

量子情報処理による新ムーアの法則 —量子ビット並列による高速化—

ERATO 今井量子計算機構プロジェクト / JST

今井 浩 *imai@qci.jst.go.jp*

東京大学情報理工学系コンピュータ科学専攻

松本 啓史 *keiji@qci.jst.go.jp*

富田 章久 *tomita@qci.jst.go.jp*

NEC 基礎研究所

量子コンピュータは、暗号セキュリティの諸問題をきわめて効率的に解けることが理論的に示されたことによって、次世代計算モデルとして期待されている。これらは、量子力学原理を情報処理に活用するものであるが、量子力学というところがとっつきにくかったりする。本稿では、そのようなある種の壁を乗り越えて、量子コンピュータ研究が今のコンピュータ科学の延長線上にもあることを簡明に解説することを試みる。

情報処理技術者は量子力学を学ぶべきか？

量子コンピュータには、大きな夢が持たれているが、一方でデジタル系の情報処理技術者にとって、ちょっととっつきにくいところがある。それは、動作原理が量子力学によることだ。一方、電子工学・物理系の素養を身につけた方は、たとえば大学学部で量子力学の講義をみっちり受けているわけだが、そういう人が量子コンピュータがすぐ分かるかということ、そういうわけでもない。

要は、量子力学の基礎の部分をもってきて、それによって情報を表現し、操作し、所望の情報を獲得することが量子コンピュータなのであり、そのための土台の部分というのは実は結構分かりやすい世界なのだ。本稿では、その世界を見ることを目指したい。より詳しい点については、最後にあげた解説^{2)~4)}等を参照されたい。

量子計算で何ができ、何ができないか？

量子計算は古典計算でできることは基本的にできる(量子力学に対してそれまでのものを古典力学というのにならう)。計算時間は、古典計算より遅いということではなく、ある種の問題に対してはきわめて高速なアルゴリズムが存在する。代表的な例は、Shorにより高速アルゴリズムが提案された離散対数、素因数分解を求める問題だ。これらの問題は近い将来のスパコンでも実用的時間内では解けないだろうと想定されており、現在のRSAや離散対数の公開鍵暗号の安全性はこの仮定に依存している。したがって、量子計算機の実現は、現在の社会基盤となったセキュリティシステムの崩壊をもたらすことになる。

Groverの量子探索と古典のアルゴリズムを組み合わせると、計算時間をその平方根に減らすことができる。

一方、量子計算でも古典計算でも、計算可能性については変わりが無い。量子計算が古典計算を凌駕する局面を理論的に明らかにすることは、量子計算量理論の現在最もホットな話題であり、研究が進んでいる。

1 量子ビットの世界：電子スピンを例に

現在のコンピュータの内部では、情報をすべて0と1で表現している。実際には、VLSI上で、0Vの電位が0を、2Vの電位が1をというように。そして、これまでのムーアの経験則で、1.5~2年でVLSIの集積度

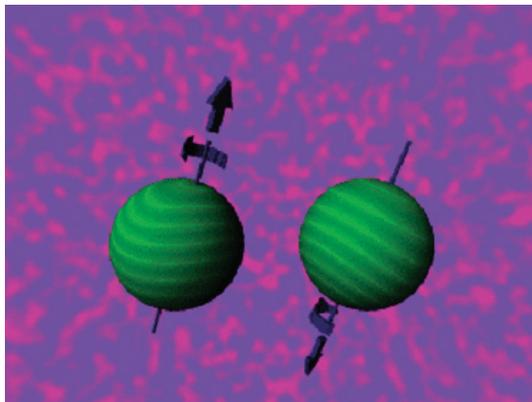


図-1 2つの電子スピン (斜めから見ている)
左が0, 右が1を表し, 全体で $01=|1\rangle$ を表す.

が2倍になり, それだけ性能向上が図られ, この倍々ゲームによってコンピュータは社会基盤の1つとなった.

しかし, このパラダイムも限界が見えてきている. 今のCMOS技術のままデザインルールを10nmからさらに小さくしていくと, オフ状態で電流が量子トンネル効果で漏れて電圧が動いたりし始める. 微小化が進むことによって, いよいよその世界を支配する物理原理が古典力学から量子力学の世界へと踏み込んでいくのである. この限界は, ずっと以前からコンピュータ設計研究者には分かっていたことで, だからこそ並列・分散コンピュータなどのさまざまな研究が追求されてきた.

