

第74回C I S研究所パートナー会議事録（一般様用）

開催日： 2018年2月25日（日）
場 所： C I S会議室
講 師： 久米 健次 様

量子コンピューティング



会議風景

量子コンピューティング

もくじ

- Introduction
- Classic から Quantum への短い歴史
- Quantum とは
- Quantum computing
 - quantum gate machine
 - quantum annealing machine

• Introduction

カナダの D-Wave Systems が2011年に量子コンピュータを商用化して以来、研究開発競争に火が付いた。グーグルとMSは独自の量子コンピュータの開発を表明。IBMは基礎研究の3つの柱として、人工知能やブロックチェーンと共に量子コンピュータを挙げている。D-wave創業者は、カナダUBCの物理学院生であったローズ氏であり、彼はカナダのレスリング・オリンピックチームに選ばれた選手でもあった。



D-Wave 2000Q の外観(2017年1月)

1930年ごろに量子力学が完成し、物性科学中心に広範な応用研究の基礎となった。これらは、主に電子の波動性を活用したものと言えるが、量子コンピューターは量子論の直接的なトリッキーな特性を活用したものである。

量子計算機の歴史

ファインマンによる量子計算機のアイデア	1980年代
ドイチュ 量子チューリングマシン	

ここまでは、量子コンピューターが古典的コンピューターに比較して、どの程度の優位点があるかはっきりしていたわけではない。

具体的なアルゴリズムの始まり

ドイチュ ・ ジョサのアルゴリズム (toy model)	1992年
ショアの因数分解アルゴリズム (世界に衝撃)	1994年
グローバーのデータ検索アルゴリズム	1996年

...

特に、ショアの素因数分解アルゴリズムは世界に衝撃を与えた。通信セキュリティーを支えているRSA暗号の基盤が揺らぐのではないかとこの連想が働いた。

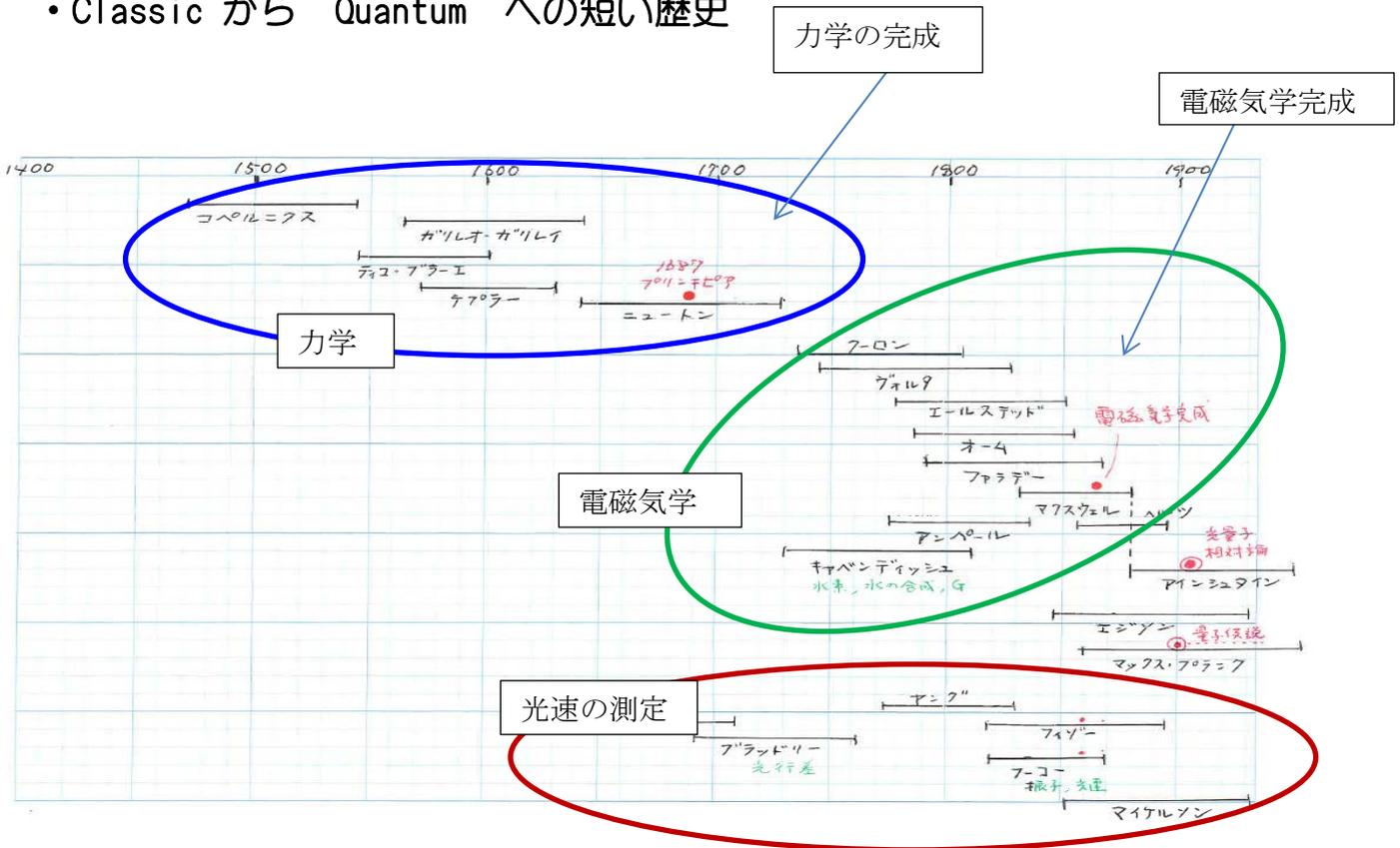
当初、研究されたのは「量子ゲート方式」の量子コンピューターであったが、近年になりこれとは全く異なる「量子アニーリング方式」の量子コンピューターが注目されている。

