

# マイクロ波技術者から学ぶ超伝導量子コンピュータ入門

## An Introduction to Superconducting Quantum Computing by Microwave Engineer

塩見 英久<sup>†‡</sup>

Hidehisa SHIOMI<sup>†‡</sup>

<sup>†</sup>大阪大学量子情報・量子生命研究センター <sup>‡</sup>キュエル(株)

### 概要

従来のコンピュータを超えることが期待される大規模な量子コンピュータが盛んに研究開発されている。特に超伝導量子コンピュータの開発は加速されており急速な大規模化がなされている。すでに超伝導量子コンピュータの大規模化へ向けた課題の多くは工学的な要素が強くなっている。マイクロ波技術が広範囲で用いられている超伝導量子コンピュータはマイクロ波エンジニアの活躍できる領域が多い。

本講座では、マイクロ波技術者の常識を前提に、量子コンピュータに対して「工学的な直感イメージ」を持ってもらうことを目的に、量子力学の基礎、量子コンピュータの理論、超伝導量子コンピュータの実際を述べる。



図 阪大のテストベッド

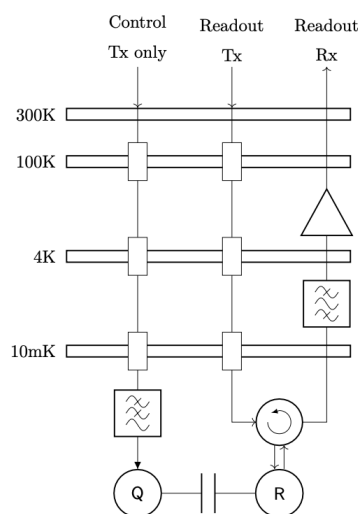


図 超伝導量子計算機配線概要

### Abstract

Large-scale quantum computers that are expected to surpass conventional computers are being actively researched and developed. In particular, the development of superconducting quantum computers is accelerating and their scale is rapidly increasing. Some of the issues that need to be addressed in order to realize a large-scale superconducting quantum computer have already been solved by engineering methods. Microwave technology is widely used in superconducting quantum computers, and there are many areas where microwave engineers can play an active role. In this lecture, the fundamentals of quantum mechanics, the theory of quantum computers, and the practical application of superconducting quantum computers will be described, with the aim of giving the audience an "engineering intuitive image" of quantum computers, assuming the common knowledge of microwave engineers.

## 1 はじめに

昨今、国産の大規模量子コンピュータが次々と稼働し始めている。量子コンピュータは従来のスーパーコンピュータを超える計算能力を持つことが期待されている。代表的なものは Shor のアルゴリズムによる素因数分解や量子化学計算などである。これらのアルゴリズムを実用的なレベルで実行するためには量子ビット数のさらなる大規模化が不可欠である。量子コンピュータの実現方式は多数ある。様々な方式の中でも特に超伝導量子コンピュータは大規模化へ向けた取り組みが継続的に行われている。十分な品質の量子ビットを比較的安定して実現でき、規模の拡大に対する障害が少ないと考えられているためである。

すでに超伝導量子コンピュータの大規模化へ向けた課題の多くは工学的な要素が強くなっている。特に超伝導量子コンピュータはマイクロ波分野の技術が広範囲で用いられている。次に挙げるようにマイクロ波エンジニアが活躍できる可能性のある要素は数多い。

- シリコン基板上に形成された GHz 帯の非線形伝送線路共振器からなる量子ビット
- 搬送波が GHz 帯で広帯域の大規模な多チャンネルマイクロ波受信装置
- 極低温の低雑音 HEMT 増幅器やジョセフソンパラメトリック増幅器
- 極低温のアイソレータやサーキュレータなどの非相反回路
- 極低温で動作する高アイソレーションの高密度多チャンネル伝送路
- これらのデバイスの校正、計測技術

本講座では、マイクロ波技術者の常識を前提に、量子コンピュータに対して「工学的な直感イメージ」を持ってもらうことを目的に、量子力学

の基礎、量子コンピュータの理論、超伝導量子コンピュータの実際を述べる。

## 2 量子力学の基礎

量子コンピュータの説明を効果的に行うため、必要な量子力学の前提知識を共有する。まず、マイクロ波を分割可能な最小単位であるフォトンについて述べる。<sup>1)</sup>

### 2.1 マイクロ波フォトン

角周波数  $\omega$  のマイクロ波フォトン 1 個あたりのエネルギーは  $\hbar\omega$  で表せる。ここで、 $\hbar$  はディラック定数  $1.054572 \times 10^{-34}$  J·s である。例えば、10 GHz のマイクロ波では  $6.6 \times 10^{-24}$  J = -201.8 dBm/Hz である。出力  $P$  W のマイクロ波源からは時間あたり  $P/\hbar\omega$  個のフォトンが放出されている。0 dBm のマイクロ波源からは毎秒  $1.5 \times 10^{20}$  個の膨大なフォトンが放出されている。

### 2.2 光子の検出

マイクロ波フォトンには微弱なため検出することが難しい。しかし光子の場合、光電子増倍管やアバランシェフォトダイオードのような高感度検出器を用いれば毎秒数個程度の微弱光でも検出できる。CW レーザー光源から出射された光を減光フィルタを通して光検出器で検出する系を考えよう [1]。光が比較的強い場合には、光検出器からは光強度に比例した一定の電流が出力される。光を弱くしてゆくと光検出器の出力は揺らぐようになり、ついには、ポツポツとパルス的に出力される離散的な電流になる。パルスが出力されるタイミングはランダムであり時間的な粗密が生じる。その出現頻度はポアソン分布に従うことが知られている。光の出力  $I$  は時間あたりの平均光子数  $N/\Delta t = I/h\nu$  つまりパルスの出現確率を与える。

