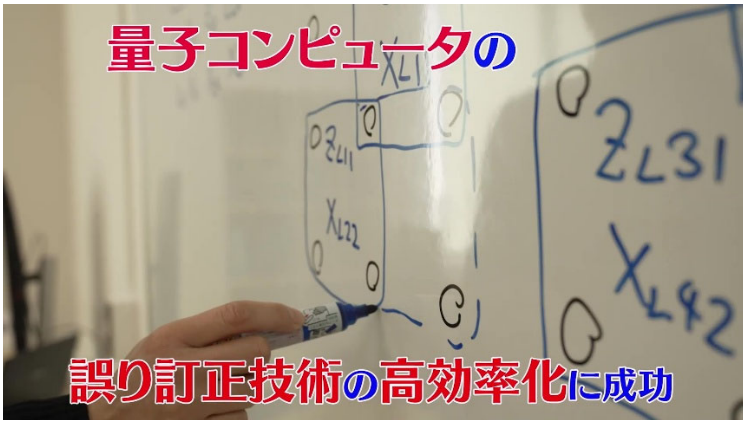
YouTube「理研チャンネル」

プレスリリース解説　vol.29

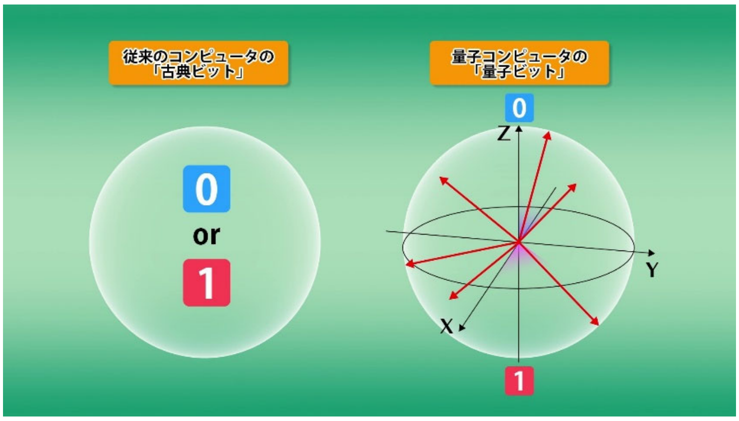
「量子コンピュータの誤り訂正技術の高効率化に成功」

https://youtu.be/2M0SbLsJMp8



(ナレーション)

理化学研究所の研究チームは、量子コンピュータの誤り訂正技術の高効率化に成功しました。この研究成果は、量子コンピュータの本質的な課題を解決し、「ハイパフォーマンス誤り耐性量子コンピュータ」の実現に貢献すると期待されます。

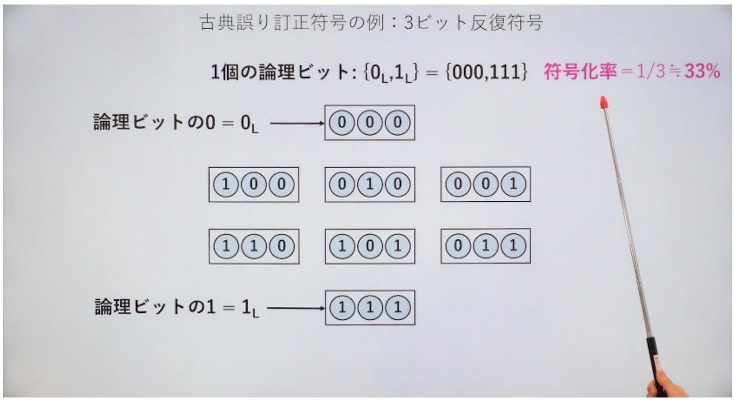


従来のコンピュータでは、情報の基本単位であるビットに０か１かを割り振ることで計算を進めています。それに対し、量子コンピュータの量子ビットでは、０でもあり、１でもあるという量子力学特有の重ね合わせ状態を一つの量子ビットに割り振ることができます。これにより従来のコンピュータでは解けない複雑な問題が高速で解けると言われています。

