

宇宙一冷たい場所で動く

D-Waveの量子コンピュータは、我々が現在使っているコンピュータ(古典的コンピュータ)とも、長年研究されてきた従来型量子コンピュータ(量子ゲート方式)とも、全く異なる仕組みで動く。どのようなものなのか、5ステップで解説しよう。

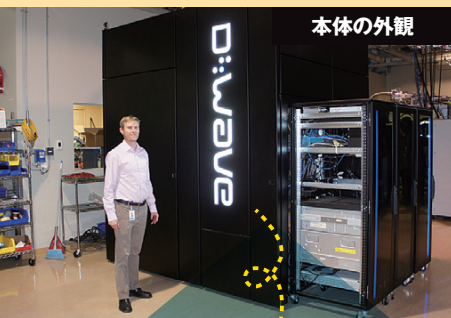
STEP 1

どんなハードウェアか

1台10億円とも言われるD-Waveマシンのハードウェアを見てみよう(図6)。筐体はサーバーラックのような外観をしている。筐体内には銀色に輝く筒状の「希釈冷凍機」があり、冷凍機のさらに内側に、D-Waveマシンの心臓部である超伝導回路が納められている。

冷凍機を使うのは、超伝導回路を絶対零度(摂氏マイナス273.15度)に限りなく近い「20ミリケルビン」という温度に冷やす必要があるためだ。この冷凍機の中は「宇宙で一番冷たい場所」と言われている。

図6の中央の写真が超伝導回路だ。ここには量子コンピュータにとって最も重要な、量子力学の現象を発生させる「量子ビット」が実装してある。量子ビットは、ニオブ(Nb)



本体の外観

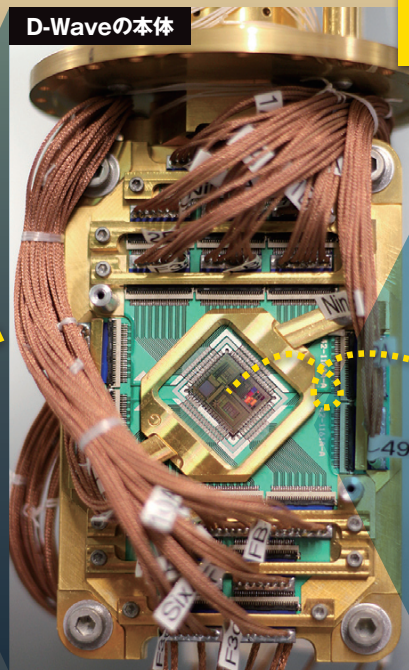
消費電力は15キロワット。電力消費のほとんどは、冷凍機によるものだ

超伝導回路で量子ビットを実現

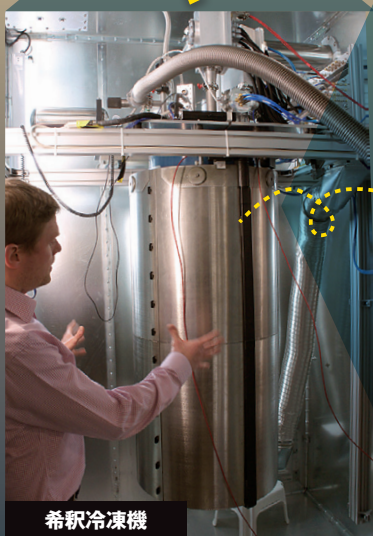
図6 D-Waveのハードウェア

ニオブ(Nb)を材料とする超伝導回路に、量子ビットが512個と、量子ビット間の相互作用を定める「プログラマブル・マグネティック・メモリー」を9万6000個実装してある

1個の量子ビットが3次元イジングモデルにおける1個のスピンとなる



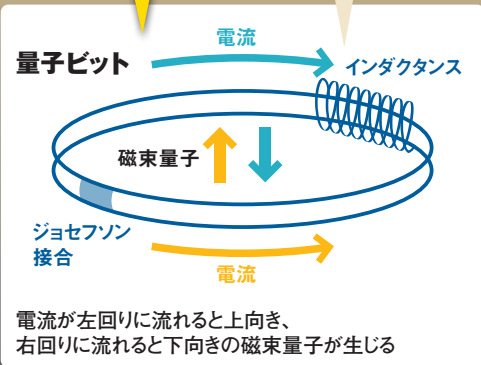
D-Waveの本体



希釈冷凍機

超伝導回路は限りなく絶対零度に近い「20ミリケルビン」で稼働するため、ヘリウムを使って冷却する「希釈冷凍機」に納める

ケルビン: 温度の単位。絶対零度(摂氏マイナス273.15度)をゼロとする



磁束量子パラメトロン(QFP)

