

量子力学の反常識が創り出す 量子コンピュータの世界

京都産業大学 外山 政文

1. 計算とは自然現象・原始コンピュータ

量子コンピュータとは何かを考える前に、まず計算とは何かを考えてみましょう。単に「計算」と言うと、論理的作業だと思っている人は少なくないでしょう。図1を見てください。1mの高さの台の上に置かれた半径 R の1/4円弧に沿って小物体を落下させます（摩擦などは無視します）。そして、水平運動を通してP点で放物運動に変えます。その水平到達距離 X を観測することにより、 R の平方根を計算できます。即ち「計算とは自然現象（物理現象）」です。少し大げさに、「ニュートンの運動方程式が平方根を計算する」とも言えます。この「計算とは自然現象」をキーワードにして、量子コンピュータの原理と開発の現状について理解しましょう。

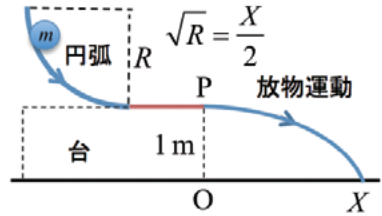


図1. 原始コンピュータ

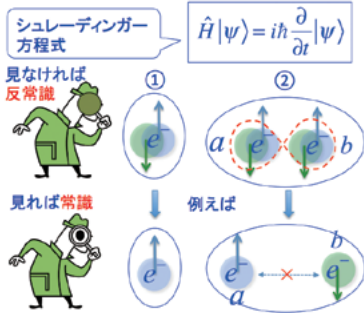
2. 「見なければ反常識、見れば常識」という量子の世界

量子コンピュータは、「量子力学」というミクロの世界の力学法則に基づいています。そこで少し寄り道をして、量子力学とはどのようなものか、その世界を垣間見ましょう。量子の世界では全ての粒子が波動性を備えています。これを「粒子と波動の二重性」と言います。この二重性を見事に記述するのがシュレーディンガー方程式と言うものです。図2を見てください。奇妙な形をしています。この方程式の不思議な格好をした $|\psi\rangle$ を「状態ベクトル」と言い、粒子の「量子としての状態」を表します。そして、この $|\psi\rangle$ に量子力学の不思議が凝縮されていると言っても過言ではありません。

その量子の世界を一言で言えば、「見なければ反常識、見れば常識」の世界と表現できます。ここで、「見る」というのは「観測する」という意味です。シュレーディンガー方程式は、この観測過程そのものには関与しません。

では、もう少し具体的に、我々にとって身近な「電子」でこの奇妙な世界を理解しましょう。電子は質量と電荷の他に、棒磁石に少しだけ似た性質の「スピン（自転）」という量を持っています。しかし、スピンは古典的な回転という考えでは到底理解できない量子的な量なのです。そのスピンの基本的な状態を、例えば上向きスピン $|\uparrow\rangle$ 、下向きスピン $|\downarrow\rangle$ と表現します。

図2の反常識①は、「一つの電子が同時に $|\uparrow\rangle$ と $|\downarrow\rangle$ になっている」という奇妙な状態を表しています。これを「重ね合わせ状態」と言います。50%ずつの重ね合わせは、 $(|\uparrow\rangle+|\downarrow\rangle)/\sqrt{2}$ と表されます。



この状態は実は横向きスピン状態 $|\rightarrow\rangle$ と同じなのです。電子のスピンはこれ程までに奇妙です。しかし、この重ね合わせ状態を見ると、例えば、1/2の確率で $|\uparrow\rangle$ 又は $|\downarrow\rangle$ に決まります。つまり「見れば常識」です。この現象を「波束の収縮」と言い、量子コンピュータでは決定的な役割を持ちます。

