CQ BUNKO SERIES

ちょこっと未来の技術を今のうちに体感

ラズパイ電子工作&光の実験で理解する量子コンピュータ

藤井 啓祐, 武田 俊太郎 ほか 著
Keisuke Fujii, Shuntaro Takeda

見本

このPDFは，CQ出版社発売の書籍
「ラズパイ電子工作&光の実験で理解する量子コンピュータ」の一部見本です．
内容･購入方法については，下記のWebサイトをご覧ください．
内容：https://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/50/50501.html

CQ出版社

第1部
基礎知識から光の実験まで

第1章　ニュータイプ計算機 量子コンピュータの現状
なぜ知っておく必要があるのか

藤井 啓祐

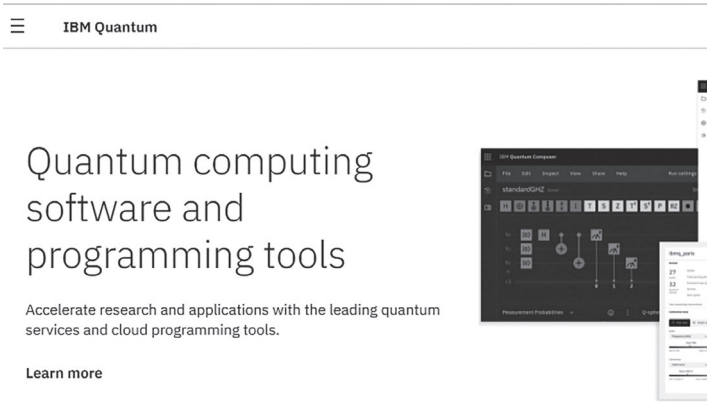


図1　量子コンピュータはインターネット経由で誰でも無料で使える時代
IBM Q
https://www.ibm.com/quantum-computing/tools/

■ 注目の理由

● アイデアは昔からあった

最近，「量子コンピュータ」というキーワードを新聞やインターネットでよく聞くようになりました．

量子コンピュータのアイデアそのものは古く，80年代までさかのぼります．ノーベル賞を受賞した物理学者リチャード・ファインマン［書籍「ご冗談でしょう，ファインマン先生！」岩波現代

見本

文庫）でも有名］が，1981年に「自然をシミュレーションしたければ，量子力学の原理でコンピュータを作らなければならない」と指摘したことに端を発し，1985年にオックスフォード大学の物理学者デイビット・ドイッチュによって定式化されました．

● 最近技術が確立されつつある

それから30年以上たち，今になってなぜ，量子コンピュータが話題になっているのでしょうか．1つは，地道な実験技術の発展に支えられ，量子コンピュータを構成するための要素技術が確立されつつあることです．私たちが日常的に使っているコンピュータの歴史になぞらえると，1940年代後半に発見されたトランジスタが，1960年代に入り実用化され，60年代後半にマイクロプロセッサIntel 4004が登場する前夜といったところかもしれません．

このような技術的進展を背景に，Google，IBM，インテル，マイクロソフトといったITの巨人たちが，軒並み量子コンピュータの開発に乗り出してきたことも大きな影響を与えています．

● なんと無料で試せる時代に

IBMとGoogleは，現状の量子デバイスを究極的にエンジニアリングすることによって，小規模ですが20量子ビット程度の実際に動く量子コンピュータを実現しており，現在50量子ビットを超える規模の量子コンピュータがテストされています．

IBMはその量子コンピュータをクラウド化し，インターネット経由で誰でも使えるような環境を提供しています（**図1**，`https://www.ibm.com/quantum-computing/tools/`）．Googleや，他の量子コンピュータ・ハードウェア開発のベンチャー企業たちも近々クラウドで量子コンピュータを提供することになりそうです．

