量子コンピュータのプログラミング教育に向けて（Ⅱ）

量子コンピュータのプログラミング教育に向けて（Ⅱ）

Toward Programming Education for Quantum Computers (II)

村　田　嘉　弘
MURATA, Yoshihiro

１．新たな戦略

前論文「量子コンピュータのプログラミング教育に向けて（Ⅰ）」（［村田２］）が公開された４か月後の令和５年４月14日に、量子未来社会を実現するための新たな戦略「量子未来産業創出戦略」（［内閣府５］［内閣府６］）が発表された。

この新たな戦略の中では、令和２年発表の「量子技術イノベーション戦略」（［内閣府１］［内閣府２］）を量子技術の研究開発戦略、令和４年発表の「量子未来社会ビジョン」（［内閣府３］［内閣府４］）を社会変革に向けた戦略（未来ビジョン、目標等）、今回の新たな戦略を量子技術の実用化・産業化戦略と位置づけた（［内閣府６］ｐ２）。この３戦略が揃うことにより、研究（研究機関・研究者）、産業（量子未来社会実現のためのパートナーでもある量子技術のユーザ）、ビジョン（実現すべき未来の姿）の関係がより明確になった。特に前論文で検討不足ではないかとして指摘した「量子技術の利用者」の部分が明らかになってきたことは大きい。量子技術の利用者（ユーザ）であり、量子技術を活用した製品・サービス開発のパートナーである産業界に十分な配慮をした戦略が立てられたことで、ビジョンの実現可能性がより一層高まるものと思われる。

本論文は、量子技術活用の中心である量子コンピュータにおいて、主要ユーザとなるはずのITエンジニア、中でも文系出身のITエンジニアが、量子コンピュータのプログラミングを学び、精力的にアプリケーション開発を行えるようになるためのプログラミング教育とはどのようなものであるかについて考察したものである。前論文での考察を受け、量子力学・量子情報理論から始め、NISQコンピュータでのプログラミング教育について述べることとする。

そのために本稿は以下のように構成されている。

1．新たな戦略
2．量子力学と量子情報理論
3．量子ビット・量子ゲート・測定
4．量子コンピュータの構造
5．量子計算と量子プログラミング、量子アルゴリズム
6．量子プログラミング教育

キーワード：量子力学、量子情報、量子コンピュータ、量子プログラミング教育
Keywords　：quantum mechanics, quantum information, quantum computer, education of quantum programming

表１　量子力学史

時代区分	主な出来事
前期量子論	1900年　Max Planckが量子仮説（振動数 ν の電磁波の放射吸収に際してはエネルギーは $h\nu$ の自然数倍になる）を発表。 1905年　Albert Einsteinが光量子説（光電効果を光子により説明）を唱える。この業績により1921年ノーベル物理学賞を受賞。 1913年　Niels H.D.Bohrが量子論を原子に適用し始めた。
量子力学完成期	1922年　O.Stern, W.Gerlachの実験。電子にスピンがあることを示す実験として評価されている。 1923年　Louis V. de Broglieが物質波の考え方を提唱。 1924年～1925年　Louis V. de Broglieが波動力学を提唱。 1925年　W. Heisenbergが行列力学を発表。 1926年　Erwin SchrödingerがSchrödinger方程式を提唱し波動力学を完成。 1927年　W. Heisenbergが不確定性原理を発表。 1932年　John von Neumannが『量子力学の数学的基礎』で、数学的に厳密な定式化により波動力学・行列力学を統一した。
完成期以降 （素粒子論関係は省く）	1929年　W. Heisenbergが場の量子論を建設開始。 1935年　A.Einstein, B.Podolsky, N.Rosenが局所実在論の立場から量子力学の不完全さを指摘（EPRパラドクス）。量子もつれ状態にある量子同士に局所的な隠れた変数が存在するか否かの問題となる。 1950年頃　朝永振一郎, J.Schwinger, R.P.Feynman, F.J.Dysonらにより量子電磁力学が完成。 1964年　J.S.BellがBellの不等式を導出。局所的な隠れた変数の問題を実験的に解決する方法を示す。 1972年　J.F.Clauser, S.J.FreedmanがBell不等式の破れを示す最初の実験を行った。 1982年　A. Aspect, P.Grangier, G.RogerがBell不等式の破れによりEPRパラドックスを否定。量子もつれ（量子エンタングルメント）を利用する方向へのパラダイムシフトが起きる。 1997年　A.Zeilingerのグループがある条件下での量子テレポテーション実験を成功させた。なお、量子テレポテーションとは量子もつれの関係にある２粒子を利用した量子状態の転送のことである。