しかし量子の重ね合わせ状態は壊れやすいため、高い確率で計算中に誤りが生じます。そこで重要となるのが、誤り訂正技術です。

（研究者による解説）

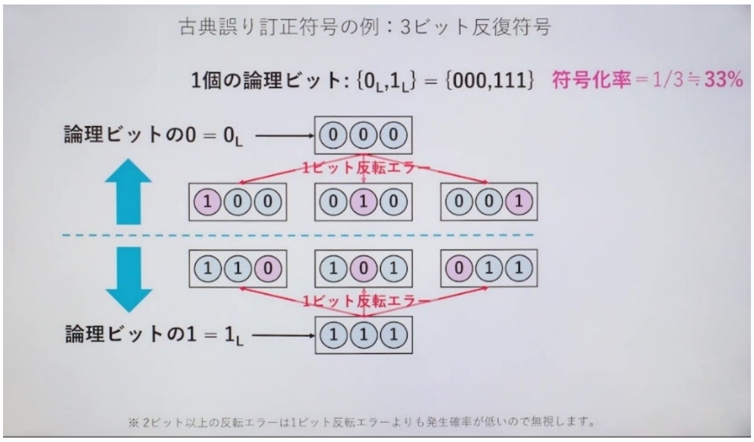
誤り訂正符号を説明するために、量子ではない普通の誤り訂正符号（古典誤り訂正符号）の最も簡単な例：3 ビットの反復符号を説明する。



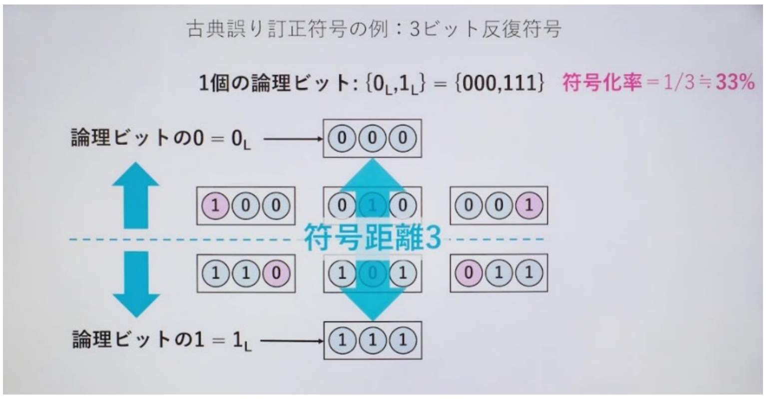
3 ビットは 000 から 111 までの全部で 8 通りの値を取る。

この符号によって守ることができる論理ビットを 000 と 111 で定義する。1 個の論理ビットを 3 個のビットで構成するため、符号化の効率を表す符号化率は 3 分の 1（約 33%）となる。この論理ビットを用いて計算を行う。

エラーがある場合、残りの 6 通りは、論理ビットに 1 ビット反転エラーが生じたものと見なす。



破線よりも上なら論理ビットは 0、下なら論理ビットは 1 とすることで、誤り訂正ができる。



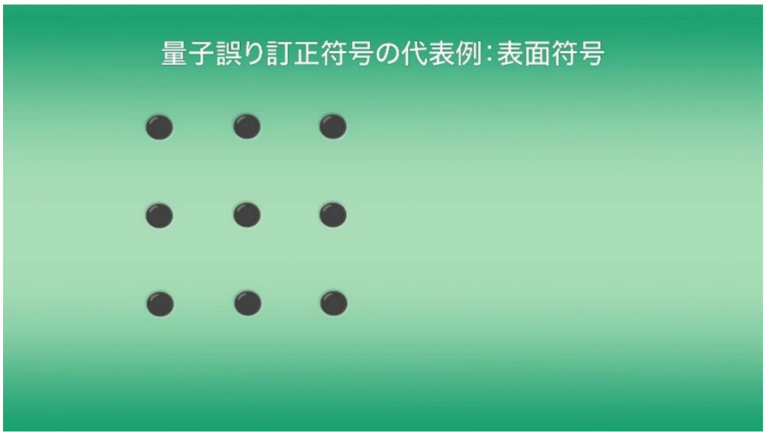
論理ビットの 000 を 111 にするには 3 個のビット反転が必要。これを「符号距離が 3 である」と言う。