現在D-WAVE社が開発して売り出しているのは量子アニーリング方式のアナログ方式のものである。



古典力学から量子力学への発展史を取りまとめた。

• Classic から Quantum への短い歴史



- 古典論と量子論の違い
 - 3つの点で大きく異なる
 - 系の「状態」と「測定値（物理量）」が分離される。
 - 状態の重ね合わせが出来る。
 - 重ね合わせ状態「そのもの」を観測できない
 - 観測（測定）すると状態が壊れる（変化する）

ポイントI

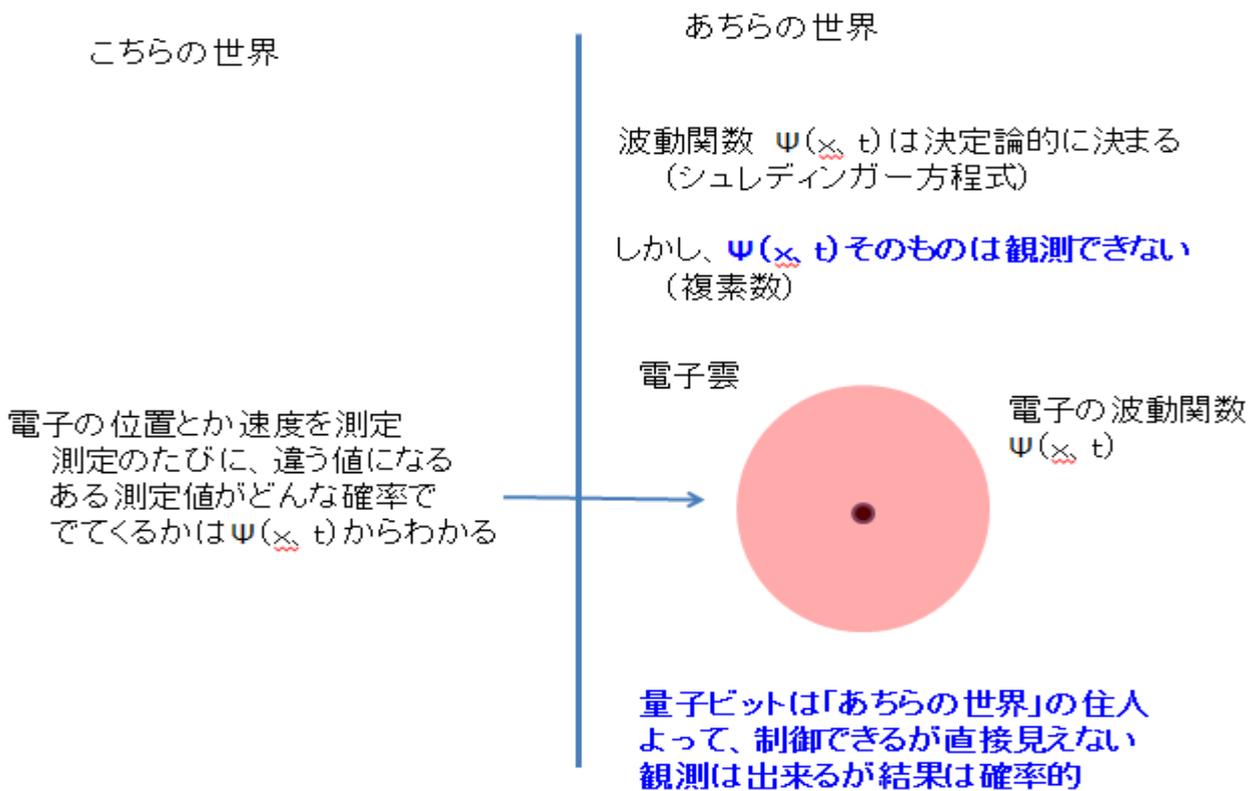
系の「状態」と「測定値（物理量）」が分離される。

古典論では、この二つは分離されておらず、同じことだった
 電子の位置座標 $X(t)$ で運動は決まり、これが観測値そのもの
 $X(t)$ は運動方程式で決まる。

量子論では
 電子の状態は状態ベクトル（波動関数） $\Psi(x, t)$ で決まるこれは観測量ではない。
 観測量は、 $\Psi(x, t)$ から得られる（確率的に：ボルン）
 $\Psi(x, t)$ は決定論的に決まる（シュレディンガー方程式）

なぜ、こんなヘンな扱いをするのか？

波動性と粒子性の二重性を扱うのに、理論側も2重構造にせざるを得なかった。



ポイントII

状態の重ね合わせが出来る。

古典力学

上向き か 下向き か あるいは横向きなどのいずれか
 $|\uparrow\rangle$ 、 $|\downarrow\rangle$ 、 $|\rightarrow\rangle$

