行できるコンピュータ」ということになります ・・・ **詳細は別途（エラー耐性）。**

種類		万能性 (エラー耐性)	量子の 優位性	量子特有の 物理状態
広義の 量子コンピュータ	万能 量子コンピュータ	○	○	○
	非万能 量子コンピュータ	×	○	○
	非古典 コンピュータ	×	×	○
古典コンピュータ	古典 コンピュータ	×	×	×



4. 量子コンピュータの基本的な考え方

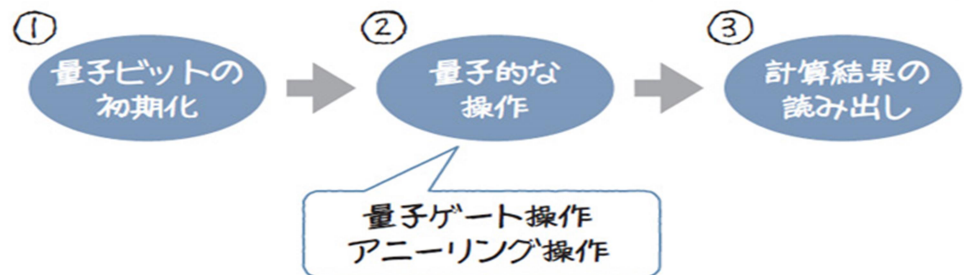
量子コンピュータとはどんなものなのかイメージができたところで、量子コンピュータの仕組みを見よう。
 ……ここでは具体的動作ではなく、動作の流れと量子コンピュータを実際に使うイメージを説明します。

4.1 量子コンピュータの動作の流れ

まずは、量子コンピュータの動作の基本的な流れを説明します。

量子回路モデルと量子アニーリングの両方に共通する量子コンピュータの動作の基本に示しています。

……量子コンピュータでの計算の実行方法をここでは3つのステップで説明しましょう。



① ステップ1：量子ビットの初期化

量子コンピュータには、量子ビットと呼ばれる計算の最小単位が存在します。

古典コンピュータでは単に「ビット」と呼ばれていたものの量子版です。

……量子コンピュータには「量子ビットが物理的に実装」され、これを用いて計算をするのが基本となります。そのためまずは、この量子ビットを準備し初期化します。

② ステップ2：量子的な操作

量子コンピュータの計算は、物理的に実装された量子ビットを操作することで実現します。

量子ビットを操作する方法は、量子回路モデルでは「量子ゲート操作」、

量子アニーリングでは「アニーリング操作」と呼ばれます。

このように、量子コンピュータの計算は、量子ビットに対して、量子的な操作を施すことで実現される。

③ ステップ3：計算結果の読み出し

計算結果を得るために、量子ビットの状態を測定して、計算結果の情報を読み出します。

量子ビットの状態（量子状態）は壊れやすく、計算途中の量子的な操作を行っている段階で不要な測定をしてしまうと量子状態が壊れ、計算を失敗して（間違えて）しまいます。なので、必要なタイミングで注意深く測定を行う必要があります。以上の3ステップで量子コンピュータによる計算が完了します。

上記の基本的な流れでは、さっぱり解りません …… 「量子ビット？」「量子的な操作？」「量子状態？」

もう少し、古典コンピュータや量子コンピュータの原理・背景・課題などを深掘りしてみよう。

4.2 古典コンピュータは、どのようなしくみで動いているのだろうか？

「ビット」という単位を聞いたことがあるでしょうか。

・・・ 「ビット」とは、スイッチのオン／オフによって 0 か 1 を示すコンピュータの最低単位です。

1 バイト (Byte) = 8 ビットで、オン／オフを 8 回繰り返すことにより 256 通りの組み合わせが可能になります。(ちなみに、1 バイト=半角アルファベット 1 文字分の情報量にあたります)

ところで、この「ビット」はもともと何なのでしょう。

・・・ コンピュータのなかの集積回路は「半導体」の集まりからできています。

・・・ 一つ一つの半導体が ON/OFF することを「ビット」と呼ぶのです。

現在の古典コンピュータは、「半導体=ビット」が集まったものを読み込んで計算処理をしています。この原理は、自宅や学校のパソコンでも、タブレット端末でも、スマホでも、「スーパーコンピュータ京」でもなんら変わりありません。