1) フォトンも光子も厳密に同じ意味ではあるが「マイクロ波の」を強調するため本稿ではマイクロ波の量子を「マイクロ波フォトン」、光の量子を「光子」と表現する。

受光素子として感光膜を用いて空間系で同様の実験を行った場合も同様に、光子一つ一つが平面上にポツポツと点が描画されてゆくのが観測できる[2]。

## 2.3 量子の粒子性と波動性

レーザー光を用いたヤングの干渉実験は学生実験の定番である。波長程度離れた二つのスリットを通った光は干渉しあって干渉縞を作る。マイクロ波でもお馴染みの現象である。これを単一光子で行ったらどうなるだろう。毎秒数個程度のレーザー光で継続的に観測すると、驚いたことに、干渉縞の濃い部分に高い出現確率で、淡い部分に低い出現確率で光子が検出され、縞模様を形成してゆく。電子でも同様に二重スリットの現象が観測できる。<sup>2)</sup>電子の波動性を表す関数  $\psi(x, t)$  を波動関数（時空間表示の確率振幅）と呼ぶ。波動関数は複素数値を示す関数である。その絶対値の自乗  $P(x, t) = \psi^*(x, t)\psi(x, t)$  は位置  $x$  時間  $t$  で電子が検出される確率を示す。

## 2.4 波動関数

量子力学を従来の力学と矛盾なく融合するためには波動関数をどのように決めれば良いだろうか。簡単のため波動関数が式 (1) の進行波で表せるとする。

$$\psi = A \exp[-j(\omega t - kz)] \quad (1)$$

角周波数  $\omega$  は粒子のエネルギー  $E$  と  $E = \hbar\omega$  の関係を示すのが適切である。粒子の運動量  $p$  は  $E = cp$  の関係があり<sup>3)</sup>波動関数の波数  $k$  は  $\omega = ck$  の関係があることに着目すると、運動量  $p$  と波数  $k$  の間に  $p = \hbar k$  の関係を導ける。すると式 (1) は式 (2) のように変形できる。

$$\psi = A \exp\left[-j\left(\frac{E}{\hbar}t - \frac{p}{\hbar}x\right)\right] \quad (2)$$

2) 光子は質量が無く量子論での取り扱いが面倒なので、以降電子について議論する。簡易的に電場を波動関数として取り扱うこともあるが、厳密には場の量子化により取り扱うべきである。

3)  $c$  は波の速度。光子の場合は光速。

このように波動関数  $\psi(x, t)$  を構成すると、位置  $x$  で偏微分するとその振幅部分に運動量が、時間で偏微分するとエネルギーが現れるようにできる。 $n$  回微分するとその  $n$  乗の値が得られる。

$$(-j\hbar)^n \frac{\partial^n \psi}{\partial x^n} = p^n \psi \quad (3)$$

$$(j\hbar)^n \frac{\partial^n \psi}{\partial t^n} = E^n \psi \quad (4)$$

これらを従来のエネルギーと運動量の関係  $E = p^2/2m + V(x)$  に当てはめると「シュレーディンガー方程式；従来の力学の関係を満たすようなエネルギーと運動量を取り出すことのできる波動関数を導く方程式 (5)」が得られる。 $V(x)$  は系のポテンシャルである。

$$j\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V(x)\psi \quad (5)$$

シュレーディンガー方程式は双曲型偏微分方程式であり  $\psi(x, t) = \phi(x)g(t)$  のような変数分離法にて式 (6), (7) の解が得られる。

$$j\hbar \frac{\partial g}{\partial t} = Eg \quad (6)$$

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V\right)\phi = E\phi \quad (7)$$

ここで、定常状態の解 (7) に着目すると、固有方程式となっており、エネルギー固有値  $E_i$  と固有状態  $\phi_i$  が求められ、これらを基底として任意の状態を展開することができる。マイクロ波工学の波動方程式の定常解から固有モードを求める手順を連想させる。

## 2.5 状態ベクトルと観測

量子コンピュータでは基底が高々 2 つの量子系をなんらかの方法で用意して量子ビットとして用いる。超伝導量子ビットはマイクロ波フォトンをもつだけ格納するように工夫された共振器である。フォトンをもたない状態ではエネルギー固有値  $E_0$ 、固有状態  $\phi_0$  であり、格納した状態では  $E_1$ 、 $\phi_1$  である。固有状態を基底として任意の状態を式 8 のように固有状態の「重ね合わ

せ」(線型結合) 表現できることは自然に理解できる。 $\alpha$  および  $\beta$  は確率振幅と呼ばれる。

$$\psi = \alpha\phi_0 + \beta\phi_1 \quad \alpha, \beta \in \mathbb{C} \quad (8)$$

ここで量子ビットを「観測」したとしよう。量子ビットを観測すると光子が「ある」「ない」いずれかが観測される。この時、「ある」が観測される確率は  $|\alpha|^2$  であり、「ない」が観測される確率は  $|\beta|^2$  である。したがって、 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$  である。注意したいことは、いちど観測された量子ビットは「波動性が失われ」観測した状態で確定することである<sup>4)</sup>。マイクロ波の固有モード展開の場合、観測により重ね合わせの状態そのものを観測することができる<sup>5)</sup>。マイクロ波光子そのものは  $\phi_0$  あるいは  $\phi_1$  いずれかの状態をとるのだが、膨大な数があるためにそれが積算された状態を直接観測できる。

ここに古典力学と量子力学の決定的な考え方の相違が現れている [3]。古典力学では「測定するしないにかかわらず、物理量は、各瞬間瞬間で定まった値を持っていて、物理の理論はその値を追いかければ良い」のに対し、量子力学では「全ての物理量が各瞬間瞬間に定まった値を持つことは一般にはなく、物理量は変数ではなくなにか別のもの(例えば演算子で)で表現する。測定とは観測者が測定値を一つ得る行為で、得られる測定値は、同じ物理状態について測定しても測定の際にばらつくが確率分布は一意に定まる。測定値の確立分布を与えるものを物理状態として、物理量とは別のもの(例えば波動関数  $\psi$  や次に述べる状態ベクトル  $|\psi\rangle$  で)で表現する。」必要がある。

式 (8) の状態を行列形式で書き直すと式 (9) のように書き下せる。直交基底で展開した関数を行列やベクトルで表現することはマイクロ波工学に

おける数値解析でもしばしば登場するテクニックである。

$$\psi = \begin{bmatrix} \phi_0 & \phi_1 \end{bmatrix} \left( \alpha \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \beta \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right) \quad (9)$$