量子力学

これらの重ね合わせ状態を作れる

スピナップとダウンの重ね合わせなど

$$|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$$

$$|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle \quad (\text{符号も意味アリ})$$

ポイントIII

重ね合わせ状態「そのもの」を観測できない

$$0.6|\uparrow\rangle + 0.8|\downarrow\rangle$$

という状態があったとして、これ「そのものは測定できない」。

(あちらの世界)

この状態のスピンの「大量にあったとして」、スピンの上向きか下向きかを測定すると

$$\text{上向きとの結果が得られる確率} \quad (0.6)^2 = 0.36$$

$$\text{下向きとの結果が得られる確率} \quad (0.8)^2 = 0.64$$

ある測定結果がどうなるかは、予言できない。

しかも、

測定した結果が「上向き」だとすると、系の状態は

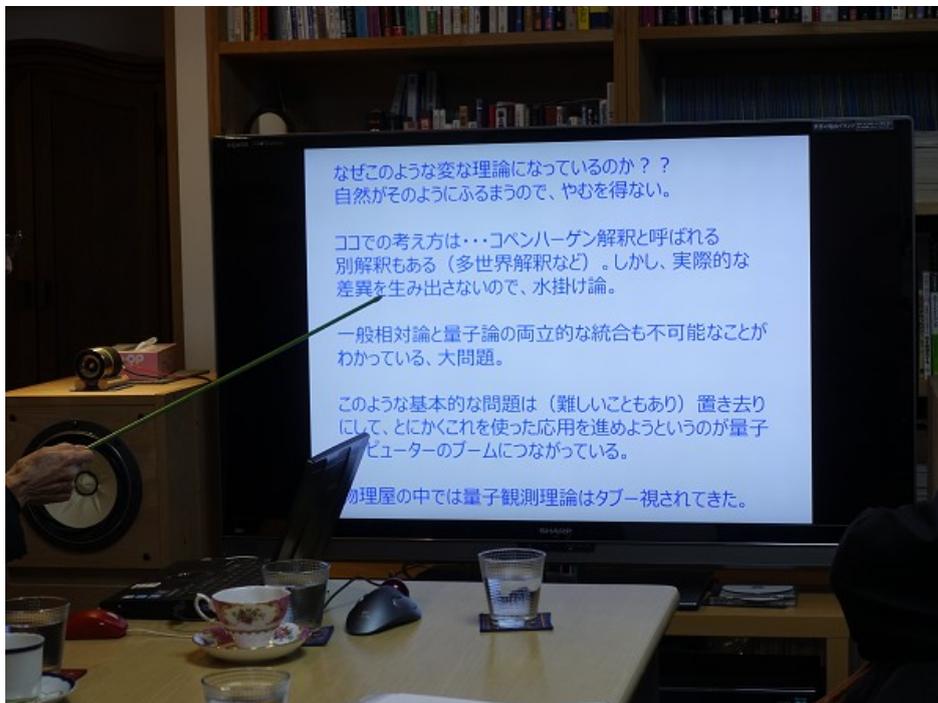
$$0.6|\uparrow\rangle + 0.8|\downarrow\rangle \Rightarrow |\uparrow\rangle \quad \text{に変化する(壊れる)}$$

なぜこのような変な理論になっているのか??

