

# 量子コンピュータ早期実現の可能性を開く フォールトトレラント量子計算手法

Fault-Tolerant Quantum Computation Method Offering New Possibility for Realization of Quantum Computers

後藤 隼人 市村 厚一

■GOTO Hayato ■ICHIMURA Kouichi

量子コンピュータは、原子や分子などの微視的な世界を記述する量子力学の特異な性質を利用したまったく新しいコンピュータであり、従来できなかったことを実現できると期待されている。しかし、従来のコンピュータにない特有の誤りが問題となっており、これを訂正しながら信頼性のある計算を実行するフォールトトレラント量子計算が、量子コンピュータを早期に実現するためのキー技術になっている。

東芝は、新しいフォールトトレラント量子計算の手法を開発し、この手法を当社で研究開発中の量子コンピュータにも適用した。その結果、誤り確率に対する条件が一桁改善されることを確認した。

A quantum computer, which is a novel type of computer exploiting the characteristic features of quantum mechanics, is expected to achieve solutions that cannot be accomplished with conventional computers, including large-scale molecular design and the attainment of an information retrieval system with perfect privacy protection. In order to swiftly realize a quantum computer, however, a quantum error correction technology and a fault-tolerant quantum computation technology hold the key to the correction of inevitable errors peculiar to quantum computation.

Toshiba has developed a new fault-tolerant quantum computation method and evaluated it using a quantum computer currently under development. As a result, we have confirmed an error threshold for fault-tolerant quantum computation that is 10 times higher than that of conventional methods.

## 1 まえがき

近年、現代物理学の基礎である量子力学と情報科学を融合した量子情報科学の研究が世界的に活発であり、量子コンピュータはその代表的な研究対象である。量子コンピュータは、量子力学的な“重ね合せの状態”を利用した新原理のコンピュータであり<sup>(1)</sup>、例えば大規模な分子設計<sup>(2)</sup>やプライバシーを完全に守る情報検索システム<sup>(3)</sup>など、従来のコンピュータができないことを実現すると期待されている。東芝は、“固体EIT (Electromagnetically Induced Transparency)”という独自技術に基づいた量子コンピュータの研究開発を行っている<sup>(4)</sup>。

量子コンピュータで利用される重ね合せとは、一つの物理系に対して複数の状態がどれにも決まらずに重なり合った非日常的な状態である。この不可思議な状態は大変壊れやすく、そのため量子コンピュータでは重ね合せの状態が壊れることによって起こる計算の誤りが深刻な問題となる。この問題を解決する技術がフォールトトレラント量子計算である。

当社は、新しいフォールトトレラント量子計算の手法を開発した<sup>(5)</sup>。この手法は、前述の当社で研究開発中の量子コンピュータにも適用でき、これにより誤り確率に対する条件を一桁改善することに成功した。これは量子コンピュータの早期実現の可能性を開くと期待される。ここでは、新たに開発したフォールトトレラント量子計算手法の概要と、性能評価の結果について述べる。

## 2 量子誤り訂正とフォールトトレラント量子計算

現在のコンピュータは、情報を0と1というビットで表している。それに対し量子コンピュータでは、二つの量子状態 $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の任意の重ね合せの状態 $a|0\rangle + \beta|1\rangle$ を取ることができる“量子ビット”が情報の基本単位になる。ここで、 $a$ と $\beta$ は $|a|^2 + |\beta|^2 = 1$ を満たす複素数である。したがって、量子コンピュータでの誤りとは複素係数 $a$ と $\beta$ の誤りであり、連続無限個の誤りパターンがある。これは、現在のコンピュータでの誤りがビット反転(0が1, 1が0になる誤り)しかないのとはまったく異なり、量子コンピュータ特有の事情である。量子誤り訂正は、このような量子力学的な誤りを訂正できる<sup>(1)</sup>。

量子誤り訂正を実際の量子コンピュータに適用する際は、誤り訂正処理に必要な操作自体が引き起こす誤りも問題になる。操作の誤りも訂正しながら信頼性のある量子計算を行うことをフォールトトレラント量子計算という。この理論によれば、誤りの発生確率があるしきい値以下に抑えられれば、いくらでも長い計算が可能になる。これをしきい値定理といい、量子情報理論の最大の成果の一つである<sup>(1)</sup>。

誤り確率がしきい値以下になれば、量子コンピュータの実現に近づくため、しきい値は高いほど良い。しきい値はフォールトトレラント量子計算の手法に依存しており、当初 $10^{-4}$ ~ $10^{-6}$ と低く見積もられていたが、その後の理論の発展によって、現在は約1%まで上がっている<sup>(6)</sup>。それでもまだ現状の量子コン