図のように、符号距離の約半分のエラーまで訂正することができる。

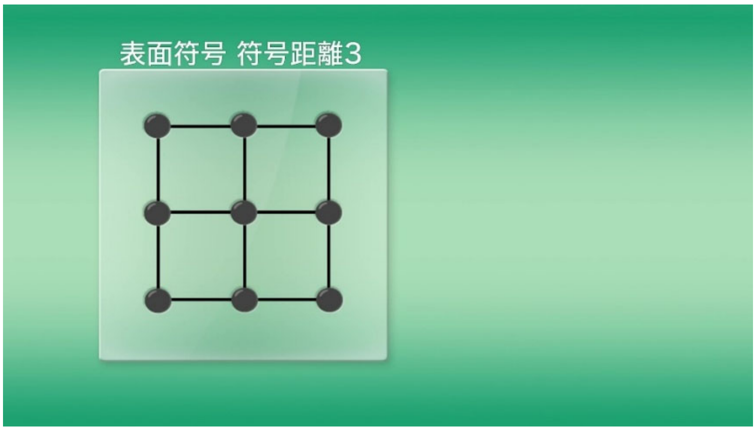
符号距離は誤り訂正の性能指標と考えることができる。

（ナレーション）

では、量子コンピュータの場合ではどうでしょうか？

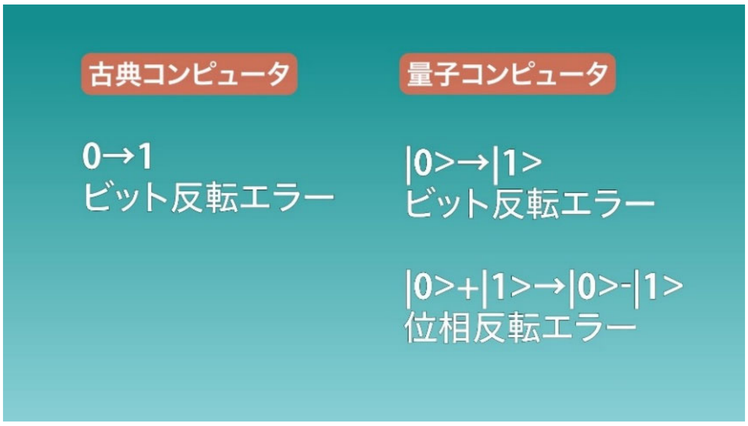


量子誤り訂正符号の代表例は 2 方向で展開する表面符号です。

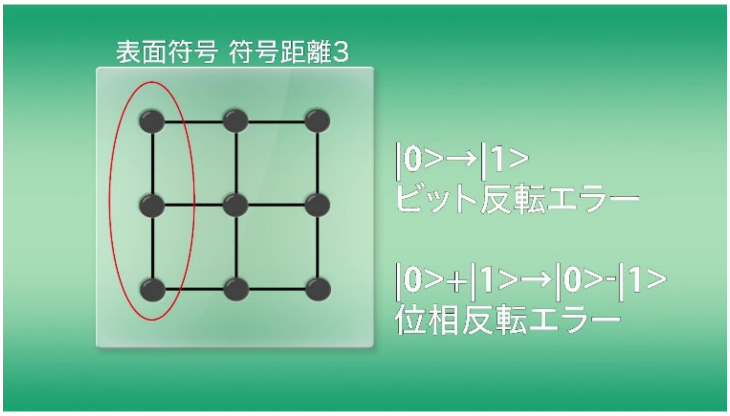


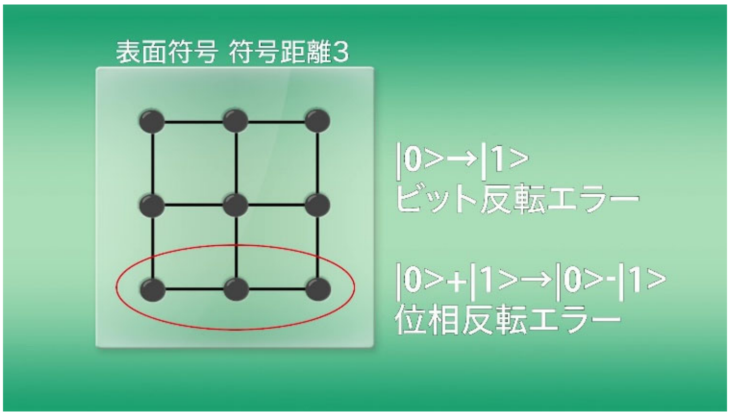
符号距離 3 の表面符号を考えてみましょう。

ここに縦横 3 個ずつ、合計 9 個の量子ビットがあり、これらが 1 つの論理量子ビットを形成します。



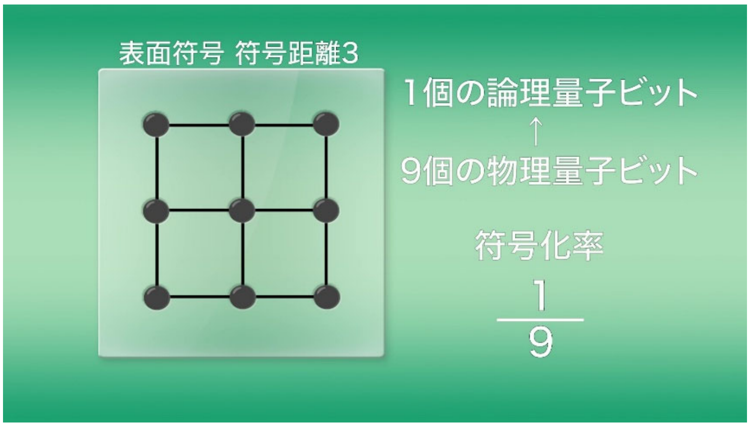