量子情報ではしばしばケット記号  $|\cdot\rangle$  を用いて状態ベクトルを表す。ケット記号は縦ベクトルを表す記号<sup>6)</sup>で中身は状態を表す記号であり、 $\phi$  や 0、1 などが用いられる。これを用い且つ固有関数を省略すると、 $|0\rangle = [1 \ 0]^T$ ,  $|1\rangle = [0 \ 1]^T$  として量子ビットの状態(式 9)を次のように簡潔に記述できる。

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (10)$$

### 3 量子計算機の理論

量子力学では量子の状態を状態ベクトルで表し、観測により重ね合わせ状態が壊れ古典情報となることがわかった。これらの現象を利用して量子計算は実行される。具体的な実装例を示す前に量子計算の基礎理論を共有する。

#### 3.1 量子ビット

2 つの基底状態を持つ量子系を選択あるいは工学的に作り出し量子ビットとして利用することで量子コンピュータを構成する。古典ビットは 0 と 1 の 2 値の情報を観測するしないにかかわらず保持し、N 個の古典ビットは N ビットの情報を保持する。これに対し、量子ビットは  $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$  の重ね合せ状態を作ること、N 個の量子ビットで  $2^N$  ビットの情報を同時に保持することができる。量子ビットは古典ビットと比較して圧倒的に多数の情報を表現することができる。多数の量子ビットの確率振幅を並列に適切なタイミングで所望の状態に操作してゆくことで量子コンピュータは複雑な計算を実施する。超伝導量子ビットの場合、状態の制御にマイクロ波パルスを用いる。

4) 波束の収束と呼ばれる。測定とは量子系が相互作用して古典系に影響を与えることと考えると、古典系の法則を破らないようにこのような現象が起こる、ぐらいい自分では納得するようにしている。

5) ここで、 $|\alpha|^2$  はモード  $\phi_0$  のもつ電力、 $|\beta|^2$  はモード  $\phi_1$  のもつ電力となり、 $|\alpha|^2 + |\beta|^2$  は系全体の電力を示す。

6) 実際には非常に役立つ記法であるがここでは割愛し縦ベクトルの表記であることのみ注目する [1]

### 3.2 ブロッホ球

単一の量子ビットを観測すると  $|0\rangle$  あるいは  $|1\rangle$  のいずれかが観測するため、確率振幅  $|\alpha|^2$ 、 $|\beta|^2$  の間には  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$  の制約がある。また、量子計算には  $\alpha$  と  $\beta$  の相対位相のみが寄与する。複素確率振幅を  $\alpha = |\alpha|e^{j\xi_a}$ 、 $\beta = |\beta|e^{j\xi_b}$  と書いた時、 $\xi_a$  を基準とした位相差を状態の前に出して表記すると状態ベクトル式 (10) は式 (11) のように書き直せる。位相差を  $\xi = \xi_b - \xi_a$  とした。

$$\begin{aligned} |\psi\rangle &= e^{j\xi_a} (|\alpha||0\rangle + e^{j(\xi_b - \xi_a)}|\beta||1\rangle) \\ &\rightarrow |\alpha||0\rangle + e^{j\xi}|\beta||1\rangle \end{aligned} \quad (11)$$

独立変数  $\theta$ 、 $\xi$  で単一量子ビットの状態を視覚的に表現するためにブロッホ球 (図 1) がしばしば用いられる。まず、北極に  $|0\rangle$  南極に  $|1\rangle$  (これは慣例で量子のスピンを記述した際の名残) を距離 1 で配置して、これを直径とする球をつくる。便宜的に直線  $|1\rangle|0\rangle$  を  $z$  軸と置きその中央に原点を置く。赤道上の代表的な 4 点は次式のように表せる。直線  $|-\rangle|+\rangle$  を  $x$  軸、直線  $|-\rangle|+\rangle$  を  $y$  軸と考えると対応が良い。球面上の一点が単一量子ビットの状態を表す。量子ビットは古典ビットと比較してはるかに多くの情報を表現できることがわかる。

$$|\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle \pm |1\rangle) \quad (12)$$

$$|\pm j\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle \pm j|1\rangle) \quad (13)$$

確率振幅間の位相差  $\xi = \xi_b - \xi_a$  は状態ベクトル  $\phi$  と  $|+\rangle$  がなす角  $\xi$  そのもので表す。次に  $\theta$  が何を表すのかを見る。ブロッホ球の  $zx$  断面を図 2 に示す。量子ビットの状態  $|\psi\rangle$  が  $|0\rangle$  に対して  $\theta$  の角度をなしているとする。ここで、直径  $|1\rangle|0\rangle$  が  $|\psi\rangle$  の緯度で分割される点で  $|\alpha|^2$  と  $|\beta|^2$  に分割されると考えることができる。球の半径が  $1/2$  であることを思い出すと、 $|\alpha|^2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \theta$ 、 $|\beta|^2 = 1 - |\alpha|^2 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \theta$  となり、半角の公式

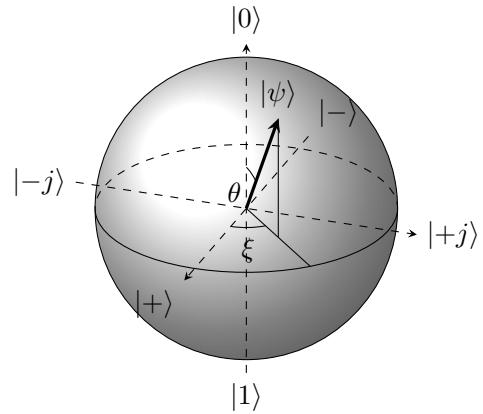


図 1: 量子ビットの状態を表すブロッホ球

と位相差  $\xi$  を考慮すると次式を得る。つまり、測定においてブロッホ球面の緯度を見れば  $|0\rangle$  と  $|1\rangle$  の得られる確率が視覚的にわかる。 $|0\rangle$  に近ければ  $|0\rangle$  が観測されやすくなり、測定後は  $|0\rangle$  あるいは  $|1\rangle$  の観測された値に収束する。<sup>7)</sup>