ここまでは, 量子力学は便利だったムーアの経験則を壊す悪者であった. が, 視点を変えるとどうだろうか. コンピュータ内部の情報表現に立ち戻ると, 要は0と1が操作可能ななんらかの状態であればよいはずだ.

そのために, 電子や光といった量子力学の2準位系を活用できる. ここでは, 具体例として電子工学等で習う量子的なものの代表選手である電子スピンを考えよう. 電子は自転軸周りのスピんで, その方向をネジの進む向きとして, 北極への上向きスピスが0を表し, 南極への下向きスピスが1を表すと考えることができる. 図-1では, 左が0, 右が1を表す. これで0, 1という1bit (1古典ビット) を表現できる.

電子スピンはもっと自由度を有し, 水平向きのスピンは0と1を半々に重ね合わせた上で, さらに赤道上の経度に関する自由度も持っている. この電子スピンの表す状態を**1量子ビット** (1qubit; quantum bitの略)

という. これは電位で0と1を表していたのとは本質的に異なる. 電位では, 0Vと2Vの間の値が活用できたとしても0から2の1自由度しかないが, 1量子ビットではさらに経度に関する自由度がある.

今のコンピュータの内部では, 0と1は確定的に保持され, たとえばしきい値0.3Vを用いて, 0.3V未満の電位は0Vにして0, 0.3V以上の電位は2Vにして1とその段階でしきい操作でふれを確定的に直してしまい, 外からは正しく0, 1が保持されているように見せている.

しかし, 量子コンピュータの世界では, その中間の状態を保持して, しかもスピンの向きの経度に関する自由度までも活用する. これはアナログ計算である. これまでアナログとデジタルの両方式が競って, デジタルコンピュータが凌駕したのを見ている方にとっては, そんなアナログのものできるわけじゃないと思われるであろう. 実際, これはShorが量子コンピュータなら素因数分解を高速に行える理論的ブレークスルーの結果を提示した際に, 物理系の研究者から出た指摘そのものであった. これに対して, Shorらはデジタル版量子コンピュータのパラダイムを提示して, それ以降, 量子コンピュータ研究が急激に進められてきた.

デジタル版については後章で詳述するとして, 当面アナログ版で話を進めよう. 量子状態では複数の状態を重ね合わせること(量子重ね合わせ)ができ, 量子力学ではその重みを複素数で与えることができる. 0と1を同じ重みで重ねると, 赤道上経度0度の方向を向いたスピンとなる. このスピンの状態と, 赤道上経度180度の方向を向いたスピンの状態を, 再び等重で重ねると, 通常のセッティングで0を表す北極を向く電子スピンとなる. 一方, この赤道上の反対向きの状態を, 同じ絶対値の符号が逆の重みで重ね合わせると, 今度は1を表す南極を向く電子スピンとなる. 実際には, 量子コンピュータの中では, このような足し算の操作をするのではなく, スピンの向きを回転させる操作を第1の基本操作とする.

複数量子ビットの世界

n 個の電子スピンが表す量子状態が, n 量子ビットである. が, ここで1量子ビットではなかった構造が入ってくる. 2量子ビットの場合を見ていこう. 2つの電子スピンでそれぞれが上下を向いている場合, 表現

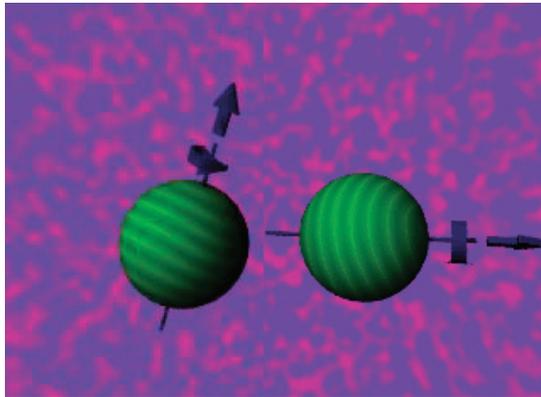


図-2 分離可能な2量子ビットを表す電子スピン
左が↑, 右が $(\frac{1+\downarrow}{\sqrt{2}})$, 2つで $\frac{1}{\sqrt{2}}(\uparrow\downarrow+\downarrow\uparrow)$ を表す.