磁束量子の磁場を増幅する

超伝導量子干渉計(dc SQUID)

磁束量子の磁場を計測する

という超伝導材料で作られたループで、ループに左回りの電流が流れると上向き、右回りに電流が流れると下向きの「磁束量子」が発生する。磁束量子とは、物体に磁力をもたらす「磁束」の最小単位である。ここでは大まかに「量子ビットの中には、上向きまたは下向きの信号が流れる」と理解してほしい。

磁束量子の磁場はとても小さいので、「磁束量子パラメトロン(QFP)」で増幅する。増幅した磁場を「超伝導量子干渉計(dc SQUID)」で計測する。量子ビットとQFPはいずれも最初に日本で開発された。

STEP 2

実体は何か

D-Waveマシンは「実験装置」だ。

従来型コンピュータとの違いは、D-Waveマシンの中では現実の世界の自然現象と同じ現象が実際に発生することだ。そのために、内部に特殊な磁性体(磁石)である「スピングラス」の模型を実装してある。従来型コンピュータは、自然現象をシミュレーションすることはできるが、実際の現象を発生させることはできない。

実験装置であるD-Waveマシンで「組み合わせ最適化問題」が解けるのはなぜか。それはD-Waveマシンの誕生の経緯が深く関わっている。

STEP 3

どういう経緯で生まれた?

D-Waveマシンは東工大の西森教授が考案した「量子アニーリング」がきっかけで生まれた。量子アニーリングは、「自然現象を借用したアルゴリズム」の一つである。

「自然現象を借用したアルゴリズム」は、従来型コンピュータにおいて「組み合わせ最適化問題」などを効率的に解くために使われている。著名な例の一つが「遺伝的アルゴリズム」だ(図7)。

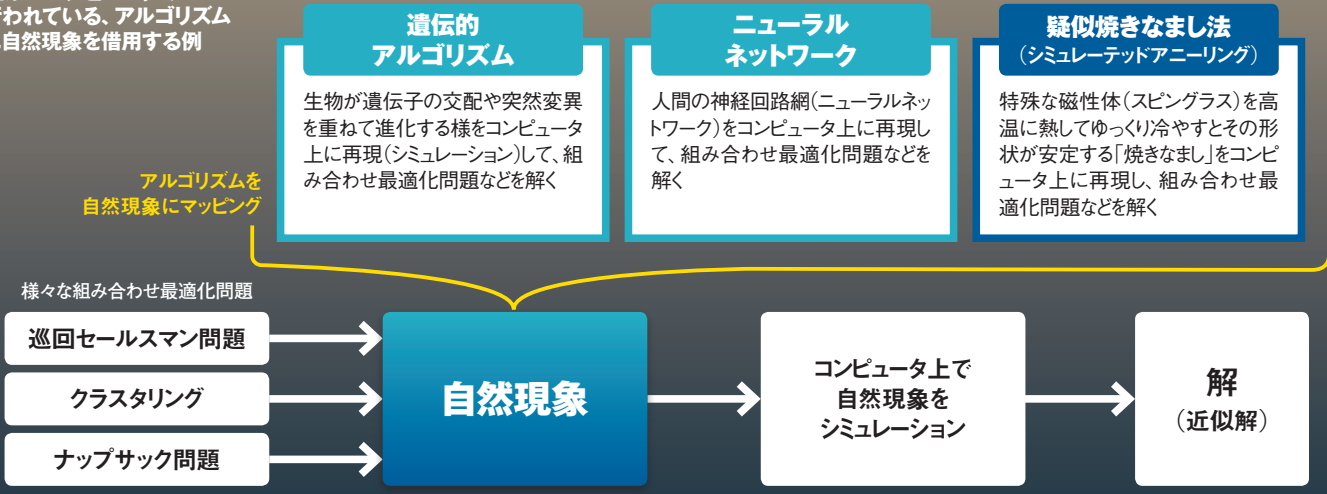
遺伝的アルゴリズムではまず、組み合わせ最適化問題という数学上の問題を「生物の遺伝」という自然現象にマッピングする。そして従来型コンピュータの上で生物の遺伝現象をシミュレーションし、遺伝の結果を組み合わせ最適化問題の近似解とみなす。