$$\alpha = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (14)$$

$$\beta = e^{j\xi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (15)$$

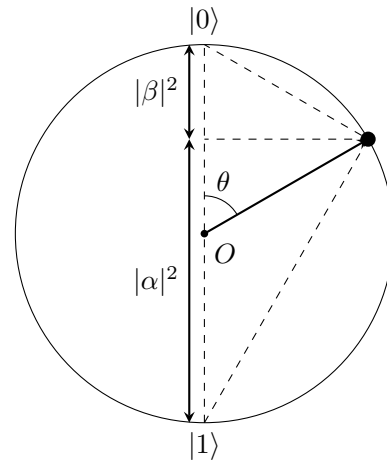


図 2: ブロッホ球を  $Z$  軸 ( $|0\rangle$  と  $|1\rangle$  を結ぶ直線を含む軸) を含む断面

### 3.3 量子回路

超伝導量子ビットでは、状態ベクトルを操作するのにマイクロ波パルスを用いる。量子ビットの共振周波数のマイクロ波パルスの長さ  $T$  に応じ

7) 複素変数の情報を平面に表示するという点で IQ 平面に似てはいるが、全く別のものなので注意が必要。

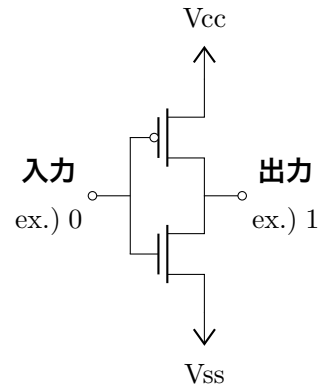
て  $\theta$  が回転する。慣用的に回転角  $\theta$  の大きさを  
用いて  $\pi$  パルスや  $\pi/2$  パルスと呼ぶことがある。  
 $\pi$  パルスは  $|0\rangle$  と  $|1\rangle$  を反転させるので論理ゲー  
トの NOT 操作を実現する。 $\pi/2$  パルスは最大限  
の重ね合せ状態  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$  を作り出すために  
頻出する操作である。マイクロ波の搬送波位相に  
よって  $\xi$  が決まる。2 量子ビットを同期させて操  
作、特にもつれ状態を生成する時などに位相  $\xi$  が  
重要な役割をする。

量子ビットの状態がベクトルで表せることから  
分かるとおり、操作（しばしばゲートと呼ばれ  
る）は状態  $\psi_a$  を  $\psi_b$  へ変換する行列で表せる。  
変換行列はブロッホ球面上の回転操作に対応する  
ためユニタリ行列に限られる。これは確率の和を  
不変に保たなければいけないことに起因し、マイ  
クロ波では扱うケースを無損失回路の回路行列に  
限定すること、すなわち入出力で系の電力総量は  
不変である状態のみを扱うことに対応する。

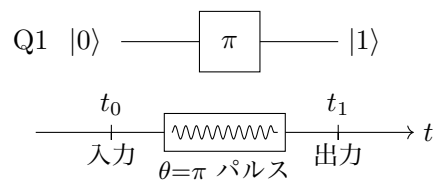
量子ビットでは入出力がアイソレートされてお  
らず、時間経過である時点を入力の状態、ある時  
点を出力の状態とする。図 3 の様に 1 量子ビッ  
トは初期状態  $\phi(t_0)$  が入力、ゲート終了時点の状  
態  $\phi(t_1)$  を出力として扱う。

任意の論理回路を量子ゲートで実現するには、  
複数の量子ビット間に入力値に依存して出力が決  
まる関係、つまり量子ビット間に強い相関のある  
関係を作らなければならない。例えば、次の真  
理値表を実現する回路は CNOT と呼ばれる。制  
御 (control) ビットの状態  $|\phi_c\rangle$  が  $|0\rangle$  の時は標的  
(target) ビットの状態  $|\phi_t\rangle$  を反転させる。複数の  
量子ビットの状態はこれを併記して  $|\phi_c\rangle|\phi_t\rangle$  と  
書くが、これを略して  $|\phi_c\phi_t\rangle$  と表記することが  
多い。

阪大テストベッドの構成では、交差共鳴 (CR;  
Cross Resonance) という現象を利用して CNOT  
を構成する。詳しい原理は本講座の範囲を超える  
ため省略するが、概略を述べる。まず、制御ビッ  
ト C と標的ビット T との間を容量にて弱結合し



(a) 古典 NOT ゲート



(b) 量子 NOT ゲート

図 3: 古典ゲートと量子ゲート

表 1: 制御 NOT (CNOT) の真理値表

$ \psi_c(t_0)\rangle$	$ \psi_t(t_0)\rangle$	$ \psi_c(t_1)\rangle$	$ \psi_t(t_1)\rangle$
$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$
$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$
$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$
$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$

ておく (これはチップの設計時点で決定される)。  
C と T は共振周波数  $f_c$  と  $f_t$  が十分にずらして  
ある。量子ビット C に対して  $f_t$  で T の状態を  
設定するパルスを励振すると、C の状態に依存し  
てパルスが変調されるため T の状態が C に依存  
して操作されることになる。

CNOT を使うと量子もつれ状態を作り出す  
ことができる。 $|\phi_c\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$ ,  $|\phi_t\rangle = |0\rangle$   
を初期状態として CNOT を作用させると  
 $|\phi_c\phi_t\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$  となり、 $\phi_c$  と  $\phi_t$  が常に  
同じ状態になっている。このように最大の相関を  
持つ  $\psi_{\text{bell}} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$  をベル状態と呼ぶ。  
量子もつれは量子ビットの間の依存関係を発生さ  
せるため、任意の計算処理を行うために必須の要  
素である。

古典論理回路では NAND ゲートが完全系であることが知られている。NAND ゲートがあればどんな真理値表でも作ることができる。量子回路でも NAND ゲートが実現できればあらゆる処理を量子回路で組み立てることができる<sup>8)</sup>。量子ビットでは NAND ゲートは 3 量子ビットの制御制御 NOT 回路で作ることができる。NAND は 2 入力 1 出力の回路が必要であるため、量子ビットでは 3 量子ビットが必要となる。