自然がそのようにふるまうので、やむを得ない。ココでの考え方は・・・コペンハーゲン解釈と呼ばれる別解釈もある(多世界解釈など)。しかし、実際的な差異を生み出さないで、水掛け論。

一般相対論と量子論の両立的な統合も不可能なことがわかっている、大問題。

このような基本的な問題は(難しいこともあり)置き去りにされ、とにかくこれを使った応用を進めようというのが量子コンピューターのブームにつながっている。



• Quantum computing

量子コンピューターの2方式

量子ゲート方式

- ・従来型の汎用的な計算機の量子バージョン

量子イジングモデル方式（量子アニーリング、量子ニューラルネット）

- ・量子アニーリング：東工大の西森先生が提唱・・・通常のコンピューターでの最適化問題のアルゴリズムとして開発した

ところが、UBCのローズ氏が、アナログ量子計算機として実装しベンチャー企業を作った（D-wave systems）
最適化問題に特化

	古典コンピュータ	ゲート式	量子アニーリング
動作温度	室温	極低温	極低温
扱える変数の数	非常に多い	数個程度	～2000個
対象とする問題	汎用	汎用	組み合わせ最適化問題

量子ゲート方式

通常の古典的計算機の拡張版

古典ビット

$$|0\rangle \quad |1\rangle$$

量子ビット

$$\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$$

$$\alpha, \beta \text{ は複素数で、} |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

量子2ビット

$$(\alpha_1 |0\rangle + \beta_1 |1\rangle) \cdot (\alpha_2 |0\rangle + \beta_2 |1\rangle)$$

これだと、2つのビットが独立に分離されている。

しかし、このように表せない状態が扱える

$$|0\rangle|0\rangle + |1\rangle|1\rangle \quad \text{とか}$$

$$|0\rangle|1\rangle - |1\rangle|0\rangle$$

$$|0\rangle|1\rangle + i|1\rangle|0\rangle$$

それぞれのビットに分離できない。

（量子絡み合い：エンタングルメント）

複数ビットがからみあった状態に単一操作で、並列的処理

$$|0000\rangle + |0001\rangle - |0010\rangle + |0011\rangle - |1001\rangle + \dots$$

分離できない状態も扱える。量子エンタングルメント（量子絡み合い）

⇒ 複数ビットが絡んだ状態を作れる

これに操作すると、全体が変化。

これを使って、超並列計算を行う。

- 量子アニーリングマシン
組み合わせ最適化問題に特化した量子アナログマシン

組み合わせ最適化問題

例えば、巡回セールスマン問題

いくつかの都市を周って帰ってくるときに、どの経路が最短距離か？
(同じ都市は一回だけ通過)

すべての場合を計算して比べればよいが、膨大な計算になる

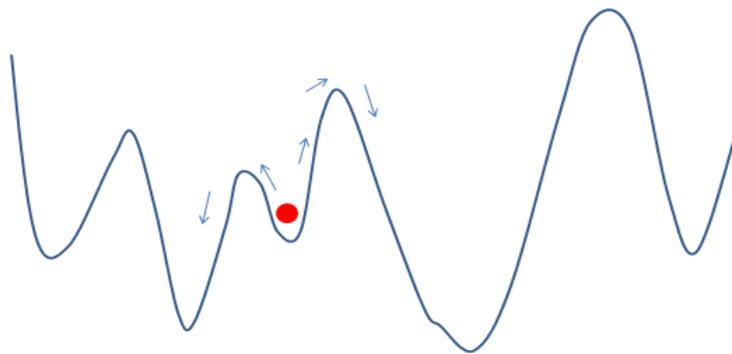
都市の数N (N-1)!/2

最適化問題は、様々な応用分野に必要

薬品の設計、たんぱく質の構造、交通渋滞回避、配送経路、・・・

最適化問題の難しさ

探索の途中でローカルミニマム（くぼみ）に落ち込む



古典的コンピュータでの最適化アルゴリズムの一つ：シミュレーテッドアニーリング

焼きなまし法

金属などの結晶を欠陥なく作るとき、急冷せず徐々に温度を下げて
焼きなましを行う。

これを計算機で真似する

シミュレーテッド・アニーリング (SA)

関数の最小値をとる配位を探す。

- ある配位から次の配位を発生させる。
- 普通は関数値が小さくなる方向に進む。
- SAでは、関数値が大きくなってもある確率で、それを新たな配位として採用する。
(高温)
- その確率を徐々に小さくして、最後にはゼロにする。(徐冷)
熱的な揺らぎを計算機上で仮想的に与え、最小値を探索