このような自然現象を借用したアルゴリズムの一つに、磁性体を高温にしてゆっくり冷やすと形状が安定するという「焼きなまし(アニーリング)」という現象を借用する「シミュレーテッドアニーリング(SA、疑似焼きなまし法)」がある。SAは従来型コンピュータの上で焼きなまし現象をシミュレーションして組み合わせ最適化問題の近似解を得ていた。

1998年に東工大の西森教授は、現実の焼きなまし現象ではなく、理論上の現象である「量子力学の焼きなまし現象」をアルゴリズム

自然現象の仕組みを借用して、難問を解く

図7 従来のコンピュータで行われている、アルゴリズムに自然現象を借用する例



ムに借用した方が、より高速に組み合わせ最適化問題を解けるのではないかと考えた。

西森教授は、物理現象を借用してアルゴリズムを考案する「情報統計力学」の研究者である。様々な物理現象をアルゴリズムに借用する試行を繰り返す中で、このようなアイデアを思いついた。そして研究室の大学院生だった門脇正史氏と2人で、「量子力学の焼きなまし現象」を借用したアルゴリズム、すなわち「量子アニーリング」を考案した(図8)。

門脇氏がコンピュータシミュレーションによって検証したところ、「通常(古典力学)の焼きなましではなく『量子力学の焼きなまし』をアルゴリズムに借用した方が、組み合わせ最適化問題の厳密解を、より高い確率で得られることが分かった」(門脇氏)という。

量子アニーリングはアルゴリズムなので、西森教授は「量子力学の焼きなまし現象」を従来型コンピュータ上でシミュレーションすればよいと考えていた。ところが2004年、西森教授が想像すらしない、画期的な発想をする人物が現れた。D-Wave Systemsの創業者、ジョーディー・ローズ氏だ。

ローズ氏の発想は、「量子力学の焼きなまし現象」が発生する実験装置を作るという途方もないものだった。「量子力学の焼きなまし現象」を従来型コンピュータ上でシミュレーションするよりも、実験装置で実際の現象として発生させた方が、結果を高速に得ら

れると考えたのだ。そしてその実験装置を、超伝導回路を使って作成した。これが2011年に商用化したD-Waveマシンの誕生の経緯であり、D-Waveマシンで組み合わせ最適化問題が解ける理由である。

STEP 4

どんな実験をする?

D-Waveマシンは、特殊な磁性体であるスピングラスを模した「3次元イジングモデル」という模型を実装したものだ(図9)。そして、この磁性体のエネルギーを最小にする実験を行うと、組み合わせ最適化問題が解ける。

まず、3次元イジングモデルが模しているスピングラスについて説明しよう。

一般に磁性体は、原子のスピンの向き(上下の2値だけ)とスピン同士の相互作用によって、物体が持つエネルギーの大小が決まるという特性を持つ。エネルギーが小さいほど磁性体の形状は安定し、大きいと不安定になる。通常の磁性体はスピンの向きが全て同じだとエネルギーが最小になり、形状が安定する。しかし特殊な磁性体であるスピングラスは、スピンの向きがバラバラでもエネルギーが最小になる。

そしてD-Waveマシンで行う物理実験とは、スピン同士の相互作用があらかじめ決まっているスピングラスに対して「量子力学の

2度あった、発想のジャンプ

図8 D-Wave Systemsの量子コンピュータが生まれた経緯



量子力学の焼きなまし現象を使った方が高速に解を得られる! (1998年)

東京工業大学の西森秀稔教授と門脇正史氏



実際に量子アニーリングが発生するハードウェアを作ろう! (2004年)

カナダD-Wave Systemsのジョーディー・ローズ氏

疑似焼きなまし法
(シミュレーテッドアニーリング)