見本

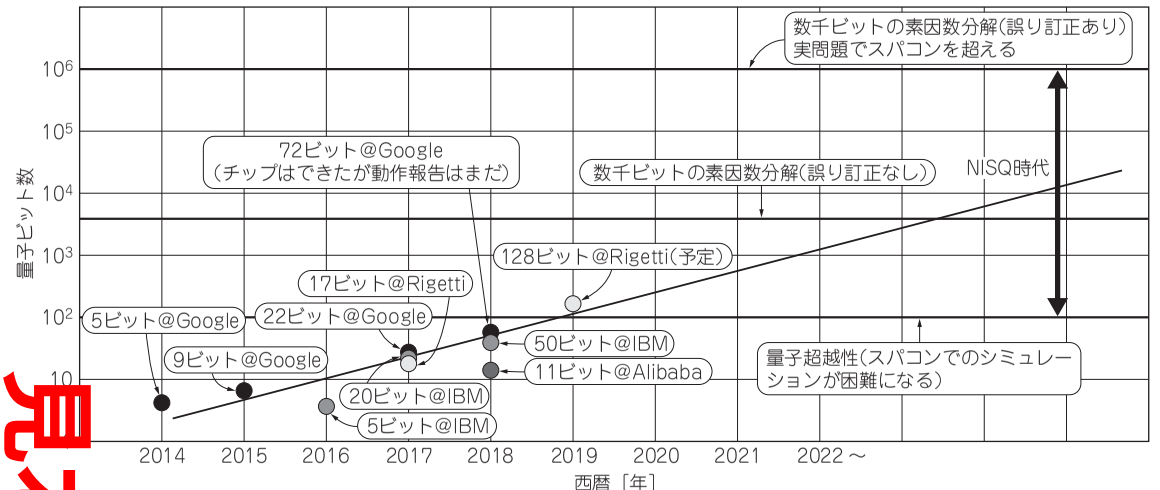


図1 大手IT企業が汎用量子コンピュータを次々と実現している

見本

第2章　従来とは違う原理の計算機がもたらすもの

広がる世界

藤井 啓裕

本稿では，量子力学の原理で動作する量子コンピュータが得意とするタスク，その潜在能力，それが実現することによってどのような世界が実現するかに迫っていきたいと思います．

■ 量子コンピュータでできるもの

状態が巨大なベクトルで，時間発展が巨大な行列で与えられるような量子力学系を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．量子力学および量子コンピュータが持つ性質を用いると，どのような問題を解くことができるかを見ていきましょう．

■ 得意技1：量子の世界そのものの計算

● 従来型コンピュータでは手に負えない計算量

量子系のエネルギーや時間発展（時間が進むことで物理系が変化すること）を求めるためには，巨大な行列の対角化（行列計算テクニックの1つ，詳しくはAppendix 2で解説）を行う必要があります．これは従来コンピュータで行うとなかなか難しいです．

例えば，10PFLOPS（ペタフロップス；1秒間に，1京回=10000兆回の実数演算ができる）を誇る京コンピュータでも，100万次元の行列の対角化に1時間を要します．100万次元は量子の世界の粒子（量子ビット）で数えると，たった20個（$2^{20} = 10^6$）です．従って，これだけのコンピュータをもってしても20個の粒子からなる系のエネルギー（正確にはエネルギーに対応するハミルトニアンという物理量）を対角化するのが限界というわけ

見本

が現状です．もちろん厳密な方法にこだわらなければ，さまざまな方法を適用できます．しかし，時間発展の計算となると，それでも粒子数に対して指数的にスケールする計算量のため，100粒子にも満たない段階でいずれ従来型コンピュータでは手に負えない状況になります．

● 量子コンピュータなら量子系をそのまま計算できる

量子コンピュータがあれば，このような量子系の時間発展はそのまま量子の世界で実行できます．そもそも物理法則が巨大な行列に従って巨大なベクトルを更新するようにできているからです．このように制御可能な量子系を用いて他の量子系をシミュレーションするアプローチは量子シミュレーションと呼ばれています．

また，量子コンピュータ上のアルゴリズムをうまく構成することで，量子コンピュータ上で巨大な行列を対角化できます．このようなアルゴリズムは，量子位相推定アルゴリズムと呼ばれ，さまざまな量子アルゴリズムに利用されています．ただし，行列は巨大であってもよいのですが，そのような行列が量子コンピュータ上の命令セットで効率よく実行できる必要があります．

ハミルトニアンによる時間発展などがそのような例で（物理的な時間発展は物理法則を命令セットとして効率よく実装されているのだから），ハミルトニアンを対角化しエネルギー固有値を量子コンピュータ上で取得できます．

● 量子計算の実現による恩恵

量子系のエネルギーや時間発展が計算できるようになると，どのようなメリットがあるでしょうか．1つは，材料や分子を原子レベルで設計し，その性質をシミュレーションすることが可能になる点があります．

見本

私たちの身の回りにある水分子などの分子は，水素原子や酸素原子などの複数の原子の上を，電子が1点に存在するのではなく波動関数として広がりを持っていることによって形成されています．高校の化学で習った共有結合は，電子が波動関数として空間的に広がりを持ち，それらを原子が共有していることによる結合（エネルギーが低くなり安定する）でした．どのような分子が安定的に存在するか，その分子がどのような性質を持つか，それらを組み合わせるとどのような化学反応が起こるかといったものは，ミクロな世界の量子力学のルールによって決まります．

これまでは従来コンピュータを用いたアプローチを中心にこれらの分子や材料の性質を調べてきましたが，量子コンピュータが活用できるようになれば，さらに自由度が広がるでしょう．特に，光合成などの光の吸収やLEDなどの発光のプロセスの時間発展の計算は，量子コンピュータがありのままをシミュレーションできる問題であり，これまで調べることができなかった現象や性質を直接的に知ることができると期待されます（**図1**）．

こういった量子コンピュータの助けのもと，分子や材料を設計すること（Quantum Computer Aided Design: QCAD）によって触媒，創薬，新規材料デバイス開発が加速されると期待されています．

■ 得意技2：量子とは関係のない計算

● 計算1：暗号にも使われるほどコンピュータには難しいあの「素因数分解」

量子と関係する問題を，量子コンピュータが得意とすることはある意味当然と言えます．一方で，量子とは全く関係ない問題でも量子コンピュータを使うことによって高速化できるということが知られています．その代表格が素因数分解問題で，今のとこ
ろ従来コンピュータでは，合成数（整数を掛け合わせたもの）