続いて、反常識②について考えましょう。これは、上で述べた重ね合わせの原理を2つの電子に適用した場合に生じる反常識です。

例えば、 $(|\uparrow\rangle_a |\downarrow\rangle_b + |\downarrow\rangle_a |\uparrow\rangle_b) / \sqrt{2}$ のような状態です。これは、二つの電子 a, b がそれぞれ $|\uparrow\rangle$ と $|\downarrow\rangle$ の重ね合わせ状態にあり、更に、それらがもつれ合っていることを表しています。これを、「量子もつれ合い (量子エンタングルメント)」と言います。このもつれた2つの電子を互いに遠く引き離しても、原理的にはこのもつれ合いは保持されます。これがこの現象の最も不思議なところで、「量子テレポーテーション」の通信原理にもなっています。仮に2つの電子を互いに遠く離しておいて、どちらか一方のスピンを見たために、その電子のスピンが上向きに決まったとしましょう。すると、瞬時に (超光速で) もう一方の電子のスピンが下向きに決まってしまう。これを「量子もつれによる量子力学の非局所性」と言います。これも波束の収縮のせいです。この超光速相関は、量子力学の反常識の中でも最も謎めいたもので、あのアインシュタインが「薄気味悪い相互作用」と言って忌み嫌いました。しかし、古典通信の援用無しに、この非局所相関のみにより、意味のある超光速通信ができません。少し話が逸れましたが、実はここで考察した反常識が量子コンピュータの作動原理なのです。

3. 量子コンピュータとは何か？ タイプの異なる作動方式

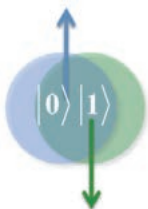


図3. 量子ビット

量子コンピュータとは何か？ とりあえず大雑把に、「見なければ反常識の世界で量子状態 $|\psi\rangle$ を時間発展させ、それを見ることによって確定的な情報を得るマシン」、としておくことにしましょう。見なければ反常識の世界では、重ね合わせと言う奇妙な状態が支配しています。そこで、量子計算では、図3のような基本的な重ね合わせ状態を用意して、それを「量子ビット (キュービット)」と呼びます。

ここで、 $|0\rangle$ と $|1\rangle$ は古典ビットの0,1という古典情報に対応する量子状態と考えることができます。ちなみに、前出の電子のスピンを用いて、 $|0\rangle=|\uparrow\rangle$ 、 $|1\rangle=|\downarrow\rangle$ とすれば、量子ビットの物理モデルが理論的には簡単に実現します。

では、量子コンピュータの代表的な作動方式について考察しましょう。

・**量子ゲート方式**：先ず、古典デジタル・コンピュータの量子力学的拡張版について理解しましょう。正に、最初に述べた「量子コンピュータとは何か？」そのものズバリの方式です。

本記事の冒頭で考察した原始コンピュータでは、物体に放物運動という時間発展をさせ、それを測定して答えを得ています。これと同じように、ゲート方式の量子コンピュータでは、見なければ反常識の世界で、「量子ゲート」と言うもので量子ビットを時間発展させます。そして、その出力状態を測定して波束の収縮により確定的な情報を引き出します。

次に、重ね合わせゲート H による1量子ビットの簡単な例で理解しましょう。図4(a)と(b)は、異なる入力状態 $|0\rangle$ と $|1\rangle$ に対して H がどのように作用するかを表しています。量子ゲートによる量子状態の時間発展は、原始コンピュータの水平運動+放物運動の部分に対応すると思っても良いでしょう。この例では、出力を「測定ゲート」で測定することにより、量子状態 $|0\rangle$ 又は $|1\rangle$ が同じ確率 $1/2$ で得られます。これは、古典情報0,1がランダムに $1/2$ の確率で得られるとも解釈できます。その意味で、測定ゲートは、古典的な世界への情報の橋渡しの役目を担っています。ここで、もし確実に古典情報0を得たい場合には工夫が必要で、図4(c)の様に、もう一度ゲート H で時間発展させてから測定すると確実に量子状態 $|0\rangle$ が測定され、古典情報0を得ることができます。この様に、望む処理を行おうと思えば、量子状態をどのように時間発展させれば良いかを考えた計算手順書が必要になります。それを「量子アルゴリズム」と言います。それは、基本的には数学的に表現され、古典コンピュータの論理回路みたいな「量子回路」(図4)に翻訳されます。ゲート方式量子コンピュータは、この量子アルゴリズム無くして無用の長物となります。逆に、解きたい目的に最適な量子アルゴリズムを開発すれば、いろんな問題が解けます。その意味で、ゲート方式の量子コンピュータは、「汎用(万能)量子コンピュータ」とも言われます。量子アルゴリズムについては、現在のところ、「素因数分解」や「量子探索」など、幾つかの重要な量子アルゴリズムが開発されています。