量子アニーリングマシン

量子アニーリングマシンでできること

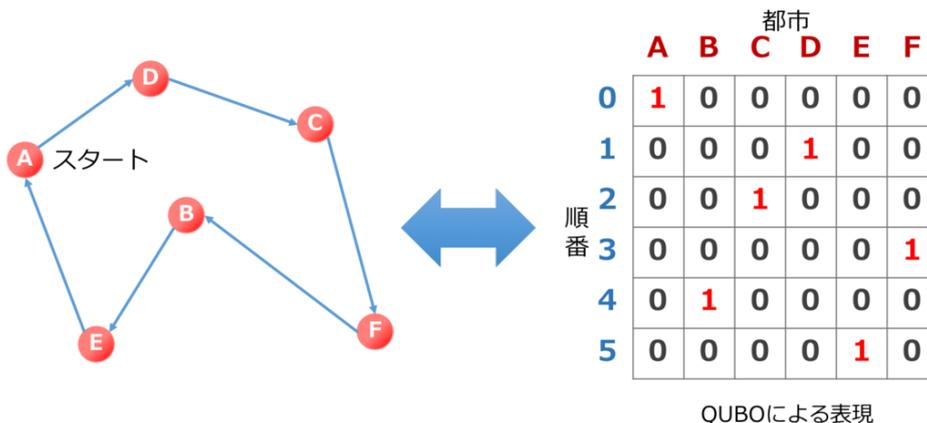
$$H = -\sum_{i < j} J^{ij} s_i s_j - \sum_i h^i s_i$$

与える。

$s_i = \pm 1$ $0 \leq i \leq N-1$

Hを最小にする $\{s_i\}$ を求める。

巡回セールスマン問題をこの形式に置き換えるには
問題をスピン系のイジングモデルにマッピングする。



都市 a と b の間の距離を $d^{a,b}$ とする。

$$H_0 = \sum_{t,a,b} d^{a,b} x_{t,a} x_{t+1,b}$$

$x_{t,a} \in \{0,1\}$

タテ・ヨコライン1ヶ所のみ「1」の条件をどういふか？

$$\sum_a x_{t,a} = 1, \quad \sum_t x_{t,a} = 1$$

$$\sum_t (\sum_a x_{t,a} - 1)^2, \quad \sum_a (\sum_t x_{t,a} - 1)^2 \text{ を加える。}$$

$$H = \sum_{t,a,b} d^{a,b} x_{t,a} x_{t+1,b} + A \sum_t (\sum_a x_{t,a} - 1)^2 + A \sum_a (\sum_t x_{t,a} - 1)^2$$

A を最も小さい値にする $\{x_{t,a}\}$ を求める。

量子アニーリングマシンを使うには

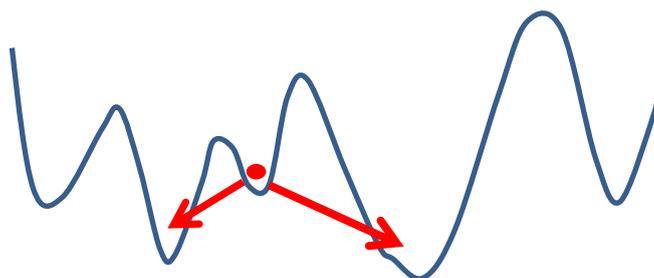
- 最適化したい問題のイジングモデルへのマッピング
- 量子アニーリングマシンで最適解を見つける
- 結果を解釈する

量子アニーリングのアイデア

量子的効果で、 $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の複数ビット絡み合い状態へ揺らぎを与え、トンネル効果で、くぼみに落ち込むのを避ける。

スピンを格子状に配置し、スピン間相互作用の強さ J^{ij} と h^i を問題ごとに与える。

- 初め、スピン間相互作用を弱くしておく
- 横磁場をかける
- 徐々に、スピン間相互作用を強め、横磁場をくする



- ・最後に残った配置がエネルギー最小状態であることを期待する

まとめ

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
- ・高速化するには、問題ごとに問題に特化したアルゴリズムが必要
- ・現時点では、実用的な性能の実機がない

量子アニーリング方式

- ・既に、商用レベルの実機が存在している
- ・最適化問題に特化して、極めて高性能となる可能性アリ
- ・最適化問題以外は解けない



会議風景

2:今後の日程と講師依頼

3月度	3月25日(日)	講師	神田 忠起 様
4月度	4月29日(日)	講師	山本 洋一担当
5月度	5月27日(日)	講師	西村 靖紀 様

ホームページURL

<http://www.cis-laboratories.co.jp/>

以上