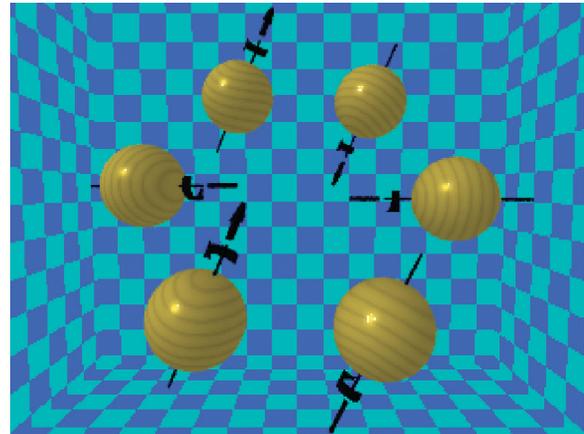


図-3 分離可能な6量子ビットを表す電子スピン
上段左のスピンの向きから時計回りで $\uparrow\downarrow, (\frac{1-\downarrow}{\sqrt{2}})\uparrow(\frac{1+\downarrow}{\sqrt{2}})=\frac{1}{2}(\uparrow\downarrow\uparrow\uparrow+\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow-\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow-\uparrow\downarrow\uparrow\uparrow)$ を表す.

できるのは00, 01, 10, 11の4種である. もちろん, 2量子ビットでもスピンの向きが上下以外を向いているものを許す. また, 任意の量子状態は適当な重みで重ね合わせできるのであった. このとき, 00と11を表す状態を等重で重ね合わせると, そのときの状態 s_1 の2つの電子スピンはどうなっているだろうか? 1量子ビットの0と1を等重で重ねた場合は, 赤道上経度0度を向いたスピンが対応していたが, 今の2量子ビットの場合でそのようなスピン2つの状態になっているだろうか? 答えは否である. 赤道上経度0度のスピン2つが表す状態は, 00, 01, 10, 11の4状態を等重で重ね合わせた状態 s_2 となっている. 実は, もはやこのように2つのスピンを独立に扱っている限りは今表現しようとしている状態 s_1 は表せない. n 個の電子スピンの独立な向きで表せる状態を, 分離可能状態と呼び, それで表せない状態をもつれたということでエンタングル状態 (entangled state) と呼ぶ.

一般の2量子ビットは, 00, 01, 10, 11に対応して $\uparrow\uparrow, \uparrow\downarrow, \downarrow\uparrow, \downarrow\downarrow$ の4パターンの2電子スピンの向きで表せ, それを4つの複素数の重みで重ね合わせたものとなる.

$$\alpha_{00}\uparrow\uparrow+\alpha_{01}\uparrow\downarrow+\alpha_{10}\downarrow\uparrow+\alpha_{11}\downarrow\downarrow \quad (1)$$

これは $(\alpha_{00}, \alpha_{01}, \alpha_{10}, \alpha_{11})$ という複素 $4=2^2$ 次元ベクトルと同一視できる. これまでのスピンの説明では向きのみで長さを無視してきたが, 量子力学ではこのベクトルは必ず長さ1という正規化条件がつく. $(1, 0, 0, 0)$ は $00=\uparrow\uparrow$ を, $(1, 1, 0, 0)/\sqrt{2}$ は図-2の状態を, そして $(1, 1, 1, 1)/2$ は状態 s_2 を表す. 状態 s_1 は $(1, 0, 0, 1)/\sqrt{2}$ であり, これのみエンタングル状態である.

n 量子ビットでは, $00\cdots 0$ から $11\cdots 1$ の 2^n 個のビッ

ト列パターンに対応して1つ複素数が対応する. そのパターンを2進数としてみたとき, 0から 2^n-1 の数に対応し, i 番目のパターンに対応する複素数を α_i で表す. このとき, n 量子ビットは 2^n 次元の長さ1の複素ベクトル $(\alpha_0, \dots, \alpha_{2^n-1})$ となる. 図-3は分離可能な6量子ビット状態である.

量子計算過程と読み出し

量子計算とは, n 量子ビットを内部の情報表現として, それに万能ゲートに対応する $2^n \times 2^n$ のユニタリ行列をかけて所望の状態に変換し, 最後に量子読み出しによって情報を得ることである. どうしてユニタリ行列であるかということ, n 量子ビットは 2^n 次元の単位複素ベクトルであり, 任意の単位複素ベクトルを別の単位複素ベクトルに変換する行列は, ユニタリ行列以外あり得ないからだ. ユニタリ行列は正則であるから, 可逆である.