コンピュータの誤り確率を考えると十分高いとは言えない。

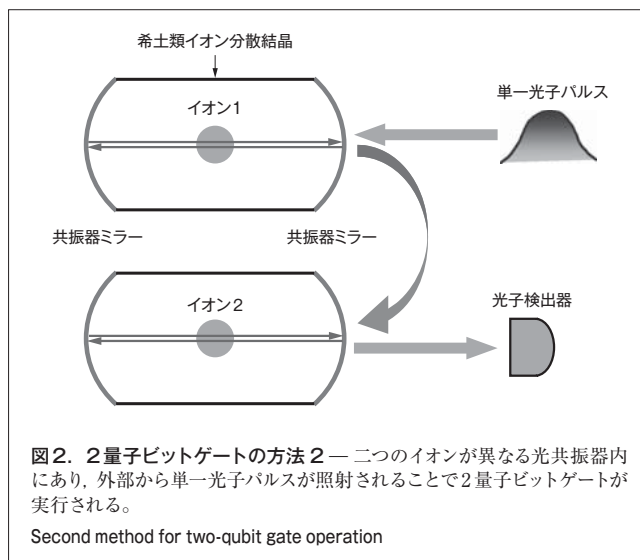
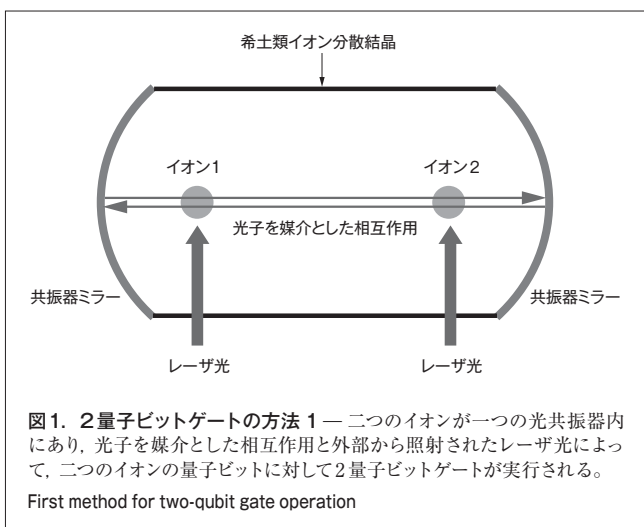
この1%という値は一般的な誤りモデルに基づいて見積もられた。そこで、実際のデバイスの誤り特性を考慮し、それに適した手法を用いれば、いっそうのしきい値向上が期待される。このような視点から開発したのが新しいフォールトトレラント量子計算の手法である。まず当社の量子コンピュータでの誤りモデルについて3章で、次にこの手法について4章で述べる。

### 3 2量子ビットゲートの誤りモデル

量子コンピュータに必要な様々な操作の中で、もっとも難しく誤り確率が高い操作が2量子ビットゲート、つまり二つの量子ビットに対するゲート操作である。そこで、2量子ビットゲートの誤りモデルがフォールトトレラント量子計算を考えるうえで重要である。当社で研究開発中の量子コンピュータにおける2量子ビットゲート<sup>(4)</sup>について以下に述べる。

この量子コンピュータでは、量子ビットは結晶中にドーブされた希土類イオンの核スピンの状態で表される。2量子ビットゲートを実現するために、光子を媒介として空間的に離れた二つのイオン間に相互作用を与える。このイオン・光子間相互作用は、光子を光共振器というものに閉じ込めることによって増強される。

イオンと光共振器の光子との相互作用を利用した2量子ビットゲートの実現方法は複数考えられているが、当社はこれまでにこのうちの二つを詳細に解析し、誤り確率を最小にする最適動作条件を明らかにしている。図1に示す方法では、一つの光共振器内に二つのイオンがあり、それらが光共振器の光子を媒介として相互作用し、外部から操作用のレーザー光をイオンに照射することで2量子ビットゲートが実行される<sup>(4), (7)</sup>。一方、図2に示す方法では、二つのイオンはそれぞれ異なる光共振器内にあり、外部から光共振器に単一光子パルスを照射