見本

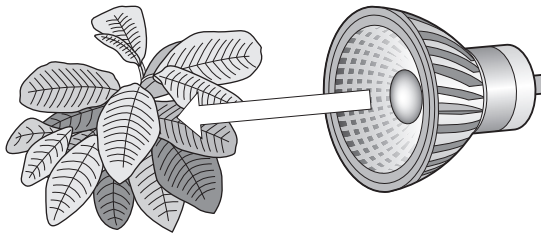


図1　量子コンピュータなら光の吸収やLEDの発光などの性質を解明できるかも

桁数が大きくなると素因数分解を効率よく解く方法はありません．2010年にNTTとボン大学（独）らの共同研究グループは，768ビット（232桁）の素因数分解を数体篩（ふるい）法と呼ばれる方法を用いて解いています(3)．計算量は，1700コア並列で1年相当の時間を要しています．

このような素因数分解問題の難しさはRSA暗号という公開鍵暗号に応用されているほどです（**図2**）．現在推奨されている最低レベルの合成数のサイズは1024ビットですが，このレベルの素因数分解は現在のスーパコンピュータでも全く解けないレベルです．

量子コンピュータでは，素因数分解問題は合成数の桁数に対し

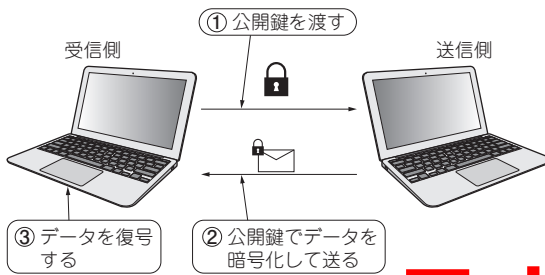


図2　量子コンピュータが得意な素因数分解はコンピュータの公開鍵暗号にも使われる

見本

て多項式的な計算量で解を求めることができます．ここにも巨大な行列の固有値の計算が密接に関係しています．合成数Nの素因数分解を解く鍵は，ある整数xの累乗をN進数（mod N）で計算したときに現れる周期性を見つけることにあります．この周期は位数と呼ばれており，位数は，xをN進数で掛け算するという計算を量子コンピュータで実行したときに出てくる巨大なユニタリー行列の固有値を求めることによって決めることができます．素因数分解にも，巨大な行列の固有値問題が隠れているのです．

● 計算2：未ソート・データの探索

固有値を求める，という方向とは少し違ったアプローチもあります．最も単純化した量子系は2次元のベクトルで書けます（**図3**）．虚数成分はとりあえず忘れて，2次元の実ベクトルを考えると1つの複素数に対応します．いま，横軸から少しずれた状態が初期状態として準備できるとします．このとき目的の状態は，cos成分が0でsin成分しか含まれていないので，この初期状態から測定をして得る確率は非常に小さいです．一方で，量子アルゴリズムを利用すると，この初期状態を目的の状態へと回転させられます．

初期状態の偏角をθとすると，回転させない場合は，$\sin^2\theta$の確

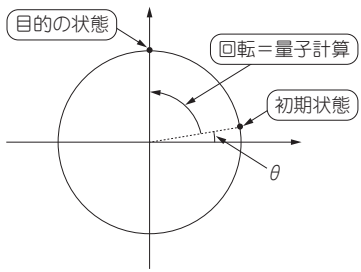


図3　単純化した量子系は2次元で表せる

見本

第3章　従来のコンピュータのビットとは根本的に違う

数式なしから始める

武田 俊太郎

本章では，量子コンピュータにおいて情報を表す単位である量子ビットに焦点を当て，その基本的な性質やルールを説明します．その下準備として，まず量子力学という物理の話から始めます．なぜなら，量子ビットの性質やルールは，全て量子力学という物理法則に基づいて決まっているからです．量子力学というバックグラウンドを切り離して量子ビットの説明を始めてしまうと，なぜそのような奇妙な性質やルールを考えるのか，疑問だらけになってしまうでしょう．そこで，初めに量子力学がどのようなものか，簡単に紹介していくことにします．

■ 量子コンピュータを支える量子力学の世界

● 量子力学とは？

量子コンピュータは，端的に言えば「量子力学の原理を利用したコンピュータ」です．量子力学とは何でしょうか．例えばサッカーボールなど，私たちの身の回りにあるようなサイズの物質は，膨大な数の電子や原子から構成されたマクロな物質です．このようなマクロな物質の振る舞いのルールをまとめた学問が，私たちが中学や高校で習う力学であり，そのルールは私たちの直感ともよく合います．

一方で，物質を構成する電子1個や原子1個などのミクロな物質の振る舞いを調べてみると，力学のルールだけでは説明がつかないことがあります．そこで，ミクロな物質の振る舞いのルールを正しく記述し直した学問が量子力学です（**図1**）．量子力学は，私たちが通常意識することのないミクロな世界を記述する学問です．