現在のコンピュータでは, AND, OR, NOTといった単位演算で, それを組み合わせると任意の論理回路を組めるもの(万能ゲートという)で計算する. このとき, 単位演算を適用する回数が計算時間である. 量子コンピュータでは単位演算となるユニタリ行列があって, その単位演算を適用する回数が計算時間となる. 単位演算は, それらを組み合わせて任意のユニタリ行列をいくらか精度よく近似できるように選ぶ. 量子計算の代表的万能ゲートとして次のものがある.

- 1量子ビットに対する任意の 2×2 ユニタリ行列
- 2量子ビットに対し次の変換を行う量子ゲート

$\uparrow\uparrow\rightarrow\uparrow\uparrow, \uparrow\downarrow\rightarrow\uparrow\downarrow, \downarrow\uparrow\rightarrow\downarrow\uparrow, \downarrow\downarrow\rightarrow\downarrow\downarrow$

(左が上向きなら右もそのまま, 左が下向きなら右を反転するので, 制御 **NOT (C-NOT)** と呼ぶ.)

量子計算でよく使う 2×2 ユニタリ行列が **Hadamard**

行列 $H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$ である. これを \uparrow の 1 量子ビット

に作用させると, 前節の一般論より $\uparrow = (1, 0)$, $\downarrow = (0, 1)$ で, H に $(1, 0)$ の転置を右からかけると $(1, 1)/\sqrt{2}$ の転置, すなわち赤道線上経度 0 を向くスピン $\frac{1+\uparrow}{\sqrt{2}}$ に変換される. 今一度この状態に Hadamard 行列をかけると, H^2 が単位行列であることから, 再び初期の状態 \uparrow に戻る. $\uparrow\uparrow$ なる 2 量子ビットに対して, 左のスピンに Hadamard 行列をかけて $(\frac{1+\uparrow}{\sqrt{2}})\uparrow$ に変換し, この状態に C-NOT をかけると前述のエンタングルド状態 s_1 が得られる.

量子回路での計算は, 次のように進む. 最初, n 量子ビット列は初期化されていて, たとえば $\uparrow\uparrow\dots\uparrow$ のようになっている. ここに, 上で定義した量子ゲートを次々と掛けて計算を進める. 最後に出力された量子ビット列であるが, これは量子状態であるから, 何らかの観測を施さないと, 情報として認識されない. そこで, 最後に出力のための量子ビットを対象に観測を行う. たとえば, (1) 式の 2 量子ビットに観測を行うと, 確率 $|\alpha_{00}|^2$ で 00 が, $|\alpha_{11}|^2$ で 11 が, それぞれ観測される. 一般に, n 量子ビットの $(\alpha_0, \dots, \alpha_{2^n-1})$ に対してこの観測を行うと, 確率 $|\alpha_i|^2$ で i が観測される. この観測の結果をもって, 計算の出力と見なす. 量子計算の過程は, 電子スピンの場合, そこに存在するスピンの磁場をかけ回転等の操作をするので, 古典計算でチップ上の回路を情報が流れていくのとはイメージが違う. どの操作をどこのスピンにどの順に適用するかを選ぶことが, 量子コンピュータでの原始的なプログラムとなる.

量子計算はなぜ速いか—量子重ね合わせの威力

量子計算は, ある種の計算について古典計算量を劇的に改善する. そのからくりは量子重ね合わせ状態にある. これを見ていこう. $0 = \uparrow$ に Hadamard 行列をかけると, $\frac{1+\uparrow}{\sqrt{2}}$ の状態になるのであった. したがって, $00\dots 0 = \uparrow\uparrow\dots\uparrow$ の n 量子ビットの各量子ビットに対して Hadamard 行列をかけると,

$$\overbrace{\frac{1+\uparrow}{\sqrt{2}} \dots \frac{1+\uparrow}{\sqrt{2}}}^n = \frac{1}{2^{n/2}} \left[\overbrace{(\uparrow\dots\uparrow) + \dots + (\downarrow\dots\downarrow)}^{2^n} \right]$$

となる (高校で習う 2 項定理の展開と同様である). これは, $00\dots 0$ から $11\dots 1$ の 2^n 個の n ビット列パターンすべてを等重で重ね合わせた状態で, これが n 回の Hadamard 行列をかけただけで得られている.