することで2量子ビットゲートが実行される<sup>(8)</sup>。

興味深いことに、これらの方法で行われる操作はまったく異なるにもかかわらず、誤り確率の最小値 $p_e$ はともに同じ形の式(1)で与えられる。

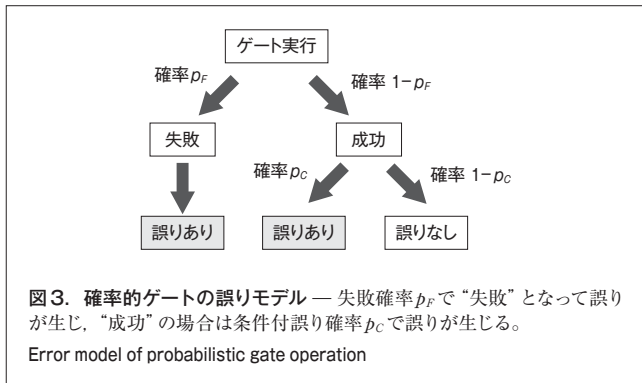
$$p_e = C\sqrt{k\gamma/g^2} \quad (1)$$

ここで、 $g$  はイオン・光子間相互作用の結合強度、 $k$  は光子の緩和速度、 $\gamma$  はイオンの緩和速度、 $C$  は定数であり、図1の場合 $C=4$ 、図2の場合 $C=3\sqrt{2}$ である。式(1)は、イオン・光子間相互作用を利用した2量子ビットゲートの普遍的な性質であろうと考えている。

この $p_e$ に対して従来のしきい値の最高値1%を適用すると、 $g > 100C\sqrt{k\gamma}$ という条件が得られる。これは、 $g$  が $k$  又は $\gamma$  に比べ400倍以上大きいことを要求しており、実際の物理系の値を考えると非常に厳しい条件である。そのため、フォールトトレラント量子計算の手法の改善によるしきい値の向上が望まれる。

実は、図2の方法では、照射した単一光子パルスを検出することによって、2量子ビットゲートが成功したかどうかかわかるようになっている。つまり、光子が検出されなければ、途中で何らかの散逸が起こって光子のエネルギーが喪失して2量子ビットゲートは失敗に終わったと予想され、逆に検出されれば、散逸は起こらなかったため2量子ビットゲートは成功したと予想される。

このように失敗したか成功したかが実行時にわかるゲートを“確率的ゲート”と呼ぶ(図3)。この確率的ゲートという誤りモデルでは、“失敗情報”(図2の場合は、光子の検出結果)をうまく利用することで、しきい値の向上が期待される。今回開発したのは、この確率的2量子ビットゲートに適したフォールトトレラント量子計算の手法である。これは汎用的であり、イオンと光共振器の光子との相互作用を利用した2量子ビットゲ



トに限らず、すべての確率的2量子ビットゲートに適用できる。

#### 4 確率的2量子ビットゲートに適したフォールトトレラント量子計算手法

当社が開発した手法は、従来のしきい値の最高値1%を達成したKnillの手法<sup>(6)</sup>を、確率的2量子ビットゲートに適するように改良している。主な改良点は、以下の三つである。

- (1) 確率的ゲートの失敗情報を利用した復号方法
- (2) 量子テレポーテーションを利用した符号化2量子ビットゲート
- (3) 確率的2量子ビットゲートを利用した効率的な状態準備の方法

ここで、復号とは誤り訂正を利用して符号化されたビットの真の値を推定すること、また、量子テレポーテーションとは量子力学的な相関を利用してある量子ビットの状態を別の量子ビットへ転送することである<sup>(1)</sup>。

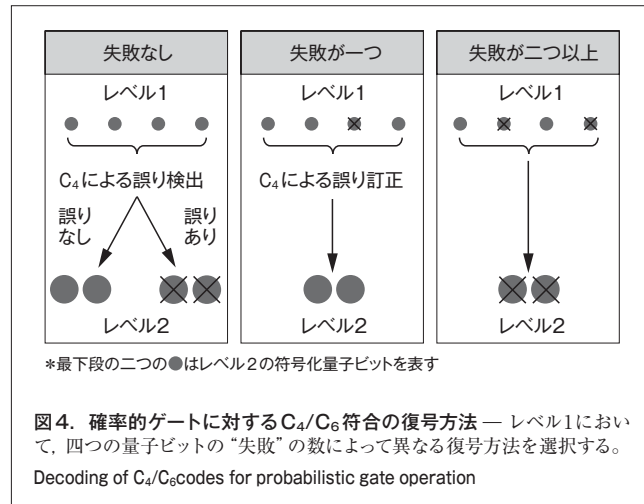
これらの改良点と、この手法の性能を評価した結果について以下に述べる。

##### 4.1 確率的ゲートの失敗情報を利用した復号方法

この手法で用いる量子誤り訂正符号は、Knillが提案した  $C_4/C_6$  符号である<sup>(6)</sup>。これは、符号化された量子ビットを用いて再び符号化することを繰り返す接続符号の一種で、最初の符号化(レベル1)では四つの量子ビットで二つの量子ビットを表す  $C_4$  符号を、それ以降(レベル2以上)では六つの量子ビットで二つの量子ビットを表す  $C_6$  符号を用いる。