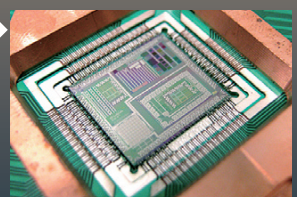


量子アニーリング



D-Waveの量子コンピュータ

量子力学の焼きなまし現象が起きる専用装置



焼きなまし現象」を発生させるというものだ。こうすると、スピングラスのエネルギーは最小になり、エネルギーを最小にするスピンの向きの組み合わせ(スピン配列)が分かる。

D-Waveマシンの中で、どのように3次元イジングモデルが実装されているかを説明しよう。3次元イジングモデルのスピンは量子ビット(図6の右側の絵)で表されている。量子ビットの中で発生する磁束量子の向きが、スピンの向きとなる。量子ビットは、それぞれが隣合う量子ビットに接続している。そして量子ビット間の相互作用は、「プログラマブル・マグネティック・メモリー」という超伝導回路を使って設定する。相互作用の設定などは、D-Waveマシンに接続したパソコンから実行する。

模型ではない本物の磁性体では、スピン同士の相互作用を自由に設定したり、実験結果であるスピンの向きを自由に計測したりすることはできない。D-Waveマシンはあくまでもスピングラスの模型なので、これらの操作ができる。

D-Waveマシンの中で「量子力学の焼きなまし現象」は、実際にどのように発生しているのか。本特集の中でも最も重要なこの問題については、34～35ページの別掲記事で詳しく解説する。

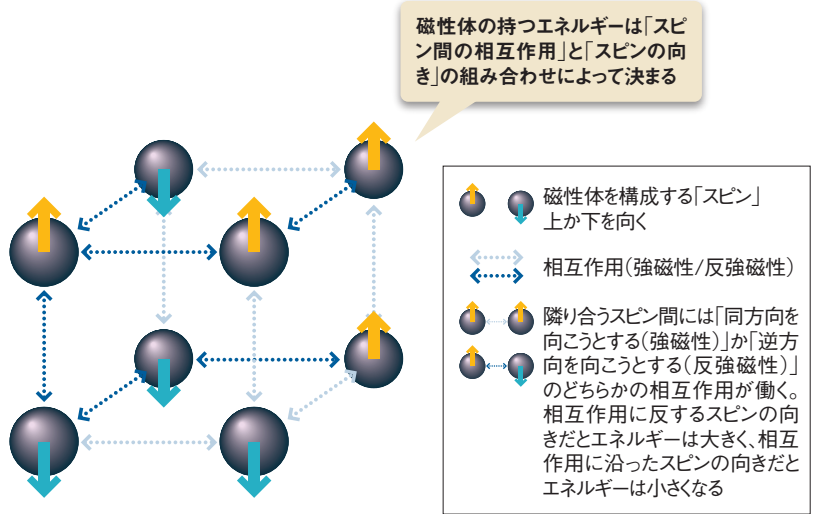
STEP 5

実験結果は何を意味するか？

D-Waveマシンで実験を行うと、スピングラスのエネルギーを最小にするスピン配列が分かる。スピンの個数を「N」とすると、スピン配列の数は「2のN乗」となる(図10)。D-Waveマシンの実験結果は、「2のN乗個のスピン配列の中から、エネルギーが最小になるスピン