この半導体=ビットの数を増やすことで、コンピュータは高速化・高機能化してきたのです。

とはいえ、1 ビット=1 半導体である限り、実現可能な速度にも記憶容量にも物理的な限界があります。

・・・【DRニュース027】：(フロンティアはなぜ動くのか？どんな環境で動くのか？基礎知識) ～を参照して！！

この壁（物理的な限界）を超える方法はないか？

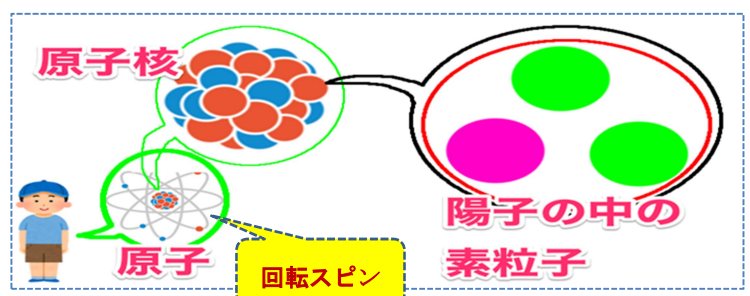
・・・ その答えになる技術として注目されているのが、量子コンピュータというわけです。

4.3 量子コンピュータは、どうやって動いている？

量子コンピュータは、1 ビット=半導体のオン／オフで 0 か 1 を示すというこれまでの古典コンピュータと違って ・・・ 「量子ビット」(キュービットとも言います) によって計算を行います。

ちょっと難しい話になりますが、

・・・まず、量子とは？ ⇒「電子のスピン」をコンピュータに生かすには！から始まります。



話は突然、「宇宙は何でできているか？」という話になります

・・・ ご存じの通り、宇宙のすべては「原子」からできています

そして、すべての「原子」は、同じ「材料」で出来ています ・・・ その材料こそが「量子」です

「原子」は、原子核をつくる「陽子と中性子」、「原子」の周りを回る「電子」によって構成されています

この「電子の数」によって、水素やヘリウム、リチウム……といった様々な「元素」ができるのです

「原子」をつくる材料のことを「素粒子」または「量子」と呼びます

・・・ そして「量子」のうち、「電子」は「常に回転(スピン)している」といわれています

量子コンピュータは、この「回転・(スピン)」を計算に生かすことができないか？
というアイデアから生まれたのです。

4.4 半導体から量子ビットへ！何ができる？

ここで、現在のコンピュータに使われている「ビット」に戻ります。

・・・ 「ビット」は、半導体の ON/OFF オフによって、0 と 1 を示す仕組みでした。

ちょうどコインの表裏のように考えると分かりやすいでしょう。表なら 1、裏なら 0 というわけです。

これに対して「量子ビット」は、コインが回転(スピン)している状態。0 でもあり、1 でもある状態といえます。たくさんの量子ビット＝「0 でもあり 1 でもある」ものが「重ね合わされて」いくイメージと考えればいいでしょう。

古典コンピュータでは「1 ビット」ごとに 0 と 1 というシンプルな情報しか送れませんでした、量子ビットを使った「量子コンピュータ」なら、「1 量子ビット」ごとに比較にならないほど多くの情報を送ることができます。「量子コンピュータ」なら、これまでのコンピュータよりはるかに速く、大容量の計算ができるはずです ・・・ **これが量子コンピュータの基本的な考え方です。**

古典コンピュータの「ビット」では、0 または 1 のどちらかの状態を表すことができますが、
2 つ以上の状態を同時に表すことができません

量子コンピュータでは、状態の「重ね合わせ」という量子力学的な基本性質を用います

「重ね合わせ」とは、2 つまたはそれ以上の状態を同時に表すことができるということです

「量子ビット」になると、例えば、「n 量子ビット」であれば、「2 の n 乗の状態」を同時に
並列演算をして計算ができることになります・・・ アルゴリズムがうまく出来れば指数関数的に増大する
(今のスーパーコンピュータが 27 量子ビットぐらいです⇒ 1 量子ビット追加すれば 2 倍のスパコンとなる)

高速化を可能にしたのは、量子コンピューター特有の「量子重ね合わせ」と「量子もつれ」の効果です。

4.5 量子の「重ね合わせ」状態とは

回転するコインを見て、次の2通りの解釈があります。

- ・・・ 回転するコインは、「表と裏の『重ね合わせ』の状態にある」
- ・・・ 回転するコインは、「表でも裏でもない『未決定』の状態にある」

「表」または「裏」というのは、「コインが回転をやめて倒れたときの状態」である。

- ・・・ 「コインが回転している」という状態は、「表でも無く裏でも無い」そのいずれでもない。なるほど、コインが回転中であるときには、コインが表と裏である確率は半々だ。
- ・・・ しかし、それは、「表であること」と「裏であること」が半々で成立していることを意味しない。