見本

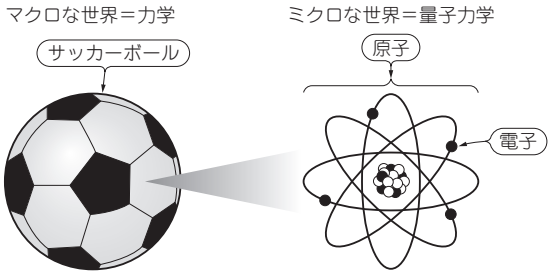


図1　自然界の掟…ミクロな世界では「量子力学」が必要になる

り，そこには私たちにとってなじみのない不思議なルールが潜んでいます．このルールを積極的に計算に利用しようとするのが，量子コンピュータというわけです．

● 量子コンピュータに深く関わる量子力学のルール…重ね合わせの原理

量子力学のルールの中で，量子コンピュータと関わりが深いものの1つが「重ね合わせ」という現象です．この現象を簡単な例で説明してみます．

図2(a)のように，箱の中にサッカーボールを1個入れた後に，ふたを閉めて，中央に仕切りを入れます．仕切りの左側を「0」，右側を「1」と名付けると，ボールは「0」か「1」のいずれか一方にいるはずです．そして，ふたを開けて中を見れば，実際にどちらにいるかを確認できます．

同じことをミクロな物質で行うと，事態は変わります．例えば**図2**(b)のように，電子1個を箱に入れた後に，ふたを閉めて仕切りを入れます．この場合，電子は「0」か「1」のどちらにいるか確定しないまま，両方のパターンが半々の重みで，同時並行で存在する「重ね合わせ」と呼ばれる状態になります．もし，箱のふたを開けて電子がどちらにいるかを確かめれば，電子は「0」か

見本

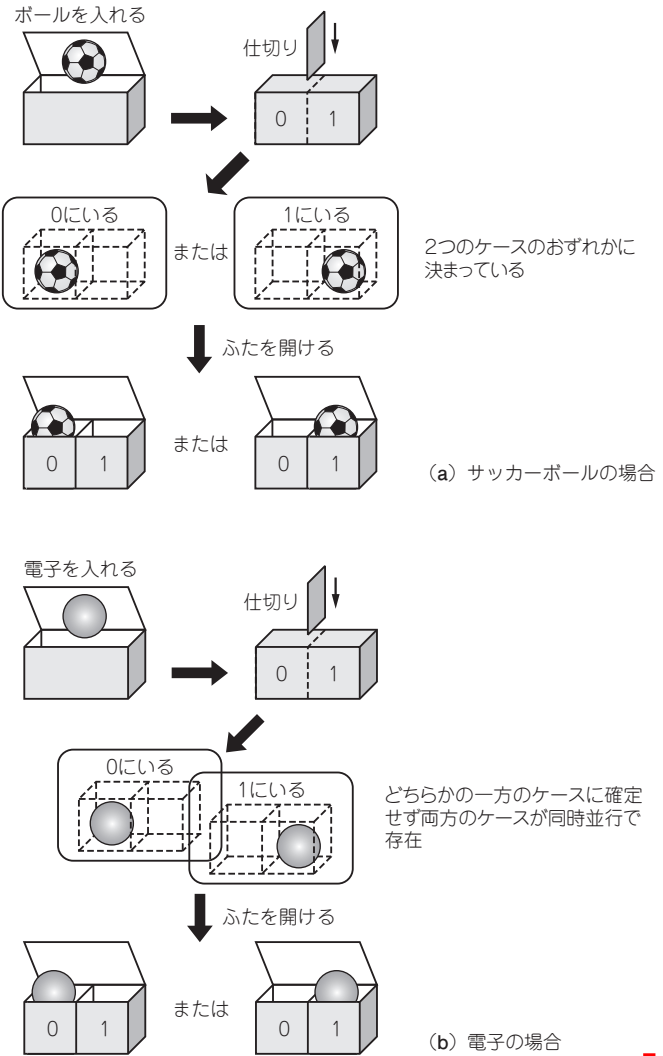


図2　ミクロの世界の量子力学では「0」にも「1」にも確定しているような「重ね合わせ状態」がある

見本

第5章　身近な道具ではじめる不思議量子の世界

数千円で量子力学の現象を体感できる実験

武田 俊太郎

第1部第3章では，量子ビットの「重ね合わせ」や「干渉」という不思議な性質を説明しました．しかし，「百聞は一見に如かず」と言う通り，文章で読むよりも実際にその性質を目の当たりにした方が納得がいくものです．本稿の目的は，誰でも簡単に手に入る道具だけを使って自宅で試すことのできる実験を通して，量子ビットの性質の理解を深めることです．

実験の様子を撮影した動画も用意しました．こちらのページからアクセスできます．

```
http://www.cqpub.co.jp/interface/download/
contents.htm
```

■ 実験に必要な道具

まず，実験に必要な道具を準備しましょう（**写真1**）．

実験は1と2に分かれており，実験1では以下の（**1**）を，実験2では（**1**）～（**4**）を使用します．補助的にクリップ，ハサミ，テープも使用します．