### 3.4 量子コンピュータの方式

実用的な量子コンピュータを構成するには、量子回路の他にメモリや制御装置、入出力装置が必要となる。図 4 に従来のコンピュータと量子コンピュータとの全体構成の比較を示す。従来のコンピュータは制御装置がメモリからプログラムやデータを取り出し適切な順番で演算装置を稼働させ演算結果をメモリに書き込むサイクルを繰り返すことで計算を実行する。量子コンピュータも同様に動作するが、以下の様な相違がある。

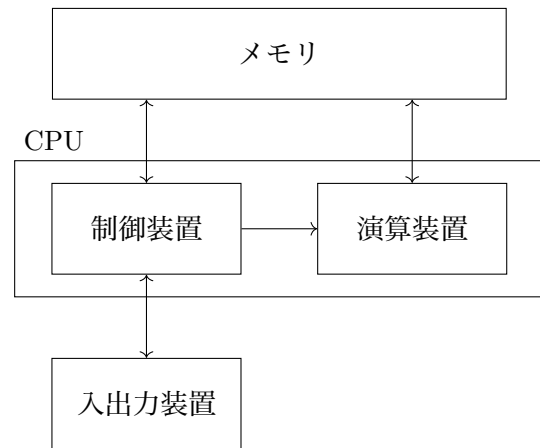
古典組み合わせ論理回路と異なり、量子回路はメモリと一体化しており入出力もアイソレーションされていない。現状の超伝導量子コンピュータでは、制御装置は量子回路と分離されていて、古典コンピュータにマイクロ波信号発生・信号分析装置を備えた構成になっている。

ユーザは入出力装置を介して制御装置に制御パルス波形をプログラムし実行する。制御装置はプログラムに従って適切なタイミングで適切なチャネルに制御パルスを送出・測定を実施し、測定結果を入出力装置に出力する。

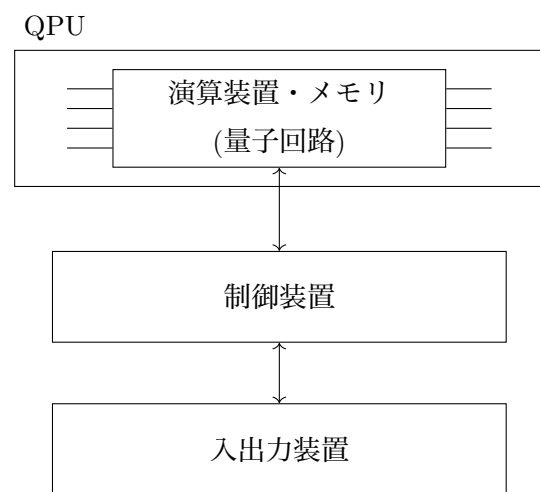
## 4 超伝導量子コンピュータの実際

図 5 に阪大 QIQB で構築しているテストベッドを設置している実験室の様子を示す。阪大

8) ただし、任意の回路を効率よく生成するためには別の基準も必要となる。ハードウェアの制約に則った効率的なゲート構成方法（最適化コンパイラのようなもの）なども盛んに研究されている。



(a) 従来のコンピュータの基本構成



(b) 量子コンピュータの基本構成

図 4: 従来のコンピュータと量子コンピュータの基本構成の相違

QIQB のロゴが入った白い円筒が量子ビットチップを収めた冷凍機、左奥に見えるラックに収められ SMA コネクタが多数並んだ箱が我々の開発した制御装置である。冷凍機と制御装置との間には多数の同軸線路が結ばれている。阪大テストベッドの構成では 1 量子ビット当たり 1.75 本の同軸線路が必要となっている。64 量子ビットに対して一部の配線が行われており、96 本の同軸線路が制御装置と結ばれている。

### 4.1 冷凍機とその内部

超伝導量子ビットを正しく動かすためには 10mK 程度の温度環境下に置かなければならない。10mK の温度環境を作り出すために希釈冷凍





図5: 阪大 QIQB で構築したテストベッドの様子

機を用いる。これはヘリウム 3 とヘリウム 4 の混合液の性質を用いた循環型の冷凍機である。図6 に簡略化した超伝導量子コンピュータの冷凍機内部の構造を示す。冷凍機内部は温度傾斜のついた複数のステージに分割されている。量子ビット Q は最も冷却されている 10mK 程度の極低温ステージに設置される。量子ビットと容量結合した読み出し共振器が隣接して配置される。「もつれ」を作り出すため量子ビットは隣接した他の量子ビットとも容量結合されるが、図では省略した。量子ビット Q を制御するパルスは Control ラインから導入される。Control ラインは信号発生機から発生する 300K の熱雑音を十分に減衰させるための減衰器や量子ビットの意図しない励振を防ぐためのアンチスプリアスフィルタ LPF が挿入されている。読み出し共振器にはサーキュレータを介して Readout Tx ラインと Readout Rx ラインが接続されている。図から分かる通り、送受信配線が非対称であるため、サーキュレータにより送受信信号が分離されている。Rx ラインには LNA からの不要雑音を防ぎ帯域制限する BPF や 4K ステージの LNA が設けられていて系全体の NF を向上させている。10mK ステージにジョセフソンパラメトリックアンプを設置してより雑音性能を向上させる試みも行われている。極低温化で系の雑音指数を評価すること自体が難しく、研究課題のひとつとなっている。