コインが回転しているときの状態は、「(表と裏の) 重ね合わせ」ではなくて、

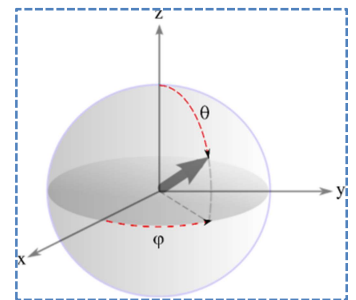
- ・・・ 「回転中」という状態なのだ。つまり、「未決定状態」なのだ……これが正しい認識である。

要するに、真偽値が半々であるときには、「どちらでもある」というふうに考えるべきではなく、

- ・・・ 「どちらでもない」というふうに考えるべきなのだ。

少なくとも、回転するコインについては ⇒ そしてまた、量子も同じで、

- ・・・ (なぜなら量子は回転する超球であるから)



上半分では、表または裏のどちらも成立しうるが、同時に双方が成立することはない。

下半分では、表または裏のどちらもまだ成立してない。(未決定である)

- ・・・ ここでは、コインは、倒れずに回転している。「表で倒れているか、裏で倒れているか」と尋ねられたら ・・・ 「倒れていないから、どちらでもない」と答えるしかない。

※「**ブロッホ球**」・・・二つの直交する純粋状態の重ね合わせで表現できる量子状態を単位球面上に表す表記法である。従って、量子ビットの純粋状態はブロッホ球上の点として視覚的に表現することができる。2状態系は3次元実空間の単位球面であるブロッホ球で記述することができる。

※「**量子ビット**」・・・量子情報では、従来の情報の取扱量の最小単位であるビット(0or1)の代わりに、情報を量子力学的2準位系の状態ベクトルで表現する。

2状態系の量子状態を記述する状態ベクトルは、2つの独立な状態の重ね合わせの比率と「位相差」が異なる無限に多くの状態を取り得るという。

4.6 量子の「もつれ」状態とは

アインシュタインらが 1930 年代に行った思考実験に端を発する概念です。

アインシュタイン自身は、量子力学の問題点を指摘するために考え出したものであるが、その後実験でも確認され、最近盛んに研究されている量子情報や量子計算の理論で基本となる考え方です。

19 世紀までのいわゆる古典物理の世界では、物理的状態に関する情報は、

・・・ 個々の自由度（たとえば粒子の位置や速度）に分解して理解することが出来ていました。

しかし、量子力学の世界では、物理的状態を分解して理解することができないことがあるということです。

・・・ たとえば、遠く離れた 2 つの粒子に関して、一方の粒子についての観測が、もう一方の粒子の観測結果に影響を与えることがある ・・・ **これを量子もつれ（二重性）と呼ぶのです。**

量子もつれとは、異なる場所にある粒子のスピンなどの量子状態が独立に記述できないという現象で、アインシュタインは「奇怪な遠隔作用」と呼びました。

・・・ 「この量子もつれという現象こそが重力現象の基礎となる時空を生成する」ということを示した。

■ 量子と呼ばれる物は、量子の重ね合わせや量子のもつれ（二重性）を持つ。

・・・ 0 と 1 が重ね合わせで表現できるため、計算のスピードが速い。



● 0 と 1 の 2BIT では、 $2 \times 2 = 4$ 通りの表現が出来るが、その分 4 回の計算が必要となる。

3BIT では、 $2 \times 2 \times 2 = 8$ 通り ・・・ n BIT の場合は、 $2 \times 2 \times \dots \times 2 = \text{「2 の n 乗」}$ 通り、

・・・ **例えば、2 の 10 乗だと 1024 通り回の計算が必要となる。**

◆ 量子ビットの数が 10 個なら 1024 通りを全て重ね合わせで表現出来るため、**1 回の計算で済む。**



・・・ **このような重ね合わせを利用した計算方法を並列計算という。**

・・・ **この並列計算ができるのが、量子コンピュータの利点と言える。**

次に、量子ビットの計算が何となくわかったつもりで、量子ビットを操作する方法を調べてみよう。

5. 量子コンピュータの特徴と方式

① 量子コンピュータの特徴は、大きく分けて2つある。まずは、その2つについて見ていこう。

・・・ まず、コンピュータが持つ文字や数値などの情報は「ビット」というもので表現されるが、

・・・ 量子コンピュータの場合「量子ビット」というものを用いることになるという点です。

(量子ビットは「重ね合わせ」など、これまでのコンピュータにない方法で多くの情報を持たせることが可)