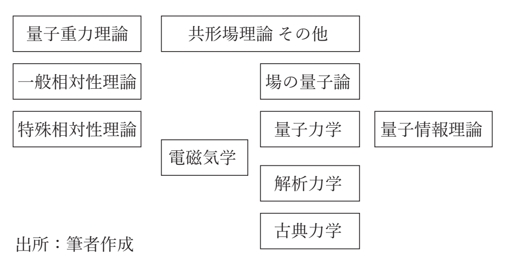
出所：［小出］［堀田］［清水］［宮野］［横山］［Nielsen２］より筆者作成

２．量子力学と量子情報理論

古典物理学で説明できない現象を説明するために量子力学が建設され始めたのは表１のように20世紀初頭からである。

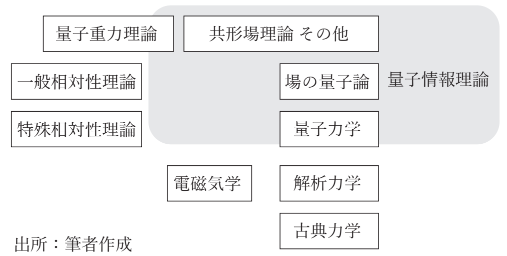
量子コンピュータ、量子通信を現実的なものとして考え始める契機となったのは**表１**の最後から２つ目に書いたアスペ（A.Aspect）による実験結果であったようである。長年の問題であったEPRパラドックスの解決とともに、量子同士が強い相関関係で結ばれる量子もつれ（量子エンタングルメント）が自然界の持つ本質的性質であることが分かり、むしろこれを積極的に活用していこうというパラダイムシフトが起きた。1997年の量子テレポテーション実験はまさにその方向での成果であった。

量子コンピュータ研究のスタートアップである株式会社QunaSysが提供する自学習サイト「Quantum Native Dojo」（［QunaSys３］）の「第０章　そもそも量子コンピュータとは？」によると、量子コンピュータというアイディアは1982年にRichard Feynmanが「自然をシミュレーションしたければ、量子力学



出所：筆者作成

図１　量子力学等と量子情報理論（従来の考え方）



出所：筆者作成

図２　量子力学等と量子情報理論（新しい考え方）

の原理でコンピュータを作らなくてはならない」と述べたことに端を発し、1985年、Oxford大学の物理学者David Deutschが理論的に定式化したとのことである。

1990年代以降、微細加工技術等の進歩により量子（電子、イオン、光子など）の量子状態を操れるようになった（[阿部] p455）。そして、量子の持つ特性を情報理論の観点から見直すことが始まり、量子情報理論が形成されて来た。2000年に出版されたニールセン・チャン『Quantum Computation and Quantum Information』（[Nielsen１]）は、量子コンピュータ・量子情報理論を基礎から体系化し詳説した記念碑的な教科書とされている。

量子力学から派生した量子情報理論であるが、現在では量子力学・場の量子論等を量子情報理論の観点で見直す方向へも動き始めてもいる。**図１**は量子力学等と量子情報理論の関係を従来の立場から見たもの、**図２**は新しい立場で見たものである。

図１、図２の「古典力学」「解析力学」「電磁気学」「特殊相対性理論」「一般相対性理論」はすべて古典物理学とされる。古典という言葉は量子力学的考え方が入っていないということである。なお、これらの分野は数学的に完全な定式化がなされているため、適応可能な範囲の現象においては解を求めることで様々な応用ができる。この他にも「流体力学」「熱力学」等、重要な古典物理学分野はあるが、図１、図２では省略した。

量子力学の建設は、表１に示したようにMax Planckの量子仮説（1900年）に始まり、John von Neumannの『量子力学の数学的基礎』（1932年）で一応の完成を見た。この範囲の量子力学は数学的に完全な定式化ができており、線形代数学を基礎においた論理展開が可能である。ただし、系の時間発展（時間によりどのように変化するか）はSchrödinger方程式を解く必要がある。

量子力学を適応しなくてはいけない量子（電子、光子等の各種素粒子）は生成・消滅するものであり、また特殊相対性理論的な効果を考え併せなくてはいけないため、それらを整合するために場の量子論が建設されている。厳密には非相対論的な場の量子論もあり、物性物理ではその種の場の量子論が多く用いられている。ただし、場の量子論は数学的には未だ不完全である。