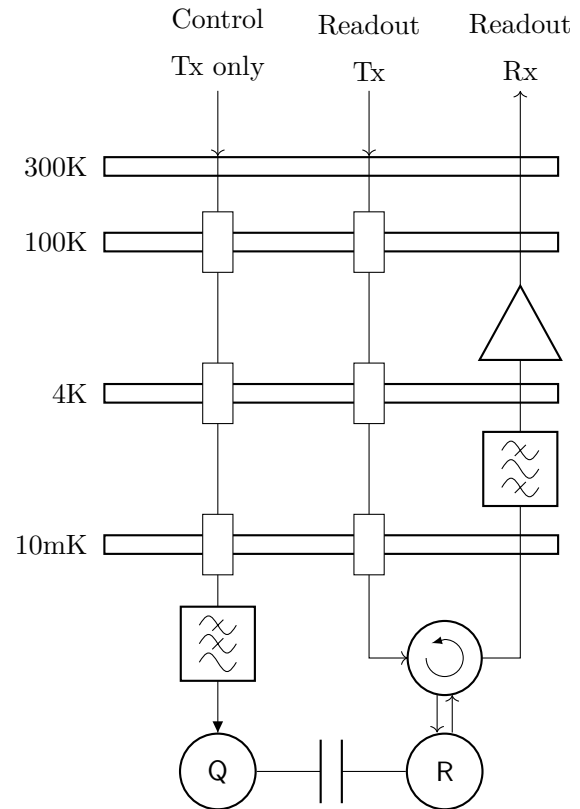


図6: 超伝導量子コンピュータの配線概要

### QPU; Quantum Processing Unit

QPU は従来のコンピュータにおけるメモリと演算装置に相当する量子回路である。量子回路は物理的には量子ビットと読み出し回路から構成され、これらがマイクロ波パルスにより適切なタイミングでゲート操作や測定される。

量子ビットはマイクロ波フォトンを一つだけ保持できる非線形 LC 共振器である。フォトンが入っている状態が  $|1\rangle$  空の状態が  $|0\rangle$  である。これは古典ビットでコンデンサが充電されていると 1、放電していると 0 を示すのに対応している。フォトンの出し入れには共振器の共振周波数  $f_0$  を搬送波とするマイクロ波パルスが用いられる。非線形インダクタとしてジョセフソン接合ダイオードが用いられ、フォトンひとつ分のエネルギー差によって共振周波数が変動して非共振状態となるため、 $f_0$  で励振し続けてもふたつ以上のフォトンをストックすることができない。量子ビットの磁気に弱いいため磁気シールドを施して保護している。



量子ビットの状態を検出するためにはフォトンひとつ分のエネルギー差  $-201.8$  dBm を検出しなければならないが、直接測定することは難しい。読み出し回路は量子ビットへ与える擾乱を少なく保ちつつ比較的多数のフォトンを使って S/N 比を高く状態を測定するための回路である。阪大のテストベッドでは分散読み出しと呼ばれる手法を使っている。これは、量子ビットより数 GHz 高い共振周波数を示す読み出し共振器（線形共振器）を容量結合した分布定数型共振器である。読み出し共振器から見ると量子ビットは  $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$  によって変化するインダクタンスに見える。読み出し共振器の共振周波数も変化するのので、VNA 様の方法で複素反射係数を測定すれば反射位相の変化として量子ビットの状態を測定できる。前述した通り、量子ビットを観測すると量子状態  $|\phi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$  の  $|\alpha|^2$  で  $|0\rangle$  が、 $|\beta|^2$  で  $|1\rangle$  が観測され、状態が遷移する。量子ビットの状態が同じになるように制御した上で多数回の測定を行うと、観測値される複素反射係数はガンマ平面に対して確率的に発生する「 $|1\rangle$ 」「 $|0\rangle$ 」に対応した2点と雑音（量子力学的な広がり「真空揺らぎ」と古典雑音の加算）が重畳された点群のクラスターとなる。無線通信では BPSK 信号のようにみえる。読み出し忠実度（制御が完璧と仮定して）は 99.9 % が目標（現状は 99 % 程度）である。シンボルエラー率だと考えるとわかりやすい。

複数の量子ビットとの交差共鳴現象を利用可能とするため、量子ビット間は容量結合されていて隣接する量子ビットの共振周波数は 1GHz 程度離して配置されている。隣接量子ビットの配列は直線型、格子型、6角型などさまざまな構成が検討されている。

### 同軸配線

量子ビットや読み出し共振器へのマイクロ波の導入は同軸ケーブルを用いて行う。同軸ケーブルと量子ビットや共振器との接続方法は様々で、平

面導波路を用いて引き出した後に同軸とエッジ結合するものや、同軸の芯線をプローブとして垂直方向から接触させるものなどがある。阪大テストベッドの構成では、理研で開発された垂直プローブ方式が用いられている。量子ビットは磁気を嫌うので同軸ケーブルやコネクタも非磁性材料によるものが使われる。非磁性材料には無酸素銅や Ni 配合率の低い Cu-Ni 合金がしばしば使われる。

多重化など何の工夫もしないと 1 量子ビット当たり 4 本 (制御、読み出し送信、読み出し受信、増幅器ポンプ信号) の同軸線路が必要になるが、阪大テストベッドでは理研初号機と同じ読み出し 4 Qubit を多重化しているため、1.75 本/Qubit に抑えられている。冷凍機外との通信に使う線路数を削減する研究は盛んに行われている。ステージ間接続やコンポーネント間の接続にも多数使われており、最近では集合同軸などのコンポーネントが販売され始めている。交差共鳴などの特性向上のため厳しいチャンネル間アイソレーションが求められる。

冷凍機内にはマイクロ波受動部品が多数用いられている。例えば、サーキュレータやアイソレータ、フィルタ、アッテネータなどがある。アッテネータは 300K の室温下で発生した熱雑音を極低温レベルに十分に減衰させるため 40 ~ 60 dB 程度がステージ間に設けられている。このため、読み出し共振器の反射測定は送信（アッテネータ有）と受信（アッテネータ無）の線路は別々に設けられている。量子ビットの動作する 1K 以下の極低温下では半導体能動素子が動作しないため、プリアンプなどの増幅器は 4K 程度の温度ステージに置かれることが多く、HEMT 増幅器が用いられている。1K 以下の極低温ではジョセフソン接合の非線形性を利用したパラメトリック増幅などが用いられている。

## 4.2 制御装置

阪大 QIQB では大規模量子コンピュータの実現を睨んだ制御装置の研究開発を行っている。研究成果の一部は QIQB 量子ソフトウェア研究拠点を通じて参画企業にライセンスされ商業化も進められている。阪大テストベッドでは図に示す 64 Qubit 対応制御装置を開発・稼働しており、同様の装置が理研初号機にて稼働している。制御装置はホストとなる従来型コンピュータと高速 FPGA によるデジタル信号処理・任意波形生成ロジック、無線通信信号処理用 ADDA、アップダウンコンバータなどから構成される。アップコンバージョンにはヘテロダイン方式を用いた。高速 FPGA モジュールからアップコンバータまでの IC を PCB 上に実装することで大幅な小型化を実現した。PCB 上の伝送線路に差動配線を積極的に採用することでポート間のアイソレーションを確保するなど、さまざまな工夫がされている。