・・・ もう1つは、計算の「アルゴリズム」です。

(現在、量子コンピュータで実装されているアルゴリズムは「量子アニーリング法」と呼ばれる手法で、いわゆる「巡回セールスマン問題」などの最適化問題を解くのに適している)

② 量子コンピュータの方式には、大きく分けて2種類ある。

・・・ 「量子ゲート方式」と「量子イジングモデル方式」の2種類がある。

・・・ どちらも、量子力学の原理を応用して計算に活かしていることには変わりがないが、しかし、単なるデバイスや処理系の違いというあまりにも大きすぎる違いがあるので、かならず区別する必要がある。まずは、2つの方式の違いなどを調べて見よう。

・・・ 一つは、「量子ゲート方式」。前述の IBM や Google の量子コンピュータが量子ゲート方式を採用している。

・・・ もう一つは、組み合わせ最適化問題の計算を得意とする「量子アニーリング方式」。こちらはカナダの D-Wave Systems が、2000 量子ビットの量子コンピュータの製品を販売している。(量子ゲート方式に対し、「量子アニーリング方式」の量子ビット数が大きいのは、間違い訂正；エラー耐性を実装する必要がないためです)

5.1 量子ゲート方式

2007 年以前は、量子コンピュータといえば、「量子ゲート方式」を指していました。

それ以後は、量子イジングモデル方式も盛り上がってきたので、あえて「量子ゲート方式」のように呼ばれることが増えてきました。

古典コンピュータが、AND, OR, NOT などのゲートの組み合わせによっていかなる計算も実現できるように、アダマールゲート(H)、回転ゲート($\pi/8$)、制御 NOT ゲート(CNOT)という3種類のゲートがあれば、いかなる量子計算も行えます。

これらのゲートの組み合わせによって、汎用的な量子計算を行おう、というのが「量子ゲート方式」です。量子ゲート方式の量子コンピュータは「汎用量子コンピュータ」とも呼ばれ、

- ・・・ 量子論理回路を活用した各種アルゴリズムの高速計算が期待できる。

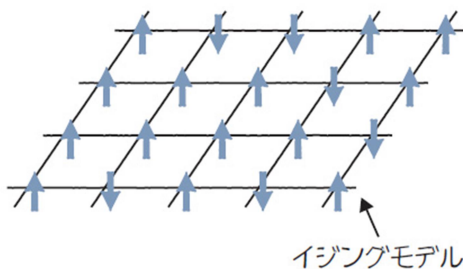
しかし、高速計算の鍵となる量子ビットの「重ね合わせ」という状態が、わずかなノイズの混入で壊れてしまうことから、「**エラー訂正技術の開発**」が実用化に向けた壁となっている。

- ・・・ 未だ、実用的な性能を持った実機はありません。

5.2 量子イジングモデル方式

2007年にD-Waveというカナダの会社が、全く新しい形式の計算機を発表しました。

これは、量子アニーリングと呼ばれる処理を実機で行うことで、最適化問題を解く計算機です。数値計算や最適化法に詳しい方なら、焼きなまし法という手法を聞いたことがあるでしょう。量子アニーリングは焼きなまし法と似た手法で、イジングモデルという磁性体のモデルを使って最適化を行う手法です。