● （1）偏光板

グレーの偏光板を3枚以上準備します．大きめの偏光板が1枚あれば，使いやすいサイズ（3～4cm四方くらい）にハサミで切って使用できます．Amazonや楽天などのネット通販，もしくは東急ハンズなどで500円程度で購入できます．筆者はアーテック社の8cm四方の偏光板をハサミで4分割して利用しました．

見本

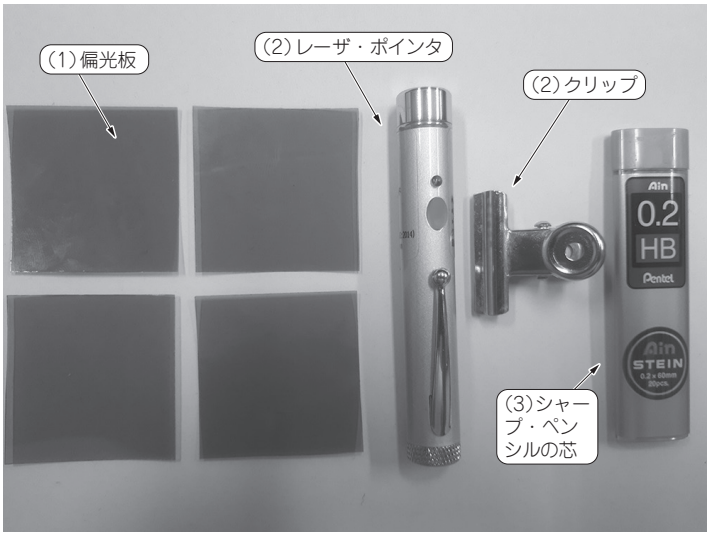


写真1　量子ビットの性質を体感する実験に使う道具

● (2) レーザ・ポインタ

何色のレーザ・ポインタでも利用できますが，安価でかつ実験がうまくいきやすいのは赤色のものです．LEDポインタという製品も販売されていますが，レーザ・ポインタとは異なるので注意してください．楽天などのネット通販や，家電量販店などで2,000円程度で購入できます．筆者が利用したのは，POLARIS社のEM-16Sです．目玉クリップやダブルクリップなどを利用してレーザ・ポインタのボタンを押し続けることで，レーザの出射状態を保つことができます．

● (3) 細いシャープ・ペンシルの芯

一般的な太さ0.5mmの芯では実験が難しいため，細い芯を準備します．最近は太さ0.2mmの芯まで販売されており，筆者は

見本

Pentel社のC272W-HB（太さ0.2mm）を用いました．

● (4)白いスクリーン

A4のコピー用紙などの白い紙を壁に貼ったり立てかけたりすることで，レーザ光を照射するスクリーンを作ります．

■ 実験1：偏光板を使って「量子ビット」を測ってみる

● 実験1で確かめること…量子ビットの測定における性質

まず，量子ビットの測定について理解するための実験を紹介します．第1部第3章では，「0と1の重ね合わせ」である量子ビット$\alpha|0\rangle+\beta|1\rangle$について，「0」か「1」かを測定したとき，以下のルールに従うことを説明しました．

- ルールA：測定の結果は，確率$|\alpha|^2$で「0」となり，確率$|\beta|^2$で「1」となる．
- ルールB：測定した後は重ね合わせが壊れて，「0」または「1」に確定した状態に変化する．

これらの現象は，偏光板を何枚か用いた実験で体感できます．以下ではまず偏光板とは何かを説明し，その後で実験の紹介に移ります．

■ 実験1-1：偏光板の特性を確認する

● 実験の前に…偏光板とは？

光は空間を伝わる波の一種で，波の進行方向に対して垂直な向きに電場と磁場が振動します．この波の振動の仕方をイメージするために，**図1**のようにロープを伝わる波を例にしてみます．ロープの端を手で持っているとき，手を上下に振ればロープが上下に揺れながら波が伝わり，手を左右に振ればロープが左右に揺れながら波が伝わります．いずれの場合も，波の進行方向（ロープに沿った向き）に対して，ロープは垂直な向きに振動しています

見本

す．光の波の振動の仕方はこれと同じです．ある一定の方向に振動している光は偏光と呼ばれ，例えば電場が上下に振動している場合は縦偏光，左右に振動している場合は横偏光と呼ばれます．

光の波がやってきたとき，偏光板はある方向に振動する波だけを通すフィルタのようなものです．偏光板には軸があり，軸に沿った向きに振動している光の波だけを通し，軸と垂直な向きに振動している光の波は通しません（吸収する）．ロープの波で言えば，偏光板はある方向に細長い隙間の空いた板に例えられます（**図1**）．板の隙間の軸方向がロープを伝わる波の振動する方向と平行なら，波が隙間を通り抜けます．逆に，振動方向が垂直だと波は板の隙間を通れません．偏光板の役割はこれと同じです．

一般的に，太陽や蛍光灯の光などは，波が上下左右色々な方向にランダムに振動しています．このため，偏光板越しに景色を見れば，偏光板の軸に沿った向きに振動する光だけが通り抜けてくるため，景色が暗く見えます．これが，偏光板がグレーに見える理由です．