装置は 16 Qubit 分を制御可能な 3 台をひと組として 4 組 12 台で 64 Qubit を操作する。ADDA の入出力チャンネル資源を効率的に活用するため、制御 4 ポート、読み出し出力 2 ポート、読み出し入力 2 ポート、ポンプ出力 2 ポートを備えた Type A x 2 台と制御 8 ポートを備えた Type B x 1 台でひと組として運用する。各装置は 100MHz の安定した基準クロック発生装置を共有しており、2ns の精度でパルスタイミングを同期することができる。位相安定度は  $\pm 1$  deg.rms を実現した。高い位相安定度を得るために ADDA コンバータやアナログ IC の温度をペルチェ素子で安定化する機構を備えている。マイクロ波パルスの瞬時帯域は 1.5 GHz、DAC サンプリングレートは 12GSa/s 分解能 16-bit、ADC サンプリングレートは 6GSa/s 分解能 12-bit を備える。DAC / ADC のデータをハンドリングするメモリ帯域幅は 312GB/s を実現した。出力雑音レベルは -155dBm/Hz 以下である。

量子ビットを所望の状態に遷移させるための制

御信号を送信するとともに、読み出し信号の送信・受信、パラメトリック増幅器のポンピング信号の送信を行う。制御装置には用途の異なる 3 種類の出力と 1 種類の入力がある。量子ビットの書き込み用の出力 8GHz, -30dBm ~ 0dBm 程度、量子ビットの読み出し用出力 10GHz, -30dBm 程度、増幅器のポンピング用出力 20GHz, 10dBm 程度、量子ビットの読み出し用入力 10GHz, -80dBm 程度が要求される。全ての出力は位相やパルスのタイミングが同期していなければならない。図 7 に具体的なパルスの例を示す。まず、Qubit を初期化するため、コヒーレント時間  $T_1$  の 10 倍程度の時間信号を出さない静かな状況を作りだす。その後、 $\theta = \Theta$  回転を生み出すパルス長  $T$  のパルスを送出する。量子ビットの状態  $|\psi_\theta\rangle$  が緩和してしまわないよう直後に読み出し共振器に ReadoutTx 回線を通してパルスを送出すると共に共振器の反射波の到着を待つ (遅延時間  $\delta$ ) 読み出し信号のキャプチャを開始する。キャプチャした信号は Qubit の純粋状態  $|0\rangle$  と  $|1\rangle$  に相当するガンマ平面上の 2 点が測定される。信号強度が大変小さいため 1,000 ~ 100,000 回の積算測定を行い SN 比を稼ぐことも多い。この場合、平均化するとガンマ平面上で  $|0\rangle$  と  $|1\rangle$  を結ぶ直線を  $|\alpha|^2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \Theta$ ,  $|\beta|^2 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \Theta$  で按分する点が観測される。これを繰り返すと  $T$  の長さに伴ってブロッホ球上の  $\Theta$  が変化する様子が観測される。この現象はラビ振動と呼ばれ、量子現象を確認するためにしばしば行われる実験である。注意点は、測定すると量子ビットの状態が壊れてしまうので、状態を再設定しなければならないことである。量子ビットを再度初期化するため、 $10T_1$  程度のインターバルを開けて測定する。FPGA などの高速信号処理系を備えていれば 10000 積算でも 1 点あたり数秒で測定が終えられるが、PC などのオフライン処理のみとなると、このような積算測定には数十分の時間がかかる。

基本的には大規模な MIMO 送受信装置であるが、通常の MIMO 通信と異なり、複雑な信号処

理は送信側でのみしか実施できないため、高いマイクロ波生成精度が要求されている。

阪大 QIQB では量子コンピュータのクラウド公開に必要なソフトウェア群も開発・提供している。共同研究の参画企業と共同して理研初号機のクラウド公開の仕組みの開発に貢献した。

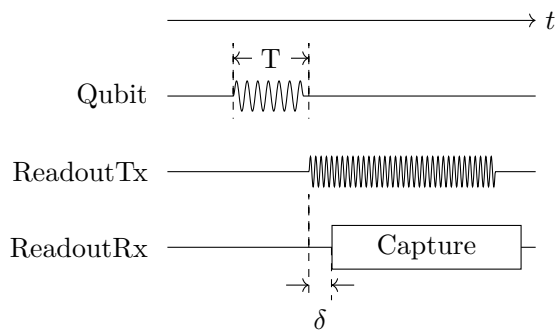


図 7: 超伝導量子ビットのラビ振動を観測するパルス例

## 5 今後の課題

実用的な量子アルゴリズムには量子ビット数の他にゲートを十分な階層で重ねがけできる時間的な長さ（従来の計算機ではプログラムのステップ数に対応する）が必要である。量子ビットにゲートを重ねがけできる時間は、量子ビットが状態を保持できる時間（コヒーレントタイム）に律束される。現在の量子ビットは数  $100\mu\text{s}$  が実現されており、ms オーダーの物も報告されてはいる。しかし、コヒーレントタイムを長くするとゲート速度が遅くなるため、結果としてゲートが深くできないというジレンマが生じる。根本的に解消するためには量子誤り訂正の実現が強く求められている。量子誤り訂正とは、通信における誤り訂正と同様、保持したい量子情報に冗長性を持たせて符号化し、適宜誤り検出を行なって量子ビットを正しい状態に訂正する。量子情報は複製できないため、量子もつれを利用して強相関を示す物理量子ビットの塊を論理量子ビットとして用いる。難しい点は、制御の忠実度を  $99.9\% \sim 99.99\%$  を達成しなければならないこと、 $100 \sim 1000$  ビット

のもつれを作り出さなければいけないこと、より効率的な符号を編み出すことなどがある。

品質を保ったまま QPU チップを拡大し続ける方策の他に、マルチチップ間の結合技術や冷凍機間結合の技術も研究が始まっている。従来の IC 間接合より複雑なのは、量子テレポーテーションにより量子情報を転送する必要がある点である。