D-Waveのマシンは、イジングモデルに従う系を作って実際に実験し観測することで、

- ・・・ 量子アニーリングの「計算」を高速で行います。



量子イジングモデル方式は、量子ゲート方式のような汎用性はないのですが、上述のD-Wave社の計算機のように・・・既に商用化されている実機があります。

世界初の商用量子コンピュータ「D-Wave2000Q」 出典：D-Wave

5.2.1 量子アニーリング方式

量子アニーリングは、膨大な選択肢からベストを探求するという。

- ・・・ いわゆる組合わせ最適化問題の高速・高精度処理が期待される計算技術の一つです。

量子アニーリング方式では、相互作用を設定した量子ビットを格子状に並べる。

- ・・・ これをイジングモデルといい、量子効果を使ってイジングモデルを表す関数の最小値を探す。

つまり、現実にある組み合わせ問題を量子アニーラで解くためには、

- ・・・ まず問題をイジングモデルの目的関数に合う形に直さなければならない。

また、極低温環境で生まれる量子現象を利用して演算を行えるのが特徴です。

5.2.2 組み合わせ最適化：巡回セールスマン問題

「古典コンピュータで解けない問題」の典型的な事例として、

・・・ 「巡回セールスマン問題（組み合わせ最適化）」があります。

セールスマンの訪問先が複数あるとき、最も短い時間で全てを巡回する手順を見つける問題です。

・・・ この問題は、訪問先が増えるたびに指数関数的に巡回経路が増えてゆきます。

例えば、8 地点では 2,520 であるのに対し、20 地点になると 6 京 8000 兆となり、

・・・ 我が国最高速のスーパー・コンピュータ「京」をもってしても 6 秒かかります。

これらが、30 地点になると 4.42×10^{30} の 30 乗となり、「京」でも 1,401 万年かかる計算になります。



例えば、セールスマンが複数の都市の全てを 1 回ずつ訪問して出発点に戻る際に、移動距離が最小になる経路を求める。

10 都市を回るルートでも 18 万 1,440 通りあり、30 都市、50 都市にもなると途方もない数字になり、通常の計算機では追いつかないレベルになります。その中から最適なルートを導き出すには、とてつもない時間がかかり、現実的には不可能に近いとされて来ました。

- ・・・ 問題が大規模になるほど、しらみつぶしに最良の組合せを見つけることは難しくなります。
- ・・・ 物流網構築や渋滞緩和はもちろん、効能が最も高くなる分子の組合せを求める新薬開発等。
- ・・・ 低リスクで高い収益性のある株の組合せを求める金融ポートフォリオなどはその典型です。
- ・・・ こうした膨大な組み合わせを持つ課題が、社会やビジネスにおいて無数に存在しています。

金融（ポートフォリオ最適化問題）や機械学習、創薬（薬科のシュミレーション）への応用やさまざまな条件下における気候変動の影響の検討など期待される効果が大きい。「組み合わせ最適化問題」が高速に解けることは、交通、物流、製造業、金融、化学、創薬、その他多くの分野にとって大変うれしいことである。

5.2.3 D-Wave の研究開発経緯

カナダの D-Wave Systems が開発し、Google や NASA が導入した量子コンピュータ「D-wave」が「既存のコンピュータの 1 億倍速い」という実験結果を出したのが、2015 年 12 月 10 日と記憶に新しいところだが・・・この D-Wave の実現に大きく貢献したのが「量子アニーリング理論」です。

量子アニーリングは、どんな組み合わせが最適かを計算する「組み合わせ最適化問題」の解法の 1 つとして研究されているものだが・・・D-Wave の登場で、がぜん注目が集まってきました。

量子アニーリングは「組み合わせ最適化問題」を量子力学、つまり物理の理論を利用して解くための汎用的な解法です。量子効果の働く磁石を模した実験装置を利用し、量子力学の現象のひとつである・・・「量子ゆらぎ」により、組み合わせ最適化問題の計算を実行します。

複数のものの組み合わせを最適化したいというときに、どの要素がどんな効果をもたらすかを示す・・・「コスト関数」を考えるのですが、その組み合わせは膨大にあるので全部試すわけにはいきません。そこで適度に均しながら、最適なものを求めていくことになります。つまり、最初は乱雑にさまざまな組み合わせを試していき、組み合わせを「ゆらす」というわけです。その中で目的にはまってくるものを見つけ、揺らす効果（ゆらぎ）を減らしていきます・・・それがアニーリング（徐冷）です。

これは「焼きなまし法」とも呼ばれます。刀鍛冶（かじや）が刀を鍛えていくときに、熱した鋼をゆっくり冷やすことで落ち着きが出て、粘りが出てくることと同じです。

刀鍛冶は、熱して柔らかくした鋼を叩いて成形し、急速に冷やすことで硬度（焼き入れ）を上げ、

・・・さらに、折れにくくするために、「焼きなましと焼き入れ」をくり返します。

このようにして最も安定した状態を作り出せるということは、古来より自然科学的に知られていました。

これは熱アニーリングと呼ばれますが、1983 年頃に当時のコンピュータ上で擬似的にシミュレーションを行うことで組み合わせ最適化問題に適用した、「シミュレーテッドアニーリング」というものを提案。