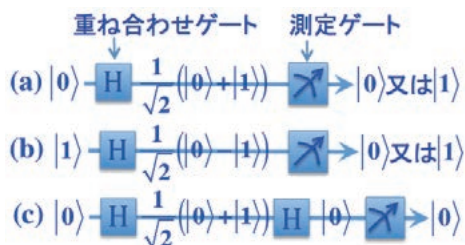


図4. 量子ゲート、量子回路

図4(c)の様に、もう一度ゲート H で時間発展させてから測定すると確実に量子状態 $|0\rangle$ が測定され、古典情報0を得ることができます。この様に、望む処理を行おうと思えば、量子状態をどのように時間発展させれば良いかを考えた計算手順書が必要になります。それを「量子アルゴリズム」と言います。それは、基本的には数学的に表現され、古典コンピュータの論理回路みたいな「量子回路」(図4)に翻訳されます。ゲート方式量子コンピュータは、この量子アルゴリズム無くして無用の長物となります。逆に、解きたい目的に最適な量子アルゴリズムを開発すれば、いろんな問題が解けます。その意味で、ゲート方式の量子コンピュータは、「汎用(万能)量子コンピュータ」とも言われます。量子アルゴリズムについては、現在のところ、「素因数分解」や「量子探索」など、幾つかの重要な量子アルゴリズムが開発されています。

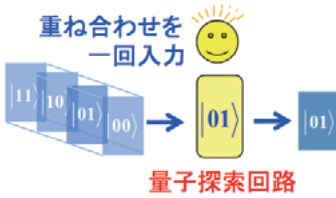


図5. 重ね合わせを入力

図5のイラストは、量子重ね合わせと量子探索アルゴリズムが如何に強力かを示す例です。4枚の「量子カード」を重ね合わせ状態にして、量子回路に一回入力するだけで量子回路に隠されている一枚の量子カード|01>を見つけることができます。原理的には、2量子ビットあればこのような探索が可能です。重ね合わせを利用すると、 $2^2=4$ 通りの計算を2量子ビットで同時に行えるからです。古典的なやり方では、重ね合わせが使えないので、一枚ずつ入力するしか方法がなく、コード列01を見つけるのに平均して約2回の試行が必要です。

・量子アニーリング方式：例えば、原始コンピュータで、放物運動に空気抵抗が働いたり、水平運動が少し傾いていたりすると、正しい答えが得られません。これと同じように、ゲート方式量子コンピュータの開発には、量子ゲート演算に伴うエラー訂正など克服しなければならない問題があり、大きな技術的困難が伴います。そこで、量子ゲートも量子アルゴリズムも必要としない、特定の問題だけを解く方式が考え出されました。「量子アニーリング（焼きなまし方式）」と呼ばれます。では、量子ゲートも量子アルゴリズムも無しに、どのようにして量子状態を時間発展させるのでしょうか？この方式では、個々の或いは数個の量子ビットを量子ゲートで時間発展させるのではなく、量子ビット全体の環境を変えつつ自然法則に任せて量子ビット全体を時間発展させます。図6のように、スピン間の結合をオフにした（破線）完全な重ね合わせ状態から、十分にゆっくりと、とは言ってもマイクロ秒のオーダーで、スピン間に相互作用を加えて行きながらスピン全体の環境を変化させます。すると、自然に全てのスピンの上向きか下向きに決まった状態に最終的に落ち着きます（材料の焼きなましと同じです）。この時、スピンの全体として「基底状態」という最低のエネルギー状態であれば、その時のスピンの上向きと下向きの組み合わせが求める解になります。つまり、自然法則自体が量子アルゴリズムです。但し、基底状態が解きたい問題の解に対応するように、解く問題に応じて、スピン間の相互作用をプログラムしなければなりません。また、急激に環境を変化させると、基底状態という条件が保障されなくなり誤答に導かれます。実は、この量子アニーリングのプロセスで、「量子トンネル効果」と言う量子力学特有の現象が威力を発揮します。正に量子計算である所以です。

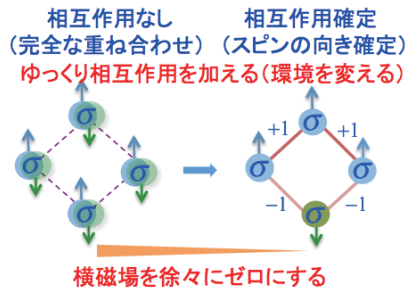
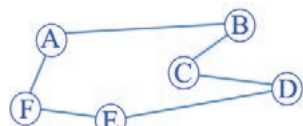