この状態で観測を行うと, 2^n の n ビット列のどれかが $1/2^n$ の等確率で得られる. なんだそんなこと, 古典計算でも, n bit の乱数列を使えば $O(n)$ 時間で簡単にできるじゃないかと思われるだろう. 確かにその通りで, ここで観測しては量子計算のすごさは分からない.

量子計算のすごいところは, この重ね合わせ状態をまとめて操作していけることだ. f を n ビット列を入力に対して m ビットの整数値を返す関数とする. f の引数は, ビット列を 2 進数と見なすと $0, \dots, 2^n-1$ の数であり, f の値を量子状態で表すと m 個の電子スピンの上下で表せ, f の計算を上量子重ね合わせ状態で行うと,

$$\frac{1}{2^{n/2}} [(\uparrow\dots\uparrow)f(0) + (\uparrow\dots\uparrow\downarrow)f(1) + \dots + (\downarrow\dots\downarrow\uparrow)f(2^n-2) + (\downarrow\dots\downarrow)f(2^n-1)]$$

となる ($f(0)$ の値が 0 なら上式で $f(0) = \overbrace{\uparrow\dots\uparrow}^m$). この状態では, $f(x)$ が任意の x について計算されている. 量子計算では n 回 Hadamard 行列をかけるのと量子計算で f を一度計算するだけなのに対し, 古典計算でこれと同じことをしようとする 2^n 時間が必ずかかる.

どんな計算でも量子計算で指数的加速できるかというと, さすがにそれは無理だ. $f(x)$ が各 x について計算されているが, 量子状態は個々の $f(x)$ を重ね合わせたもので, それから各 $f(x)$ の情報を効率的に引き出すことは一般にはできない.

しかし, $f(x)$ が周期関数であった場合, 実はその周期を観測する方法がある (**Simon のアルゴリズム**). しかも, これこそが Shor の高速素因数分解法の中核なのだ. 最も簡単な場合で, $f(x) = f(0)$ と定数関数の場合, すなわち $f(x)$ の周期が 1 の場合を見てみよう. このとき, 上の計算した量子状態の最初の n 量子ビットに今一度 Hadamard 変換をかけると, f の値は和の外にくくりだせ, $H^2 = I$ であるので, 状態は $\uparrow\dots\uparrow f(0)$ と, 周期 1 に対応して唯一の状態になる. 周期が T の場合, f の T 個の異なる値 $f(0), \dots, f(T-1)$ ごとにくくり出して f を量子状態で表現している後半部分を見ると, T 個の状態がほぼ等重で重ね合わせられた状態になる. この状態から周期に関する情報を引き出すのは, 離散フーリ

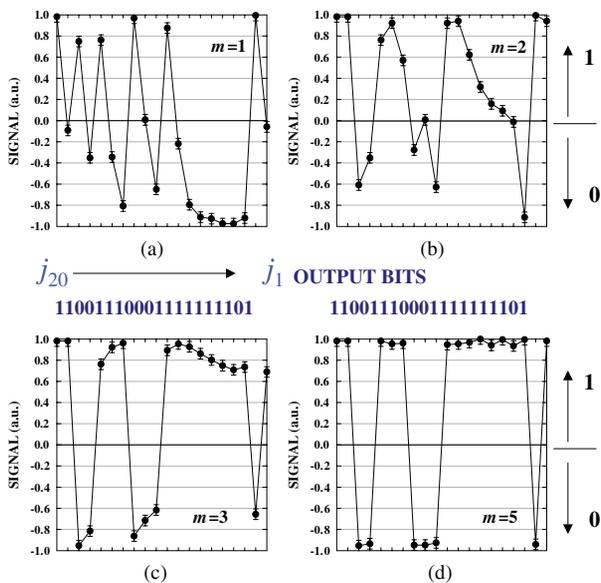


図-4 Shorの素因数分解アルゴリズムの後半部を実現⁶⁾した際に現れるデジタル性

光ファイバー回路で20bitのフーリエ変換を近似した際、近似度合いで1, 2段目では0のところをしきい値としても安定した正確な値が得られていないが、3段目以降は十分正確な0, 1の結果が得られてエラーなしとなっている。

エ変換を用いればよい。

量子計算は複数入力の関数値を同時に計算できるが、あくまで重ね合わせたものとしてしかできないので、個々の情報を引き出すのに一工夫必要で、そこに量子アルゴリズム設計の難しさがある。