・・・提案（1998 年の東京工業大学の西森秀稔教授と当時博士課程に在学中の門脇正史氏）されました。

要は動かし方で、落ち着いたと思われるものを動かしてみて、まだ動くようなら変更の余地があるというわけです・・・それをくり返すことで最も安定した状態、つまり最終的な解を得ようというものです。

最も落ち着いた状態は良い答え。それは自然の真理なんですね

でも、落ち着くところを見つけるためには、あれこれ試行錯誤をしなければならない
（試行錯誤（しこうさくご）とは、いろいろ試みて失敗を繰り返すうちに次第に成功が確立される）

自然界にあるさまざまなことは、結構、賢く最適化されています。そういう「自然界を模倣」する、もっと挑戦的にいえば、自然の法則を使って計算をする、その一つが「アニーリング」なのです

5.3 量子ゲート方式と量子イグジシングモデル方式（量子アニーリング）の利点と欠点

それぞれの違いが少し分かってきたところで、利点、欠点をまとめて見よう。

	利 点	欠 点
量子ゲート方式	- 汎用的で、いかなる量子計算も実現できる（万能型である） - 量子アニーリング方式でできる計算は、量子ゲート方式でもできる	現時点（2018 年 12 月現在）では、実用的な性能の実機が無い
量子イグジシングモデル方式 ：量子アニーリング	- 既に、商用レベルの実機が存在する。 - 最適化問題は現在のコンピュータでは解きにくい問題も多く、それに特化しても十分に効力を発揮する	最適化問題以外は解けない（特化した非万能型である）

Google ルや IBM が開発を進める量子ゲート方式では、

・・・2019 年 10 月に Google が「量子超越」を達成したと発表し、期待が一気に高まった。

しかし、現実の課題を解くコンピュータとして使える迄には 10 年以上かかるとの見方が一般的だ。

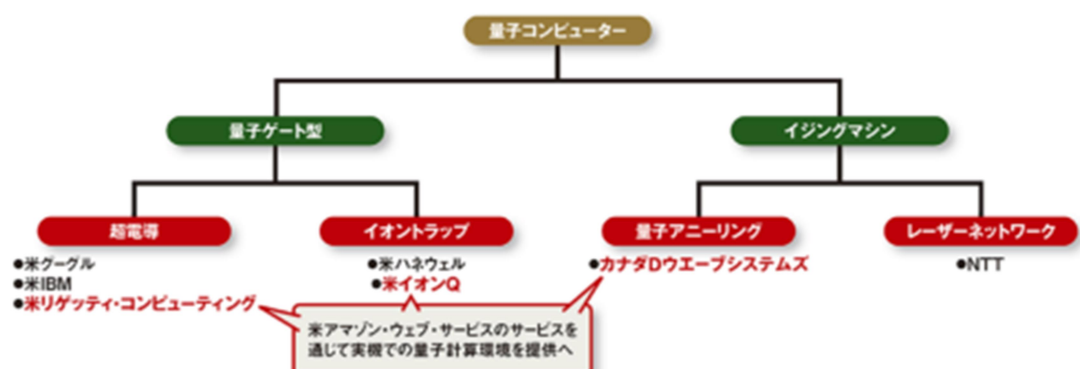
5.4 量子コンピュータの現状と動向

5.4.1 Google と IBM の対決

Google は特定の計算においてスーパーコンピュータ（スパコン）をしのぐ性能を示した量子プロセッサ「Sycamore（シカモア）」を 2020 年に企業が本格利用できるようにする計画だ。

業界ごとに 1～2 社を選んで共同研究を始める。さらに 2020 年末から 2021 年にかけて、利用企業は増えると予測する。加えて 2020 年中ごろにはメーカー 3～4 社の量子コンピュータをネット経由で手軽に使える環境が整う計画だ。

化学メーカーを筆頭に自動車、航空機、金融などのトップ企業が用途の開拓を進め、2023 年ごろにはビジネスでの本番運用が始まるだろう。



Google の話題が多い領域だが、実は現時点で量子コンピューティングの世界最大とも言えるエコシステムを構築しているのは IBM だと言える。

- ・・・ 90 以上の企業・団体が、IBM 同社の量子コンピュータを遠隔地から使っている。
- ・・・ 日本でも化学メーカーでは JSR や三菱ケミカル、自動車関連では本田技術研究所、金融業ではみずほフィナンシャルグループや三菱 UFJ 銀行などが試用している。