図6. 量子アニーリング

この時、スピンの全体として「基底状態」という最低のエネルギー状態であれば、その時のスピンの上向きと下向きの組み合わせが求める解になります。つまり、自然法則自体が量子アルゴリズムです。但し、基底状態が解きたい問題の解に対応するように、解く問題に応じて、スピン間の相互作用をプログラムしなければなりません。また、急激に環境を変化させると、基底状態という条件が保障されなくなり誤答に導かれます。実は、この量子アニーリングのプロセスで、「量子トンネル効果」と言う量子力学特有の現象が威力を発揮します。正に量子計算である所以です。

この量子アニーリング方式は、従来のスパコンでも解くのに数億年かかるような問題、例えば、図7のような「巡回セールスマン問題」のような特定の問題（「組み合わせ最適化問題」と言う）を解くのが目的です。都市の数が30ぐらいになると、もはや従来のスパコンでも手に負えません。数億年かかります。この問題で、移動距離最小と言う目的は基底状態という条件によって保障されます。



移動距離が最小になるように各都市(A,B,...,F)を一度だけ巡回する

図7. 巡回セールスマン問題

4. 量子コンピュータ開発の現状：タイプの異なる量子コンピュータ

さて、それでは実用的量子コンピュータは果たして開発されているのでしょうか？ 量子コンピュータ開発の第一の鍵は量子ビットの開発です。これまで、原子、イオン、量子ドット（人工原子）、超伝導素子（幾つかのタイプがある）など、様々な物理系が研究されてきました。さらに、量子力学の反常識②で触れた量子もつれが量子ビット間に実際に生じるかどうか、量子コンピュータとしての試金石になります。先に考察した作動方式を基に、量子コンピュータの開発の現状を見て行きましょう。

・ **NMR（核磁気共鳴）量子コンピュータ**：これはゲート方式量子コンピュータの先駆的マシンと言えます。核磁気共鳴というのは医療機器のMRIと同じ原理です。電子スピンと同じスピンを持つある原子核のスピンを一つの量子ビットにします。図8の「多原子分子」の例は、赤色の原子の原子核スピンの量子ビットに対応し、5量子ビットを意味します。このNMR量子コンピュータは、例えば、図5のような量子アルゴリズムの実験台として重要な役割を果たしましたが、アボガド数個の分子を集団として扱うための原理的な問題や、多原子分子作製の問題などで、量子ビットの数は10数個程度が限界で、実用機には至っていません。また、このNMR量子コンピュータでは、量子ビット間に量子もつれが実際には生じていないという指摘があります。

試験管

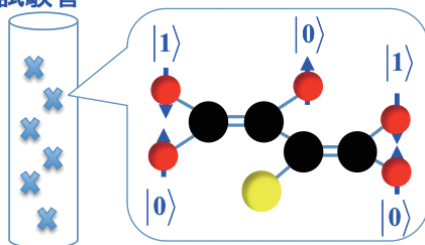


図8. NMR 量子ビット

で、量子ビットの数は10数個程度が限界で、実用機には至っていません。また、このNMR量子コンピュータでは、量子ビット間に量子もつれが実際には生じていないという指摘があります。

・ **D-Wave量子コンピュータ**：ゲート方式の実用的な汎用量子コンピュータの開発が手詰まりの状況において、前記の量子アニーリング方式をハードとして具現化した商用マシンが突如大ブレイクしました。2011年頃のことです。



当初は、「断熱量子コンピュータ」と呼ばれましたが、この作動方式は、量子アニーリング方式と同じものであることがわかりました。

このマシンは、図6のスピンを、「超伝導磁束量子ビット」という「人工スピン」(図9)に置き換えたもので、それを今では2千個も実装しています。この超伝導素子は、ニオブという超伝導物質のループ状のもので、極低温(絶対温度約0.02度)で量子ビットとして機能します。つまり、右回りと左回り電流が同時に存在するようになり、重ね合わせ状態が実現します。

D-Waveという名称は、初期に研究されうまく行かなかった「高温超伝導」のD波と言う波にちなんでいます。このD-Waveでは、量子ビット間の量子もつれ効果を実験的に確認されています。最近、NASAとグーグルが、このマシンが一部の最適化問題を高速で解くことを確認しました。但し、まだまだ課題が残されています。