場の量子論の特別な場合に共形場理論が構築され、素粒子物理学では、標準模型、超対称性理論、その他多くの理論が構築されてい

る。また、一般相対性理論の量子化も重要なテーマであり、量子重力理論（超弦理論はここに含める）が数多く提唱されている。

量子情報理論はアスペ（A.Aspect）の実験以降、建設が始まったと考えられるが、当初は、量子力学の理論体系をベースに情報の観点を持ち込むというスタイルであった（図１）。日本語で書かれた量子情報科学の良書とされる［石坂］（2012年）はそのようなスタイルであると言える。しかし、量子の持つ情報科学的な特性に注目して、量子力学、場の量子論、その他の量子論を見直す動きが始まっており（［堀田］［高柳］）、現在では図２のような捉え方になっていると思ってよい。量子力学についての新時代の教科書とされる［堀田］は、1922年のシュテルン・ゲルラッハ実験（表１ O.Stern, W.Gerlachの実験）から説き起こし、２準位系の量子力学を記述し、多準位系、量子状態の時間発展を記述するSchrödinger方程式の導出へと進んでいる。２準位系とは電子のスピン、光子の偏光などのように観測装置に対して２つの状態しか取らない量子系のことであり、１量子ビットを実現する系である。従って、量子力学の体系そのものが量子コンピュータの基礎概念である量子ビットや量子エンタングルメント、量子ビットに対する操作や観測に基づいて構築され始めている。良書ではあるが旧来の教科書である［小出］がSchrödinger方程式の導出と応用から量子力学を述べているのとは対照的である。

３．量子ビット・量子ゲート・測定

この章では、量子コンピュータのQPU（Quantum Processing Unit）を構成する量子ビットについて、量子力学、量子情報理論の立場から見て行く。実際の物理現象との対応を見やすくするため、ここではSchrödinger方程式の解である波動関数の解空間についての考察から始める。なお、量子ビットとは２準位量子系のことである。

Schrödinger方程式

$$H\psi = i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} \quad \left(H = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(\boldsymbol{r})\right)$$

の解となる波動関数が $\psi(\boldsymbol{r},t) = \varphi(\boldsymbol{r})e^{-i\omega t}$ であるとすると、空間部分を表す複素数値関数 $\varphi(\boldsymbol{r})$ は、量子の制約条件に応じ、固有値 E_n の固有関数 $\varphi_n(\boldsymbol{r})$ として与えられる。つまり

$$H\varphi_n(\boldsymbol{r}) = E_n\varphi_n(\boldsymbol{r})$$

となる。数または数の組 n は量子数と言われる。固有関数系 $\{\varphi_n(\boldsymbol{r})\}$ によって生成される関数空間 W_o には

$$\langle f, g\rangle = \iiint f^*(\boldsymbol{r})g(\boldsymbol{r})d\boldsymbol{r}$$

により内積が入り W_o はHilbert空間となる。N 個の固有関数で張られた部分空間 W は N 準位量子系と呼ばれ、$W \cong \mathbb{C}^N$ となる。また、W の内積は $\mathbb{C}^N$ のHermite内積 $\langle a|b\rangle$ と対応する。固有関数系 $\{\varphi_n(\boldsymbol{r})\}$ は $\langle\varphi_m, \varphi_n\rangle = \delta_{m,n}$ となるように選ぶので、W の正規直交基底であり、$\mathbb{C}^N$ の正規直交基底 $\{|n\rangle\}$ が対応する。W の波動関数 φ（$\mathbb{C}^N$ 内の対応する単位ベクトル $|\varphi\rangle$）が量子の状態を表す状態ベクトルとなる。

Hamiltonian $H = -\dfrac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(\boldsymbol{r})$ に含まれるポテンシャル関数 $V(\boldsymbol{r})$ を変化させると、元の波動関数は別な波動関数へと変化するが、解空間 W が同一であれば、状態ベクトル

$\varphi(\boldsymbol{r}) = \sum_n c_n\varphi_n$ は別の状態ベクトル $\varphi'(\boldsymbol{r}) = \sum_n c'_n\varphi_n$

に変化することになる。$\mathbb{C}^N$ において単位ベクトルを単位ベクトルに写す線形変換は

Unitary行列Uにより

$$\begin{bmatrix} a_1' \\ \vdots \\ a_N' \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix}$$

と書くことができるので、外部ポテンシャルの操作はUnitary行列による線形変換$|\varphi'\rangle = U|\varphi\rangle$ を引き起こす。反対に線形変換$|\varphi'\rangle = U|\varphi\rangle$ を行うには、Unitary行列Uに対応する物理的操作を行えばよい。