IBM は、5 量子ビット機から 53 量子ビット機まで

- ・・・ 15 種類のシステムを IBM 内で稼働させ、企業にネット経由で貸し出している。

IBM の例を見ると分かるように、量子コンピュータの研究・開発には

- ・・・ 様々な企業や団体がパートナーとして加わるオープンイノベーションの形で進むことも多い。

全く新しい技術ということもあり、

- ・・・ 技術的な部分はもちろん、様々な分野からの知見を集めて実用化を加速させようとしているのだ。

5.4.2 量子コンピュータの開発状況

量子コンピュータの開発はどの程度まで進んでいるのだろうか？ 代表的な 3 社を紹介する。

- ・・・ 海外の企業はもう量子アニーリングに見切りをつけ、量子ゲート型に研究を集めている。

米国の企業	開発状況 (2018 年版)
IBM	●量子ゲート型の「IBM Q System」を開発。 ●これに関心を持つ企業や学術研究機関による「IBM Q Network」というコミュニティも組成しており、研究・開発と並行して量子コンピュータの活用法を積極的に探求している。 ●日本でも 2018 年 5 月、慶應義塾大学と共に「IBM Q ネットワークハブ」の開設を発表し、実用化に向けてグローバルな知見を集めている。
Google	●2013 年に D-Wave Systems による量子アニーリング型の量子コンピュータをいち早く導入(価格は 15 億円程)、NASA と共にコンピュータの研究を行った。 ●一方、自社でも量子ゲート型の量子コンピュータを開発。IBM 同様、実用化に向けて研究を進めている。
Microsoft	●量子ゲート型の量子チップや量子コンピュータを稼働させるための冷却装置、そして量子コンピュータ向けの最新プログラミング言語を開発・発表している。 ●本来同社はソフトウェア企業だが、量子コンピュータへの投資を拡大している。

※Amazon も参入：AWS のサービスを通して、実機での量子計算環境を提供している。

5.4.3 Google の考え

Googleによると、同社の「D-Wave 2X」量子コンピュータは従来のPCより1億倍以上高速だという。

Googleは機械学習機能を「Google Photos」やオートフィルなどに極めて効果的に組み込んできた。

・・・ もちろん、世界で最も大規模かつスマートなデータセンターも有している。

とはいえ、それほどの計算能力があっても、

・・・ 未来の機械学習と人工知能(AI)に関する同社の野望を実現するには、十分ではない。

Googleは検索から健康関連事業まで、あらゆるものに機械学習と人工知能を役立てたいと考えている。

Googleが米航空宇宙局(NASA)と共同で研究を行う「Quantum AI Lab」は先頃、D-Wave 2Xを購入した。世界初の量子コンピュータと説明されているD-Wave 2Xは、「1000量子ビット」プロセッサを備えており、問題解決の際に膨大な数の可能性を検証する能力があると考えられている。

5.4.4 2019年の量子コンピュータの振り返り

2020年は量子コンピュータの企業利用が広がる？ ---- 2019年の動きを振り返って見る。

2019年は国内外を問わず主力ITベンダーが量子コンピュータに積極投資する姿勢を見せた。

今の段階では先行投資の域を出ないところもあるが、次世代コンピューティングに関する研究開発において市場の動きが活発になっている。2019年の主だった話題を下記に列挙してみる。

年月日	提供概要（企業名&大学）	提 供 内 容
2019.01.25	NTT データ 、量子コンピュータの業務利用に向けたサービスを開始	量子アニーリングのビジネス利用について検証や評価を行う「量子コンピュータ／次世代アーキテクチャ・ラボ」を開設した。
2019.03.01	インテル 、量子コンピューティングの開発加速へー「Cryogenic Wafer Prober」発表	量子チップの低温試験装置を開発したと発表した。この装置は量子ビットを計測し、量子ノイズの発生源や量子ドットの品質情報を数分で収集。
2019.03.05	IBM 、量子コンピュータ「Q System One」で最大の量子体積を記録	量子コンピューティングの新たな節目を迎えたことを明らかにした。同社の量子システムが、これまでで最大の量子体積を記録。
2019.04.26	IBM 、量子コンピューティング研究ネットワーク「Q Network」拡大ー複数の大学が参加	ノートルダム大学やフロリダ州立大学、バージニア工科大学を含む北米の大学などが新たに参加する。
2019.09.10	沖電気 、製造現場の最適化に量子コンピュータ導入ー作業員の移動距離を28%短縮	半導体製造装置の最適配置に“D-Wave”の提供する量子コンピュータを適用し、作業員の移動距離が短縮した結果を発表した。
2019.09.10	IBM 、53量子ビットの新型量子コンピュータを発表	IBMにとって第14世代目となる量子コンピュータを発表。同システムの心臓部には前世代に比べ2倍以上となる量子ビットを搭載。