古典コンピュータでは、エラーはビット反転エラーの 1 種類しかありませんが、量子コンピュータではビット反転エラーと位相反転エラーの 2 種類があります。





表面符号では、縦 3 列がビット反転エラーに対する符号距離 3 を、横 3 列が位相反転エラーに対する符号距離 3 を実現するために必要です。

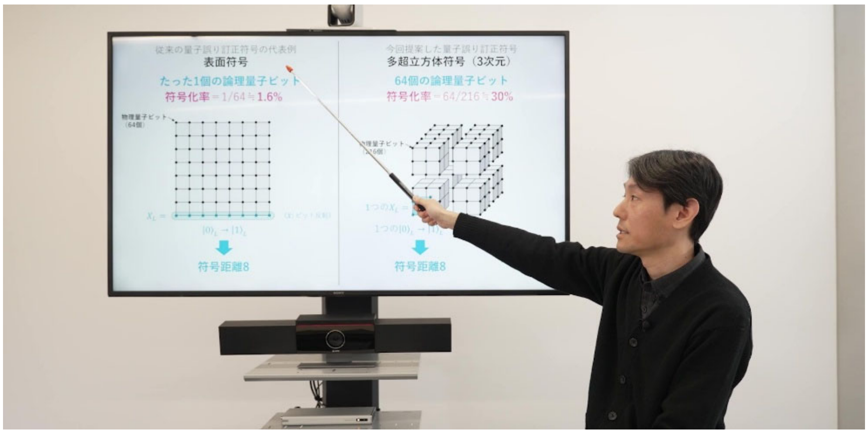
その結果、古典反復符号では符号距離３を実現するために３ビットしか必要なかったのに対し、量子符号である表面符号では３の２乗個、つまり、９個も量子ビットが必要となります。

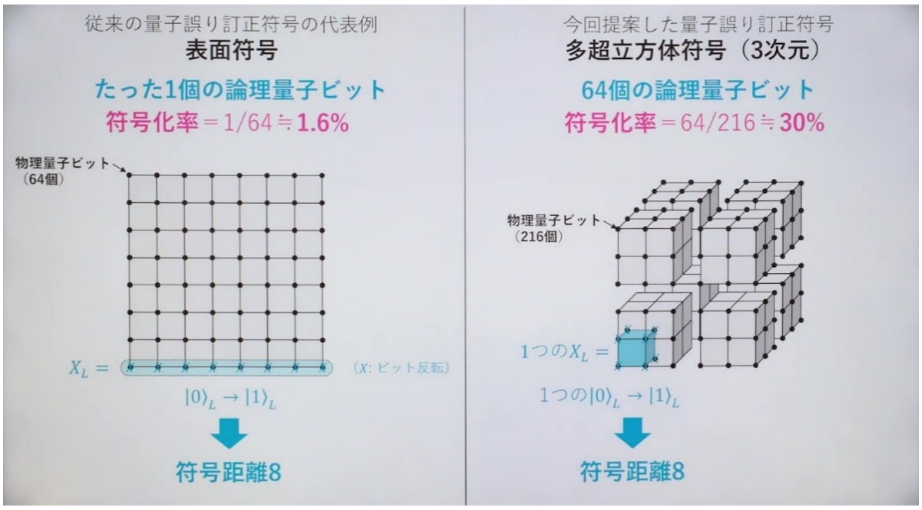


このように符号距離３の論理量子ビットを表面符号で考えたとき、符号化率は９分の１となります。符号化率を上げることが、量子誤り訂正の効率化、ひいては誤り耐性量子コンピュータの早期実現につながります。