特殊な磁性体「スピングラス」を模した実験装置を作る

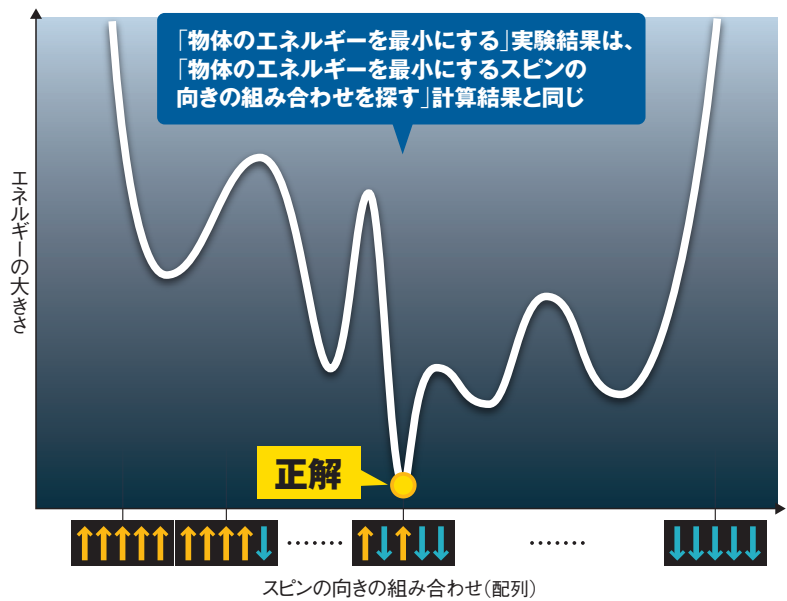
図9 3次元イジングモデルの概念図



スピン間の相互作用が特定のパターンである場合に、磁性体のエネルギーが最小になる実験をする

実験結果は「組み合わせ最適化問題」の解に等しい

図10 3次元イジングモデルが解いている問題の図解



配列を探し出した結果」と言える。

このようなスピン配列を、従来型コンピュータを使った計算で探し出すのは非常に難しい。もし総当たり方式でスピン配列を探し出すとなると、その計算時間はスピンの数Nに対して2のN乗で増加する。つまり、スーパーコンピュータでも現実的な時間で解くことができなくなる。

ところがD-Waveマシンの実験結果を見れば、計算をしなくてもエネルギーを最小にするスピン配列が分かる。つまりD-Waveマシンは、スピングラスのエネルギーを最小にするスピン配列を探すという「組み合わせ最適化問題」が解けるのだ。

D-Waveマシンの最新モデル「D-Wave Two」は、512個のスピンを備えている。これで実

これが量子アニーリングの正体だ

D-Waveマシンの中で「量子力学の焼きなまし現象」、つまりは量子アニーリングがどのように実行されるのか。実際の実験の様子を説明しよう(図A)。

まず、解きたい組み合わせ最適化問題に合わせて、3次元イジングモデルにおけるスピン間の相互作用を設定する。これは従来型コンピュータにおけるプログラミングに相当する。

次に、スピン間の相互作用の強さをゼロ

にすると同時に、3次元イジングモデルに「横磁場」を加える。実際の操作としては、超伝導回路に対して特殊な電流を流す(1の状態)。

横磁場を加えると、スピンの向きは上向きと下向きが「重ね合わせて存在する」という状態になる。「重ね合わせ」とは量子力学の現象の一つだ。この場合は、スピンの「上向きか下向きかどちらか分からないが、測定するとどちらかに定まるという状

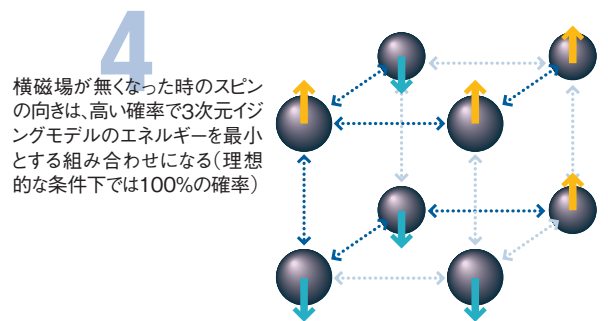
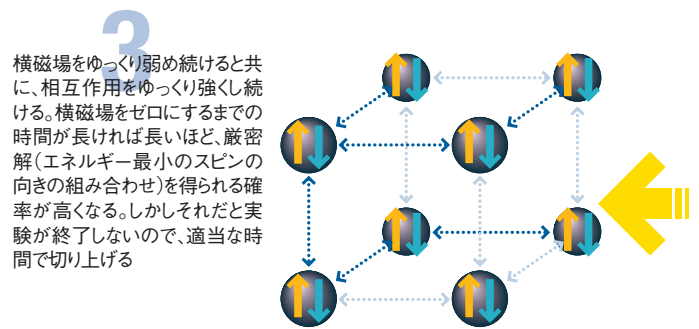
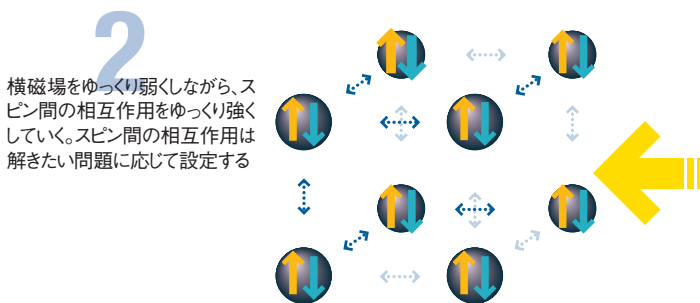
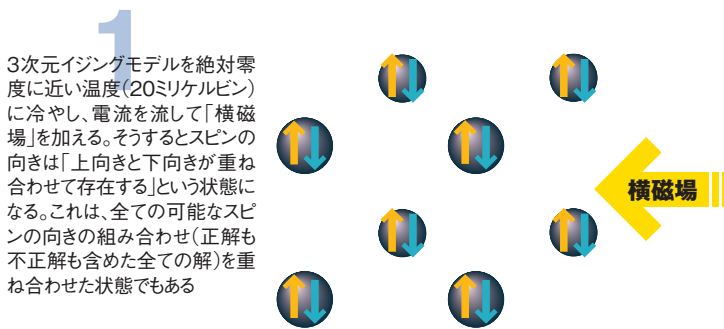
態」(東工大の西森教授)である。