さまざまな量子アルゴリズム

あまり有名でないもの・理論的過ぎるものまで含めると、実はかなりの数の(古典アルゴリズムを凌駕する)量子アルゴリズムがすでに提案されている。しかし、それらは大体2つの系統に分けられる。1つは、上述のSimonのアルゴリズムから派生したもので有名なShorの素因数分解・離散対数アルゴリズムはこちらの系統に属する。この系統のものは、多くの場合、指数的な加速が可能になる。ポイントは、適切な変換で入力の重ね合わせを作る部分と、関数の出力の重ね合わせから、問題を解くのに必要な情報を引き出す部分である。概ね、問題を関数の周期を見つける問題に落とすことが多い。たとえば、Shorのアルゴリズムでは、素因数分解を r についての整数方程式 $x^r \equiv 1 \pmod{N}$ に帰着させ、Hadamard変換の代わりに離散フーリエ変換を用いて重ね合わせを作る。

今1つの系統は、Groverの量子探索アルゴリズムを既存の古典アルゴリズムの加速ユニットとして用いるもので、元の時間の平方根の時間に加速する。この加速はSimon型のアルゴリズムに比べると見劣りがする。しかし、指数時間アルゴリズムの指数が半分になるのは相当のスピードアップであり、また、このアルゴリズムがデータ構造をまったく仮定しない探索アルゴリズムであるため、きわめて広い問題に対して適応可能なことが重要である。

今後、この2系統のアルゴリズムのみ量産していくのでは早晚行き詰まることは明らかだ。第3の系統を求めて量子ランダムウォークなどさまざまな試みがなされている。

量子計算：デジタル vs. アナログ

量子デバイス開発による量子コンピュータ実現については他に譲り、ここでは実現に必須のデジタル化技術を述べる。デジタル計算のアナログ計算への優越性をご存じの方々は、量子計算で0と1の中間の状態を、しかもスピンの方向性の自由度でもっていることは、とても安定した計算ができないのではと危惧を持たれるようだ。それに対する対処法は次のようになる。

まず、観測結果は完全にデジタルである。VLSIの電位がしきい値で0, 1が判別されてるように、観測でしきい操作が正確に行えればよい。このデジタル性は、最近Tomita⁶⁾により光ファイバーで実現されたShorのアルゴリズムの後半部分の実験結果でも示されている(図-4)。

次に、量子ビットでアナログ版では複素数をそのまま使ってきたが、これも有限個の複素数に制限しても量子計算時間のオーダーが変わらない。具体的には、 T ステップの量子計算を行うには、 $O(\log T)$ ビットのデジタル表現を用いればよいことが示されている。また、万能ゲートとして1量子ビットに対する任意の 2×2 ユニタリ行列をあげたが、それは無数にある。実際には、3つの行列を万能ゲートとして用意すれば、任意の 2×2 行列が近似でき、万能ゲートはC-NOTも加え4ゲートで済む。

最後に、量子状態は非常に脆く壊れやすい点が問題である。昔のコンピュータでも計算素子が壊れやすかった時代もあり、それを克服して安定して動作するコンピュータが作られてきた。量子コンピュータの場合、

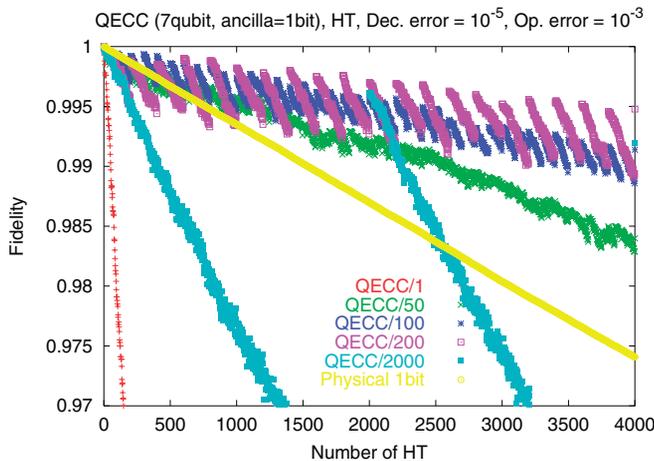


図-5 デコヒーレンス・操作エラーに対する量子誤り訂正方式評価シミュレーション⁵⁾

1量子ビットに対する7量子ビット誤り訂正方式で、訂正適用回数をパラメタ(1,50,100,200,2000)として単に減衰する状態(黄色)より誤り訂正可能であることを示す結果(縦軸は忠実度で1に近いほどよい)。横軸は Hadamard 変換適用回数。