（研究者による解説）

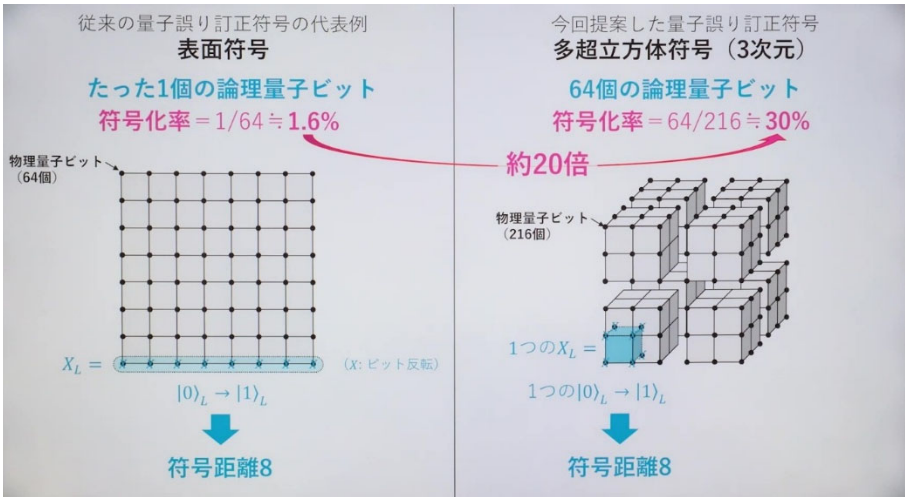
次に、従来の量子誤り訂正符号の代表例である表面符号と今回提案の多超立方体符号を比較する。



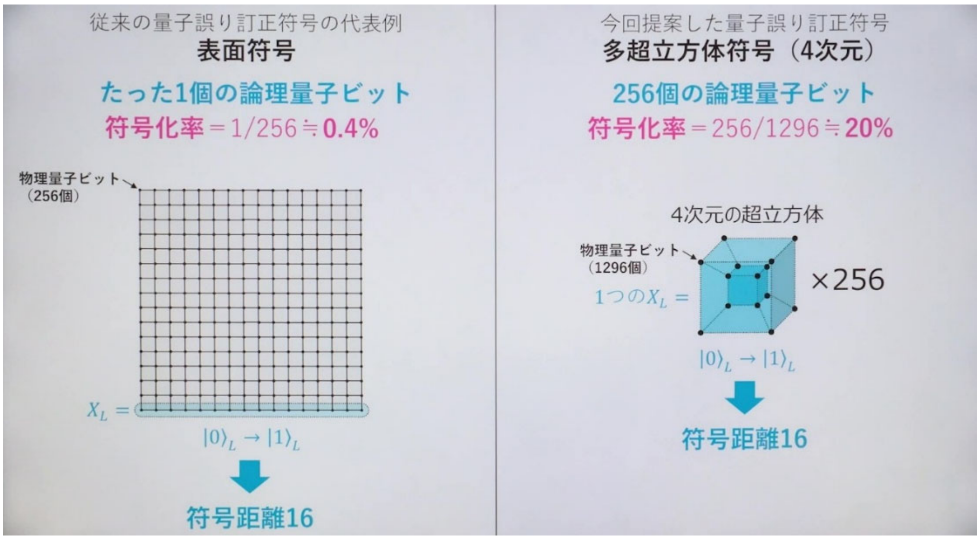


図はどちらも符号距離が 8 の場合。従来の表面符号は、たった 1 個の論理量子ビットを守るため符号距離の 2 乗に相当する 64 個の物理量子ビットが必要。符号化率は約 1.6%と非常に低くなる。