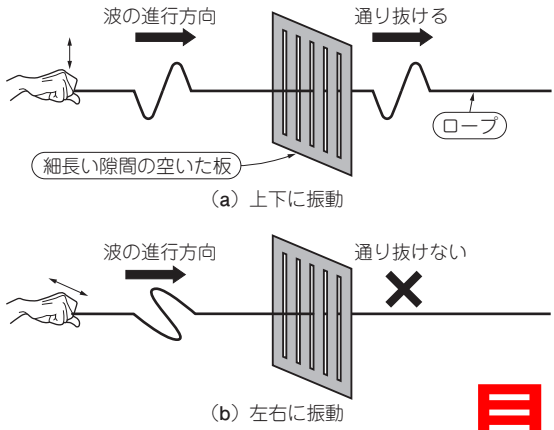


図1　ロープを伝わる波のように光の波も振動する

見本

第2章　1量子ビットを1PICマイコンで実現してみる

今回作るもの…擬似的な量子演算電卓

漆谷 正義

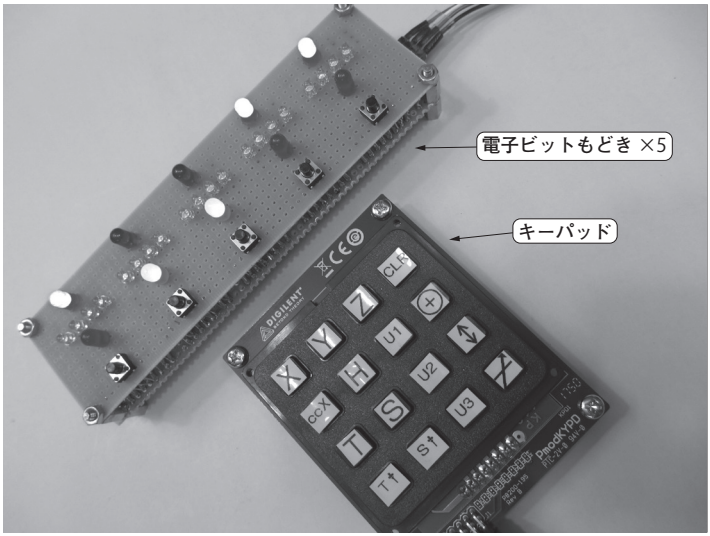


写真1　量子コンピュータ的な動作をする電卓の自作に挑戦してみる

最近，量子コンピュータのニュースをよく耳にします．その背景には，実際に動き，商用化も可能な機械や製品が出現し始めたことがあります．

量子コンピュータなら，従来のコンピュータには解けなかった問題が解ける，スーパコンピュータより格段に速い，暗号鍵も解いてしまう…など，夢のような話があふれています．それでも，「量子」と聞くだけで，近づきがたいような気[illegible]て，一歩足を踏んでしまうのではないでしょうか．

見本

本稿では，なかなか実体が分かりにくい量子コンピュータを電子工作で模倣してみます（**写真1**）．

■ 電子工作で量子コンピュータ（もどき）を作る

● 量子ビットの状態をLEDで表現する

量子コンピュータ特有のビット（量子ビット）の状態は，0と1だけではなく，**図1**のような球面上の全ての点を取り得ます．この球をブロッホ球と呼びます．

図1のブロッホ球の面上の主な点に，LEDを配置すると，写真2のようになります．**写真2**のように作るのは面倒ですから，**図2**のように平面上に配置します．

上下を0と1に対応させます．また，θに関する情報は，上下のLEDをPWM駆動して，明るさの違いで表示します．左右のLEDは，**図2**（a）の位相面の各軸±45°の範囲でおのおののLEDが点灯するようにします．

● 量子演算電卓でできること

写真1は，製作した量子コンピュータもどきです．量子演算電

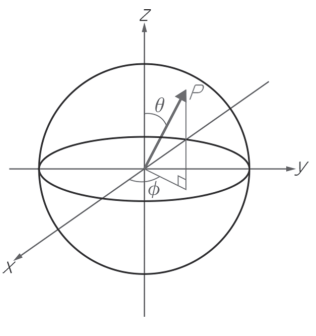


図1　量子ビットを表すブロッホ球

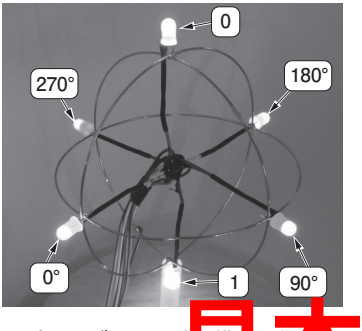
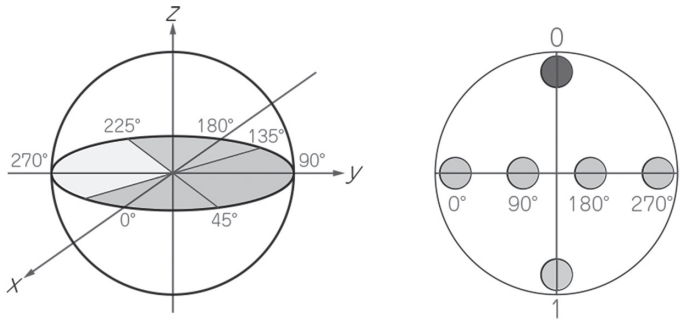