量子状態が外界と作用して変化するデコヒーレンスがやっかいである。量子状態を必要な時間保持する技術(その時間をデコヒーレンス時間という)はまだ確立されていない^{☆1}。

この問題点に対する答えが、量子誤り訂正方式である。誤り訂正というと、現コンピュータではパリティチェックのレベルで使われているが、歴史は再びで、量子コンピュータのような黎明期のコンピュータでは、新素子である量子デバイスのデコヒーレンス時間の短さから、コンピュータでの誤り訂正が肝要となるのである。

さらに、スピンの自由度を上のようにデジタル化したとしても、今のコンピュータの0と1だけの世界ではないので、誤り訂正方式として新しいものが必要である。Shorらによって構築された量子誤り訂正符号の理論では、面白いことに、連続な量である量子状態のようなものを制御するのに、古典に類似した有限体上の線形符号が本質的な役割を果たす。

Shannonの通信理論では、通信路符号化定理によって、誤りがある通信路で誤りを限りなく小さくするにはどれだけの冗長度が最小限必要かという通信路容量を与え、それと表裏一体で、符号理論においてその容量を達成する符号が開発されてきた。一方、量子コ

☆1 ごく最近の新聞発表で、集積化が期待されている固体でデコヒーレンス時間0.5秒が実現されたというニュースもある。

☆2 <http://www.qci.jst.go.jp/>

ンピュータの場合、量子状態を誤りのあり得る素子を通して操作する中での量子通信容量の評価が必要である。この容量は、量子容量と呼ばれる。量子容量の下限は古典の2元対称通信路に対応するような限定された場合のみ知られていたが、Hamada¹⁾が一般の場合をほぼ包括する量子容量の強力な下限を示している。さらに、現在のコンピュータ能力をフルに活用して、理論だけでは解決が難しい複雑なデコヒーレンスや、量子ゲートに内在する操作エラーに対処するための並列シミュレータで量子誤り訂正符号の比較がなされている(図-5)。

量子ムーアの法則と量子ソフト開発へ

量子コンピュータは、量子重ね合わせにより新しい並列性を実現する。ムーアの経験則の倍々ゲームの側面は、量子計算においては量子ビットを1つ増やすと、量子並列度は2倍になるという倍々ゲームで現れる。量子計算の真髄は、並列度が資源量(たとえば電子スピン数)に対して指数爆発する新しい計算モデルであることなのだ。

また、ハードのデバイス改良のムーアの法則だけでなく、量子ソフトウェアの面での研究の飛躍的進展が必須である。量子コンピュータを作るためには、ナノテクノロジーを駆使したデバイス研究が不可欠であることは確かであるが、前章で述べたような量子誤り訂正回路の研究などは量子ソフトウェアの最たるものであると言え、著者らが推進しているプロジェクト^{☆2}では、光を軸にした量子計算ハードウェアの研究から量子ソフトウェアの研究までの研究において重点テーマとなっている。

参考文献

- 1) Hamada, M.: Lower Bounds on the Quantum Capacity and Highest Error Exponent of General Memoryless Channels, IEEE Trans. Information Theory, Vol.48, No.9, pp.2547-2557 (2002).
- 2) 林 正人, 松本啓史: 量子系における統計的推測の最近の展開, 応用数理, Vol.11, No.3, pp.27-48 (2001).
- 3) 今井 浩他: 量子情報処理パラダイム(連載講座), オペレーションズ・リサーチ, Vol.47, Nos.4-8, pp.251-256, pp.322-327, pp.393-397, pp.453-458, pp.523-528 (2002).
- 4) 長岡浩司他: 小特集「量子情報科学-新しい情報処理パラダイム」, 信学会誌, Vol.85, No.8, pp.575-625 (2002).
- 5) Niwa, J. and Matsumoto, K.: Simulating the Effects of Quantum Error Correction Schemes, ERATO Workshop on Quantum Information Science (EQIS '02), Tokyo (Sep. 2002).
- 6) Tomita, A.: Quantum Information Processing with Fiber Optics (invited talk), ERATO Workshop on Quantum Information Science (EQIS '02), Tokyo (Sep. 2002).

(平成14年9月29日受付)