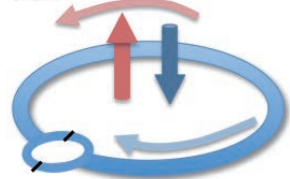


図10. IBM QCの心臓部。
IBMのHPより引用

IBMゲート方式量子コンピュータ (IBM QC) :
それでは、実用的ゲート方式汎用量子コンピュータ実現の夢はどうなったのでしょうか? IBMが、2016年にゲート方式量子コンピュータを無償公開しました。「クラウド量子コンピュータ」として、世界中どこからでも、やから使えます。このマシンでは、D-Waveマシンと異なるタイプの超伝導量子ビット素子が実装されています。現在のところ、5量子ビット及び20量子ビットマシンに止まっていますが、標準的な量子ゲートはほぼ全て実装されています。「量子ビット誤り訂正」の技術が実装されているとすると画期的で、実用的なマシンへの第一歩と言えるかも知れません。但し、IBMのHP (<http://www.research.ibm.com/quantum/>) からログインすると「Approximate Quantum Computing (近似的な量子計算)」という奇妙なメッセージに出くわします。実際、現状ではゲート演算エラーや測定エラーが無視できません。その意味ではアナログ的です。それでも、ゲート方式量子コンピュータを使えること自体、感動的なことです! 興味を持たれた方は、IBM QCを使って見てください。様々な量子回路の量子計算や量子力学の基礎実験ができます。

・その他の量子(?) コンピュータ: 先に考察した代表的な作動方式と趣の異なる、光を用いた量子コンピュータが最近日本の研究グループによって発表さ

上向きスピンの電流の向き



下向きスピンの電流の向き

図9. 超伝導磁束量子ビット、
Nature 473,195(2011)より引用

れ話題になっています。その一つは、「量子ニューラルネットワーク (QNN)」と命名されたマシンで、光による「擬似スピン」の集団を光ファイバー中に周回させて擬似スピン間の作用で答えを出します。図7のような組み合わせ最適化問題に特化していて、その名称の通り、「量子人工知能」の構築が目的です。既に「QNNクラウド」としてネット上で無償公開サービスが始まりました (<https://qnncloud.com/>)。一方、このマシンには、真の量子コンピュータではないという反論があり大きな議論を呼んでいます。従来の集積回路で光擬似スピンの操作を行っていて、擬似スピン間に量子もつれ相関が実際にはない、と言うのがその理由です。

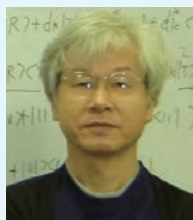
もう一つは、反常識②で触れた量子もつれを通信原理とする量子テレポーテーションを用いた「大規模光量子コンピュータ」と言うものです。光の量子テレポーテーション回路で計算の基本単位を構成し、その回路に、ループ状に並んだ光パルスを何度もループさせることにより、大規模な計算を行う方式です。量子テレポーテーション回路の機能を変えることにより様々な計算を実行できると謳われています。その意味で汎用性も秘めています。

5. 今後の展望、実用的量子コンピュータ開発の本当の動機は？

ゲート方式マシンについては、IBMが、2020年には100量子ビットマシンの商用化を始めると言う計画があります。インテルも17量子ビット超伝導チップを既に発表しました。一方、D-Wave量子アニーリングマシンは、量子ビット数が4千個まで拡張されるという計画があり、今後、人工知能への展開が期待されるでしょう。また、量子ゲート方式と量子アニーリング方式を融合させようと言う動きもあります。量子コンピュータ開発は、光量子コンピュータも含め、「量子コンピュータとは何か」という議論を巻き込みつつ、しばらくは百花繚乱の様相を呈するのではないのでしょうか。

最後に蛇足を一つ。実は、量子力学の「多世界解釈」を実証する目的で量子コンピュータの原理を考えた、という話があります。筆者自身はこの話に大いに興味がありますが、皆さんは如何でしょうか。宇宙の話にも「多元宇宙論 (マルチバース)」というのがあります。

著者紹介 外山 政文(とやま まさふみ)



京都産業大学 コンピュータ理工学部教授、益川塾指導教授。理学博士。大阪大学核物理研究センター理論部研究室員、大阪工業大学非常勤講師、(カナダ)McMaster大学 Postdoctorate Fellow、京都産業大学 計算機科学研究所講師、工学部情報通信工学科助教授・教授、を経て現職。訳書に「量子コンピューティング」(共訳)(森北出版)。