$C_4$  符号も  $C_6$  符号も誤り検出符号であり、誤りの有無はわかるが、どの量子ビットに誤りがあるかはわからないため単独では訂正できない。一方、誤り検出符号は、なんらかの方法で誤りの場所を特定できればそれを訂正できるという性質がある。そこで、あるレベルで誤りを検出して誤りの場所を特定し、その次のレベルでその誤りを訂正する。これが  $C_4/C_6$  符号の復号方法である。

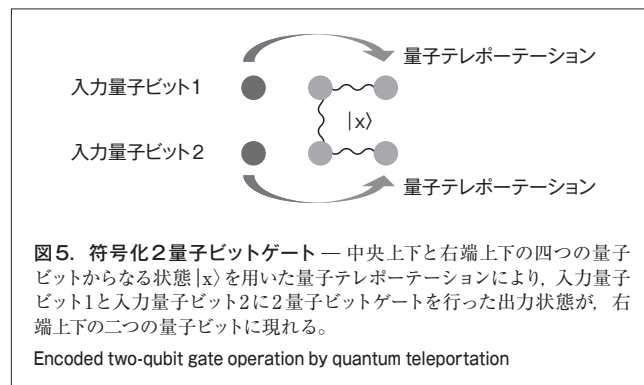
確率的ゲートに対する  $C_4/C_6$  符号の復号は、以下のようにして行う(図4)。ゲート実行後、誤り訂正処理の最初に行うレ



ベル1の復号において、失敗情報に基づいて異なる方法を選択する。四つの量子ビットの失敗情報のうち、すべて“成功”ならば通常の  $C_4$  符号の復号を行い、一つだけが“失敗”ならばその量子ビットにだけ誤りがあるとして  $C_4$  符号による訂正を行い、二つ以上が失敗ならば復号結果を“誤りあり”とする。  $C_4$  符号は誤り検出符号であるため単独では本来誤りを訂正できないが、一つの量子ビットだけが失敗した場合はその失敗情報によって誤りの場所が特定されたとして訂正できるポイントである。レベル2以降の復号は、従来の  $C_4/C_6$  符号と同様に行う。

##### 4.2 量子テレポーテーションを利用した符号化2量子ビットゲート

フォールトトレラント量子計算では符号化された状態のままゲート操作を行う。これを符号化ゲートと呼ぶ。この手法では、符号化2量子ビットゲートを量子テレポーテーションによって実行する<sup>(5)</sup>(図5)。これには、四つの符号化量子ビットからなる状態  $|x\rangle$  が利用される。符号化2量子ビットゲートを直接実行するよりも、失敗情報をうまく利用して誤りの少ない  $|x\rangle$  を準備し、それを利用した量子テレポーテーションによって符号化2量子ビットゲートを実行したほうが最終的な誤り確率を低くできる。



### 4.3 確率的2量子ビットゲートを利用した効率的な状態準備の方法

符号化された量子ビットの状態や前述の $|x\rangle$ を準備する際、しきい値を上げるうえで、失敗情報を利用したり、誤り検出を行ったりして、できるだけ誤りの少ない状態を選択する“ポストセレクション”が非常に有効である。しかし、あまり厳しい条件で選択すると、受理される状態が極端に減って繰り返し回数が増えすぎるため現実的ではない。そこで、繰り返し回数は現実的なまま、十分誤りを減らせる適度なポストセレクションを行うことが重要である。

この手法での状態準備は、以下の手順で行う。まず、レベル1の状態準備では、すべての確率的2量子ビットゲートが成功するまで繰り返す。レベル $L$  ( $L:2$ 以上の整数)の状態準備はレベル $(L-1)$ の符号化2量子ビットゲートを利用して行い、これらがすべて成功するまで繰り返す。(符号化2量子ビットゲートも失敗情報を伴い、確率的ゲートと見なせる。)