写真2　ブロッホ球を模して作ったLEDストリング

見本



(a)ブロッホ球　　(b)平面配置

図2　平面に配置したブロッホ球
上下で振幅を，左右で位相を表示する

卓と名付けます．

図3に示すように，量子演算電卓は，1個または数個のブロッホ球部分の「量子ビットもどき」と，操作マイコン（ラズベリー・パイ3B）および，キーパッドで構成します．実際の量子コンピュータで言うところの量子チップがPICマイコン擬似的量子ビット群，量子チップの外部に接続される制御・解析用コンピュータがラズベリー・パイにあたります．

量子コンピュータらしさとは，次のようなものです(1)．

1. 量子ビットを初期化できること
2. 量子ビットの状態を読み出せること
3. 基本ゲートを構成できること
4. 規模や動作回数が，量子ビットの数が増えたときに，急速に増大しないこと
5. 重ね合わせ状態が，ある程度の時間，維持できること

製作するLED量子演算電卓は量子コンピュータでできることのうち，4以外のことができます．

見本

第4章　本格的な量子コンピュータへの第一歩

1量子ビットから5量子ビットに拡張する

漆谷 正義

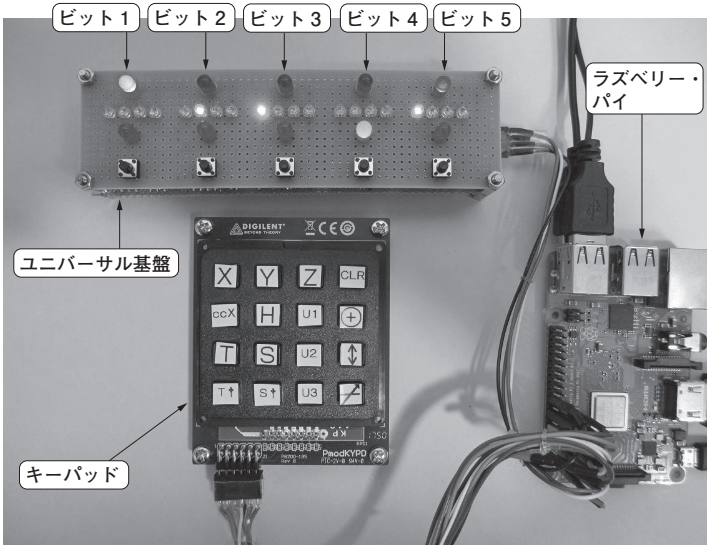


写真1　量子ビットを1個から5個に拡張する

擬似的な1量子ビット演算電卓ができたので，今度はビット数を増やして，2ビット以上の量子演算ができるようにします（**写真1**）．

量子ビットの演算には，XやTのように1ビットに作用するものが多いのですが，さらに，2ビット，3ビットに作用する制御NOT（＋）やccXなどがあります．1ビットの演算では，Xのような反転だけでなく，Hゲートのように，重ね合わせ状態

見本

<サポート・ページのご案内>
https://interface.cqpub.co.jp/quantum00/
インストールなどでお困りの際に参照ください．

作ることができました．これをスイッチの制御信号のように使うと，一挙に並列演算ができてしまいます．それだけでなく，制御ビットは，信号ビットと切り離せない「量子もつれ合い」状態となります．

量子もつれ合い状態は，量子コンピュータの計算において必ず現れる現象です．量子もつれにある1つのビットを，測定するなどして，もう1つのビットと切り離すと，他方のビットも状態が確定します．これはこの2つのビットが何km，何光年離れても起こる現象です．早速，ビットを増やして，もつれ合いを起こしてみましょう．

■ 5量子ビットに改造する

● 追加する回路

回路は**図1**の通りです．通信ラインがI^2Cですから，ビットもどきは幾つでもつなげます．

図1の回路は，ブレッドボードに組むこともできます．第3章で作った量子ビットもどきをもう4個作り，I^2Cライン2本と電源ライン2本をつなぐだけですから，比較的簡単です．

写真1のようにユニバーサル基板に組むと，LEDの周りにジャンパ・ワイヤが重なることがないので，表示が見やすくなります．

ユニバーサル基板の場合は，**写真2**を参考にしてください．これは一例です．

140mm × 40mmの横長の基板2枚を用意します．一方にはLEDを，他方にはマイコンを取り付けます．基板の間はスズ・メッキ線で接続し，折り曲げれば，**写真1**のようにすっきりとまとまります．2枚の基板はスペーサを使って組み立てます．