続けて横磁場をゆっくり弱くすると同時に、スピン間の相互作用をゆっくり強くしていく(2から3の状態)。そして横磁場をゼロにした時、スピンの向きは高い確率で3次元イジングモデルのエネルギーを最小とする組み合わせになる。これが解だ。

量子アニーリングの理論上は、横磁場をゼロにするまでの時間が長ければ長いほど、厳密解を得られる確率が高くなる。

「横磁場」を加えてゆっくり減らす

図A D-Waveの内部で発生する量子アニーリングの図解



現できるスピン配列は「2の512乗」だ。D-Wave Twoは理論上、2の512乗のスピン配列の中から、エネルギーが最小になるスピン配列をわずか数ミリ秒で探せる。

スピングラスの最適配列を求める組み合わせ最適化問題以外の問題も解ける。その場合は、求めたい問題をスピングラスのスピンとスピン間の相互作用の関係にマッピングして

実験を行う。例えば巡回セールスマン問題なら、巡回する都市をスピングラスのスピンに、都市間の距離をスピン間の相互作用に当てはめる。実際にはもっと複雑なマッピングを行うが、ここではイメージをつかんでほしい。実験で分かったスピングラスのエネルギーを最小にするスピン配列が、移動距離を最短とする経路の解となる。

しかし時間が長くなると量子力学の現象である「重ね合わせ」が消えてしまう。そのため数ミリ秒程度で実験を切り上げる。

実験時間が短いと、厳密解が得られる確率は低くなる。そこでD-Waveマシンでは、実験を1000回繰り返し、最も良い値を「解」と見なす。つまりD-Waveマシンで得られる解は、厳密解ではなく「近似解」となる可能性もある。それでも、「従来型コンピュータで実行するシミュレーテッドアニーリングと比べて、より厳密解に近い近似解が得られる。また解を得るまでの時間も短い」(西森教授)という。

なぜD-Waveで量子アニーリングを行う方が、古典力学を使うシミュレーテッドアニーリング(SA)よりも良い解が得られるのか(図B)。図Bは量子アニーリングとSAの違いを数学的に説明したものだ。両者ともスピンの向きを組み合わせ(配列)を変数、エネルギーの大小を結果とする関数において、エネルギーを最小にする「基底状態」を探索する問題となる。

解が高速に得られる理由

SAはグラフ上の任意の地点から出発して、エネルギーが小さくなる方向を探索し

ていく。ただし、このグラフには谷や山がいくつもある。探索のゴールは一番深い谷である「基底状態」だが、小さな谷である「局所最適解」にはまってしまふ恐れがある。そこでSAでは、探索に「熱揺らぎ」を加えて「山」を乗り越えさせる。そうするとある確率で、探索が基底状態に達する。

一方の量子アニーリングでは、グラフ上の全ての地点に対する探索を同時に始める。もし探索が小さな谷にはまったとしても、「量子トンネリング」という量子力学の現象によって、探索は基底状態へと突き抜けていく。これによって高速に解が得られる。

「量子トンネリング」で答えに近づく

図B D-Waveの量子アニーリングで発生している量子効果の概念