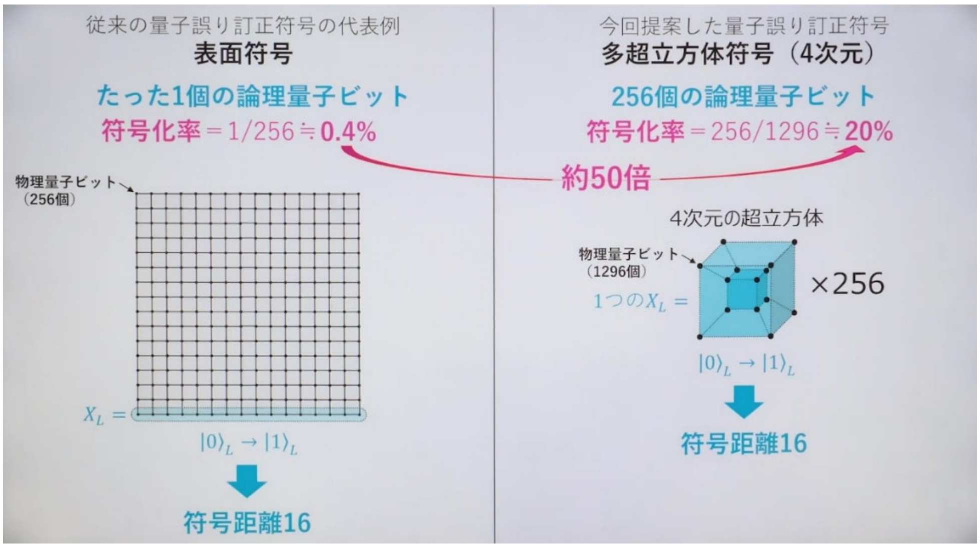
今回提案の符号では、 1 つの立方体が 1 つの論理量子ビットに対応し、4×4×4＝64 個の論理量子ビットを一度に守ることができる。