冷凍機と制御装置の間の接続についても課題は多い。伝送路の多重化による配線数の削減は大きなテーマである。mK 環境下では信号処理装置を稼働させることが困難なため、送信側で行える限りでの多重化テクニックしか使えないことが難しい。光無線技術の応用も検討が始まっている。できる限りの信号処理を冷凍機内の 4K ステージに設ける試みも始まっている。4K であれば、GaAs HEMT や Si CMOS が動作する。Cryo LNA はすでに広く使われているが、Cryo CMOS についても量子制御への適用例が報告されている。

このまま量子ビット数の拡大を続ける限り、量子誤り訂正を備えた量子計算機はやがて出現すると考えられるが、しばらく時間が必要である。それまでの間の計算機は NISC; Noisy Intermediate Scale Computer と呼ばれる。継続的な規模の拡大のためには NISC においても実用的な応用を見出すことが大切である。量子化学計算や量子機械学習など様々な応用が模索されている。

## 6 まとめ

マイクロ波技術者に対して量子コンピュータの「工学的な直感イメージ」を持ってもらうことを目標に講義を構成した。量子の具体的なイメージから始まり、量子現象を使った計算の仕組みまで、できるだけ飛躍を排しつつ簡潔に説明することを試みた。特に、直感イメージはマイクロ波技術者の常識と照らし合わせたイメージとの対応を心がけた。超伝導量子コンピュータは規模の拡大期にあり、さまざまなテーマの研究が盛んである。特

にマイクロ波技術者と量子の研究者との対話による新技術の発想や発明などが期待される。量子コンピュータに必要なマイクロ波技術は無線通信と似てはいるが、詳細なシステム性能のバランスなどはまだ最適化しているとは言い難く、急速に発展する量子コンピュータ技術に合わせて最適化を続けていかなければならない。マイクロ波技術は大変重要な位置を占めている。本講座を足がかりに、国内でもマイクロ波技術者の参入が増加することを期待する。

## 謝辞

本研究の一部は、COI-NEXT 量子ソフトウェア研究拠点 大阪大学 JPMJPF2014 および JST ムーンショット型研究開発事業 Grant 番号 JPMJMS2067 の支援を受けたものです。

## 参考文献

- [1] 北野, "量子力学の基礎," 共立出版, 2010.
- [2] 浜松ホトニクス, "フォトン二重性", [https://photonterrace.net/ja/photon/duality\\_test/](https://photonterrace.net/ja/photon/duality_test/)
- [3] 清水, "新版 量子論の基礎," サイエンス社, 2003.
- [4] 田淵, 杉山, 中村, "超伝導技術を用いた量子コンピュータの開発動向と展望," 電子情報通信学会誌, Vol.101, No.4, pp.400-405, 2018.
- [5] M.A.Nielsen and I.L.Chuang, "Quantum Computation and Quantum Information," Cambridge University Press, 2000.
- [6] P.Krantz, M.Kjaergaard, F.Yan, T.P.Orlando, S.Gustavsson, W.D.Oliver, "A quantum engineer's guide to superconducting qubits," Appl. Phys. Rev. Rev. 6, 021318 (2019).
- [7] 長田, 山崎, 野口, "量子技術序論," Q-LEAP 量子技術教育プログラム, 2021.
- [8] 山本, "量子情報技術," 国立国会図書館, 2022.
- [9] 藤井, "驚異の量子コンピュータ," 岩波科学ライブラリー, 2019.
- [10] 東野, "量子コンピュータの頭の中," 技術評論社, 2023.
- [11] Rutaro Ohira, Takefumi Miyoshi, Kazunori Mae-

tani, Tatsuya Oshio, Keisuke Koike, Shinichi Morisaka, Koichiro Miyanishi, Toshiki Kobayashi, Kazuhiro Hayasaka, Utako Tanaka, Kenji Toyoda, and Makoto Negoro, "An RFSoc-based Arbitrary Waveform Generator for Coherent Control of Atomic Qubits," 1st International Workshop on Quantum Information Engineering (QIE2023), OIST Seaside House, October 11-13, 2023.

- [12] Takefumi Miyoshi, "Keynote II: A Challenge of Scalable Quantum Computing Control Systems," 2023 IEEE 53rd International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL), Matsue, Japan, 2023, pp. 16-16, doi: 10.1109/ISMVL57333.2023.00010.
- [13] Takefumi Miyoshi, Keisuke Koike, Shinichi Morisaka, Hidehisa Shiomi, Kazuhisa Ogawa, Yutaka Tabuchi, Makoto Negoro, "FPL Demo: A Flexible and Scalable Quantum-Classical Interface based on FPGAs," 2022 32nd International Conference on Field-Programmable Logic and Applications (FPL), Belfast, United Kingdom, 2022, pp. 473-473, doi: 10.1109/FPL57034.2022.00089.
- [14] 三好 健文, "量子コンピュータの制御を支える技術と課題", 応用物理学会超集積エレクトロニクス産学連携委員会 第1回研究会, 2022年8月
- [15] Makoto Negoro, Kazuhisa Ogawa, Takefumi MIYOSHI, Hidehisa Shiomi, Shinichi Morisaka, Mitsuki Kobachi, Kazuma Moriuchi, Ryohei Niwase, Yuta Kawai, Keisuke Koike, Satoshi Funada, Shuhei Tamate, Yutaka Tabuchi, Yasunobu Nakamura, "Superconducting qubit control with a system of an integrated microwave board and FPGA", APS March Meeting 2022, Volume 67, Number 3, March 14-18, 2022, Chicago
- [16] 三好 健文, "量子コンピュータ制御システムの研究・開発・製造・販売への挑戦", 信学技報, vol. 121, no. 344, RECONF2021-63, pp. 37-37, 2022年1月.

## 著者紹介

塩見 英久

大阪大学 量子情報・量子生命研究センター 特任准教授  
shiomihidehisa.qiqb@osaka-u.ac.jp  
キューエル (株) 顧問  
shiomiquel-inc.com