使用した部品を，**表1**にまとめました．ラズベリー・パイは，3B+を使いましたが，3Bや4Bでも試せます．

見本

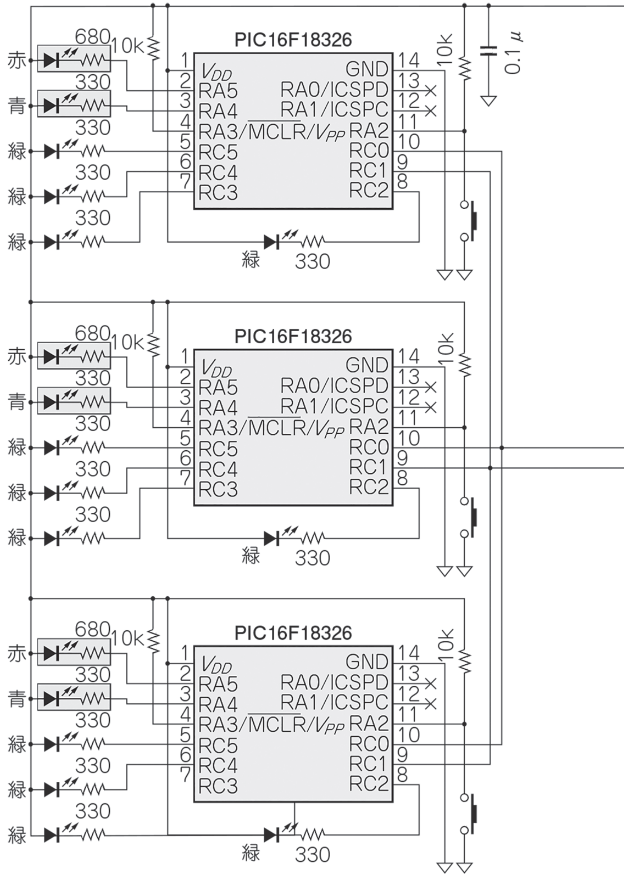


図1　擬似的な5量子ビット回路

制御用コンピュータのラズベリー・パイとはI²Cでやりとりする

● それ以外の修正

第2章で説明した「量子ビットもどきが1個の場合のプログラム」に追加していきます．**図1**の回路は，LEDがアクティブ・ローの接続となっているので，ポートCの極性と，PWMの極性を逆にします．

見本

第3部 PCでためす

第1章 Pythonで動作するQiskit

量子用ライブラリを試す

束野 仁政

● 記事のねらい

最近，ニュースなどで扱われることが増えてきた量子コンピュータですが，どのような原理で動作し，どのような問題を解決し，どのように扱えるのかを本稿で紹介します．

筆者は，量子コンピュータ・プログラマの立場から量子コンピュータについて調べ，将来訪れるであろうIT業界の変化に思いをはせています．ただ，ブームになりつつある量子コンピュータですが，プログラマ向けに入門となる文章はまだ少ないのが現実です．

ここでは，できるだけプログラマに分かりやすく紹介するよう心がけました．そのため，量子コンピュータの原理を数式で表現し，プログラミングを行って動作を確認します．数学の知識が必要となるケースもあるので，忘れてしまった方はこれを機に確率や行列について復習していただければと思います．

● とりあげる内容

第1章では，量子コンピュータの強みや基本演算について説明した後，量子コンピュータのプログラミングの準備を行います．プログラミングにはQiskit（キスキット）というライブラリを使います．これは，Python上で動作するため，事前にPythonをインストールする必要があります[注1]．

見本

第2章と第3章では量子コンピュータで使われているアルゴリズムについて，プログラミングによるシミュレーションを交えながら紹介します．第2章では「ドイッチュのアルゴリズム」，第3章では「量子誤り訂正」という量子アルゴリズムを紹介します．

■ 量子コンピュータが期待される理由

理想的な量子コンピュータが完成すれば，さまざまな分野への応用が期待されます．そのうちの幾つかを紹介します．

● 暗号解読の高速化

RSA暗号，楕円曲線暗号といった，主要な公開鍵暗号を高速に解読できます．公開鍵暗号はインターネット通信の暗号に利用されているため，暗号を解読できる大きさの量子コンピュータが実現するまでに，別方式の暗号に移行する必要があります．

● 創薬や材料開発

物質の持つ性質は量子力学の影響を大きく受けますが，現在のコンピュータで計算するには非常に時間がかかります．もし量子コンピュータによって高速に計算できれば，創薬や材料開発にインパクトを与えると期待されています．

● 行列計算やクラスタリングの高速化

ある種の行列計算を高速に行えます．これにより，サポート・ベクタ・マシンやクラスタリングといった機械学習を条件によっては高速に行えます．

注1：インストールについていは，Python.jp 環境構築ガイド http://www.python.jp/install/install.html を参考にしてください．

見本

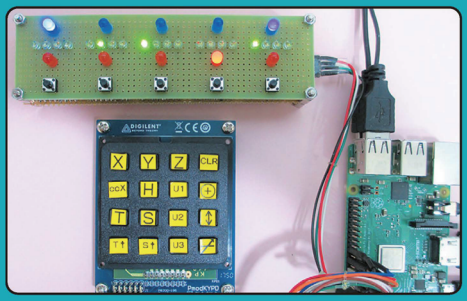
ISBN978-4-7898-5050-6
C3055 ￥1600E
CQ出版社

9784789850506

定価 1,760円（本体1,600円）⑩

1923055016002

ラズベリー・パイとPICマイコンを使って量子演算電卓の製作にチャレンジします．
また，重ね合わせの原理や干渉といった光の実験を通して，量子コンピュータの挙動を理解します．



見本