年月日	提供概要（企業名 & 大学）	提 供 内 容
2019.10.24	Google 、量子コンピュータで「量子超越性」を実証—スパコンを越える。（だが、IBM は反論した。欠陥があると、1 万年もかからない）	Google は自社開発の量子コンピュータの技術が従来型を大幅に上回り、重要なマイルストーンである「量子超越性」を達成。 （スパコンで 1 万年かかる処理を 200 秒で処理したと発表した）
2019.10.30	NEC と東北大学 、量子アニーリングを活用した SI 実務の高度化で共同研究を開始。	東北大学と NEC は量子アニーリングマシンを活用した SI 実務の高度化を推進する共同研究を開始したと発表した。
2019.11.11	Microsoft は、「Azure Quantum」で提携— Honeywell ハネウェルと提携。	量子コンピューティングに関する「Azure Quantum」や複数の企業との提携を発表した。
2019.12.03	Amazon 、AWS が量子コンピューティングサービス「Amazon braket」発表—研究センター&ラボ。	「AWS re:Invent」で、量子コンピューティングに関する 3 つの新たな取り組みを発表した。D-Wave、IonQ、Rigetti などの量子コンピューティング企業が提供するハードウェアを試すことができる。
2019.12.10	インテル 、量子コンピューティングの商用化に向け「Horse Ridge」チップを発表。	インテルは、「極低温域で動作」する量子制御チップ（開発コード名 Horse Ridge）を発表した。
2019.09.10	ケンブリッジ大学 の量子コンピュータベンチャーが日本参入。	英国ケンブリッジ大学発の量子コンピュータベンチャーの Cambridge Quantum Computing が日本法人を設立した。
2019.12.20	東京大学と IBM 、量子コンピュータ「Q」を日本で運用	IBM と東京大学は、IBM の量子コンピュータ「IBM Q System One」を日本で運用し、その活用における広範な取り組みを推進。
2019.12.20	NEC 、アニーリングマシンの共創サービスを提供—2023 年の量子マシン実用化を目指す	NEC は、スパコンを活用したアニーリングマシンによる共創サービスを提供。量子コンピューティング領域に本格参戦。2023 年の実用化を目指す

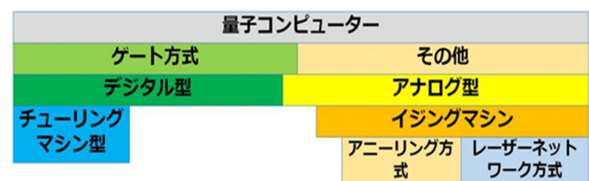
現在は、開発各社が量子コンピュータを研究室に配置したまま、

・・・クラウド技術を経由して、全世界に自宅から、遠隔で利用できる環境を提供している。

特に IBM は登録することで、個人で 5 量子ビットのマシンを無料で使用し、計算することが出来る。

・・・このように、量子コンピュータの研究・開発には、様々な企業や団体による異業種が持つ技術やアイデア、ノウハウ、知識によるオープンイノベーションにより研究がさらに進む。

今後もゲート方式とイジングモデル方式の
双方の研究が進み、それぞれの良さを吸収して、
量子コンピュータの進化を遂げて行くだらう。



量子コンピュータの開発は、市場の動きは活発だが、困難を極めていると言われる
最大の理由の一つは、「**壊れやすい量子ビットを安定した状態に保つこと**」が大変であると言う

その次に重要なのが、量子ゲートをうまく組み合わせることで、従来のコンピュータよりも
少ない計算量で計算する操作の手順として「**量子アルゴリズム**」の開発が必要となる

【コンピュータにアルゴリズムをソフト的に実装するものがコンピュータプログラムである。人間より速く大量に計算ができるのが強みであるが、その計算が正しく効率的であるためには、正しく効率的なアルゴリズムに基づいたものでなければならない】