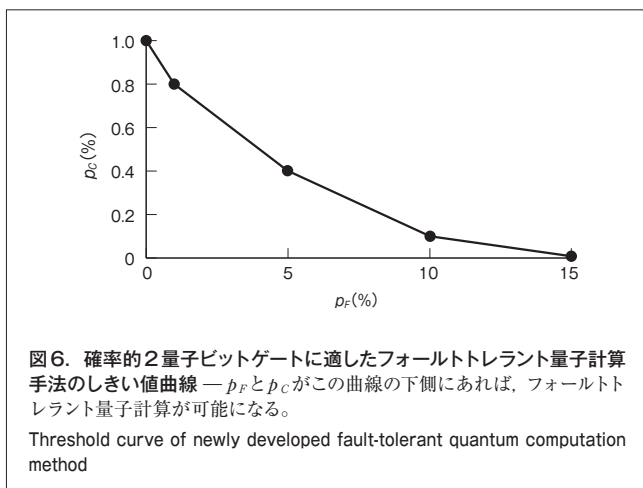
$|x\rangle$ を準備する際は、符号化2量子ビットゲートが最後に実行される二つの符号化量子ビットに対して誤り検出を行い、そこで誤りが検出されなくなるまで繰り返す。

以上の状態準備によって、ポストセレクションによる繰り返し回数を、ポストセレクションを行わない場合の数倍程度に抑えつつ、高いしきい値を実現した<sup>(5)</sup>。

### 4.4 性能評価

図3に示したように、確率的2量子ビットゲートは失敗確率 $p_F$ と条件付誤り確率 $p_C$ で特徴付けられる。よって、フォールトトレラント量子計算が可能になるための条件は、“しきい値曲線”と呼ばれる $p_F-p_C$ 平面上の曲線によって表せる。しきい値曲線よりも下の領域でフォールトトレラント量子計算が可能になる。

数値シミュレーションによって求めた、この手法のしきい値曲線を図6に示す。このしきい値曲線と、図2の確率的2量子ビットゲートの性能曲線を重ねてフォールトトレラント量子計



算の条件を求めたところ、失敗確率に対して10%以下、結合強度に対して $g > 50\sqrt{k\gamma}$ という条件が得られた。これらとともに、従来のしきい値の最高値1%を適用した場合に比べて約一桁改善している<sup>(8)</sup>。

## 5 あとがき

当社で研究開発中の量子コンピュータで成り立つ確率的2量子ビットゲートという誤りモデルに適したフォールトトレラント量子計算の手法を開発した。これにより、フォールトトレラント量子計算の条件は約一桁改善された。

量子誤り訂正とフォールトトレラント量子計算の研究分野はまだ始まったばかりであり、新しいアイデアが次々に出てきている。今後、更なるしきい値の向上と、それが量子コンピュータの早期実現に貢献することが期待される。

## 文献

- (1) Nielsen, M. A. ; Chuang, I. L. Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge University Press, 2000, 675p.
- (2) Aspuru-Guzik, A. et al. Simulated Quantum Computation of Molecular Energies. Science. **309**, 5741, 2005, p.1704 - 1707.
- (3) Giovannetti, V. et al. Quantum Private Queries. Physical Review Letters. **100**, 23, 2008, p.230502-1 - 230502-4.
- (4) 市村厚一. 周波数空間を利用した固体素子量子コンピュータ. 東芝レビュー. **57**, 9, 2002, p.38 - 41.
- (5) Goto, H. ; Ichimura, K. Fault-tolerant quantum computation with probabilistic two-qubit gates. Physical Review A. **80**, 4, 2009, p.040303-1 - 040303-4.
- (6) Knill, E. Quantum computing with realistically noisy devices. Nature. **434**, 2005, p.39 - 44.
- (7) Goto, H. ; Ichimura, K. Upper bound for the success probability of cavity-mediated adiabatic transfer in the presence of dissipation. Physical Review A. **77**, 1, 2008, p.013816-1 - 013816-5.
- (8) Goto, H. ; Ichimura, K. Condition for fault-tolerant quantum computation with a cavity-QED scheme. Physical Review A. **82**, 3, 2010, p.032311-1 - 032311-7.



後藤 隼人 GOTO Hayato, Ph.D.

研究開発センター フロンティアリサーチラボラトリー研究主務、博士(理学)。量子コンピュータの研究・開発に従事。日本物理学会、応用物理学会会員。  
Frontier Research Lab.



市村 厚一 ICHIMURA Kouichi, Ph.D.

研究開発センター フロンティアリサーチラボラトリー研究主幹、理博。量子コンピュータの研究・開発に従事。日本物理学会、応用物理学会会員。  
Frontier Research Lab.