物理量子ビットは 63＝216 個、符号化率は約 30%。つまり、従来に比べて約 20 倍も効率的な符号である。

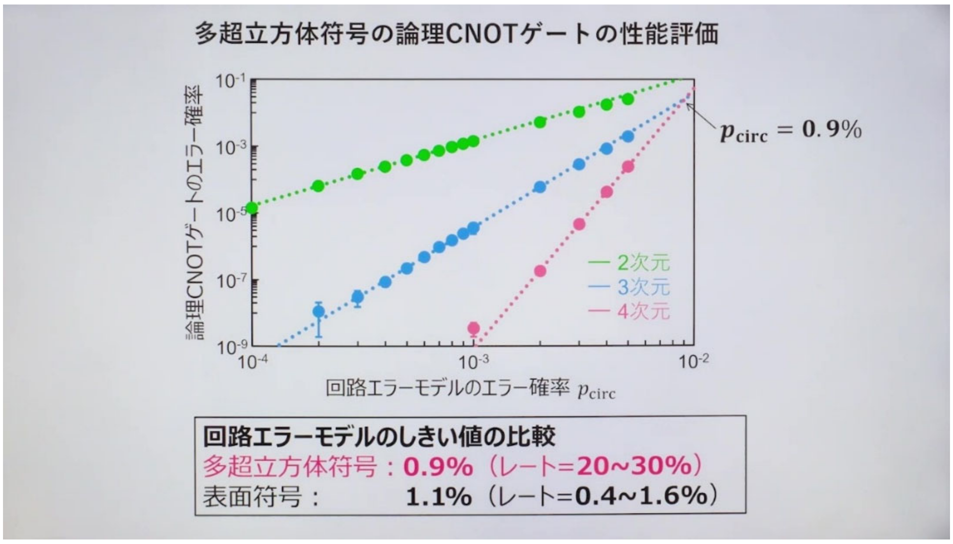


符号距離が 16 の場合、今回提案の符号では、1 個の論理量子ビットを 4 次元の超立方体で表現でき、符号化率は約 20%である。



一方、表面符号の符号化率は約 0.4%なので、約 50 倍も効率的。

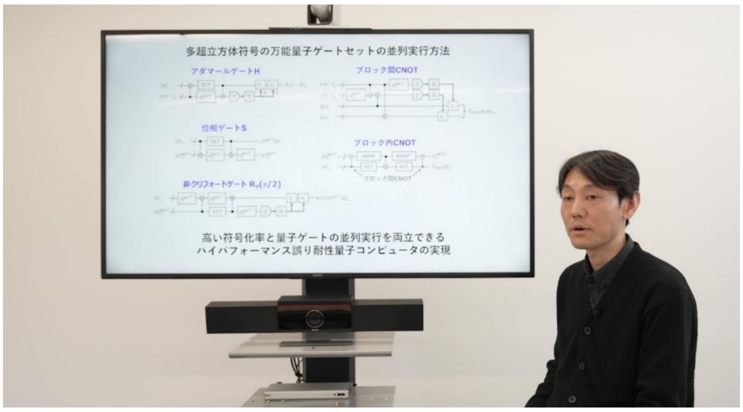
しかし、たくさんの論理量子ビットを詰め込むと、誤り訂正の性能が下がってしまう。



論理 CNOT ゲート（基本ゲート）の性能を数値シミュレーションで評価した。

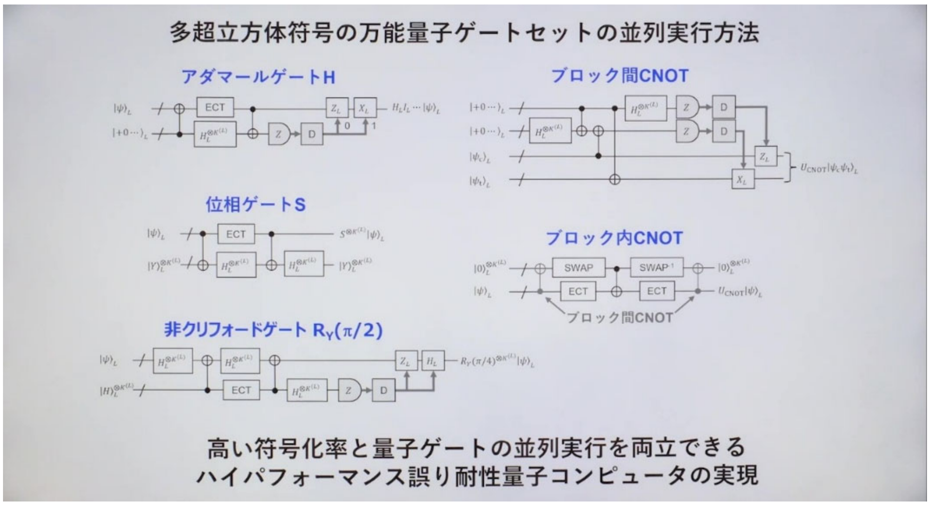
その結果、誤り訂正の有効に必要なエラー確率の上限値であるしきい値は約 0.9%と見積もられた。これは、従来の表面符号と同程度の値である。

今回提案の多超立方体符号は表面符号と同程度の性能を数十倍効率的に実現できる。



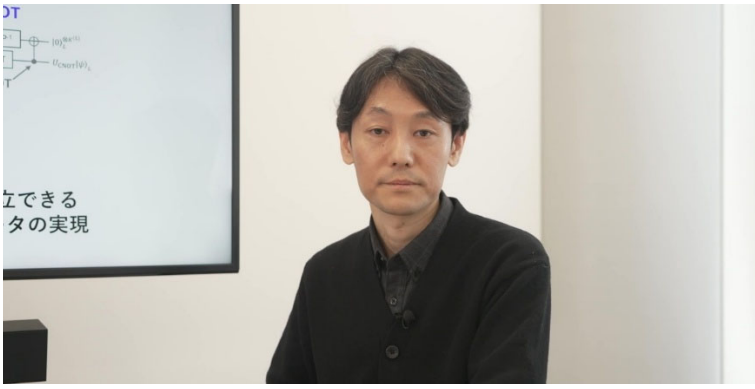
高い符号化率を持つ符号は構造が複雑で、複数の量子ゲート（量子コンピュータにおける基本操作）の同時実行は困難だった。

それに対し、多超立方体符号に対して万能量子ゲートセットを並列実行する方法も同時に提案した。



高い符号化率と量子ゲートの並列実行を両立できる、ハイパフォーマンス誤り耐性量子コンピュータが実現できる。

今後は新しい符号を実験的に実現することを目指すとともに、さらにこれを超えるようなアプローチを探していきたい。



終わり