古典力学の物理量 $F(\boldsymbol{r},\boldsymbol{p})$ に対応する物理量は、この量子系の状態ベクトルが$\varphi(\boldsymbol{r}) = \sum_n c_n \varphi_n$ であるとき、演算子 $F(\boldsymbol{r}, -i\hbar\nabla)$ により、

$$\overline{F} = \iiint \varphi^*(\boldsymbol{r}) F(\boldsymbol{r}, -i\hbar\nabla)\varphi(\boldsymbol{r}) d\boldsymbol{r} = \langle \varphi, F(\boldsymbol{r}, -i\hbar\nabla)\varphi \rangle$$

で与えられる。従って、

$$F_{ij} = \iiint \varphi_i^*(\boldsymbol{r}) F(\boldsymbol{r}, -i\hbar\nabla)\varphi_j(\boldsymbol{r}) d\boldsymbol{r} = \langle \varphi_i, F(\boldsymbol{r}, -i\hbar\nabla)\varphi_j \rangle$$

とおくと、$\mathbb{C}^N$ においては

$$\overline{F} = \sum_i \sum_j c_i^* F_{ij} c_j = \begin{bmatrix} c_1^* & \cdots & c_N^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_N \end{bmatrix} = \langle c | F | c \rangle$$

となる。ただし、ここで $F = \begin{bmatrix} F_{ij} \end{bmatrix}$ はHermite行列になることに注意する。

Wが時刻t_0で考えた状態ベクトルの空間であるとすると、時刻tでの波動関数は、時間発展演算子 $e^{-iH(t-t_0)/\hbar}$ を用いて

$$\psi(\boldsymbol{r},t) = e^{-iH(t-t_0)/\hbar}\psi(\boldsymbol{r},t_0) \qquad \left(H = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(\boldsymbol{r}) \right)$$

で書けるので、$\mathbb{C}^N$ のベクトルとしては

$$|\psi(t)\rangle = U(t)|\psi(t_0)\rangle \qquad \left(U(t) = \sum_n |n\rangle e^{-iE_n(t-t_0)} \langle n| \right)$$

で表示できる。$U(t)$もUnitary行列である。

以上の例として基底状態と第１励起状態だけを用いて実効的な２準位量子系とすることが行われている（［阿部］p454脚注）。

電磁界中の電子のスピンの場合は、Schrödinger方程式

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(\boldsymbol{r}) \right] \psi(\boldsymbol{r},t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t}\psi(\boldsymbol{r},t)$$

ではなく、Pauli方程式

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m_e}\left(\nabla + i\frac{e}{\hbar}A \right)^2 + \left(\frac{e\hbar}{2m_e}\sigma \cdot B - e\Phi \right) \right] \psi(\boldsymbol{r},t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t}\psi(\boldsymbol{r},t)$$

を用いる。ここで、Aは電磁場のベクトルポテンシャル、Φ はスカラーポテンシャル、$B = \nabla \times A$、$\sigma = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$（$\sigma_x$たちはPauli行列）であり、電子の電荷を $-e$、電子の質量をm_eとしている。Schrödinger方程式では$\psi(\boldsymbol{r},t)$ は１成分の波動関数であるが、Pauli方程式では$\psi(\boldsymbol{r},t)$ は２成分のSpinorとなるところが異なる。Pauli方程式の解空間Wは２次元でありSchrödinger方程式のときとの類似が成り立つ（［川村］p269-p272）。また、AとΦを変化させることで波動関数を変化させることができる。従って、電子のスピンを量子ビットとして使うことができる。

Maxwell方程式を量子化することで光子の偏極（偏光）には直交する２つの状態のみ存在することを示すことができ、光子の偏極ベクトルは２次元のベクトル空間Wをなす（［堺井］p97-p102）。光子の偏極も量子ビットと考えることができる。

量子ビットがn個あると、n体からなる量子系（$N = 2^n$準位系）となり状態ベクトルを表す空間は$\mathbb{C}^2$のn個のテンソル積$\mathbb{C}^2 \otimes \cdots \otimes \mathbb{C}^2$となる。外部からの物理的操作で量子状態を変更する操作はUnitary行列による線形変換であるが、１量子ビットでの2×2 Unitary行列や、k量子ビットでの$2k \times 2k$ Unitary行列がある。量子コンピュータでは、このような

表２　量子ビットと量子ゲートの実現方法

	光子	イオントラップ	超電導量子ビット
量子ビット	偏光状態	イオンの超微細構造（電子スピンと核スピンによるエネルギー準位）	磁束、電荷、位相
１量子ゲート	複屈折材料を用いた波長板の偏光回転	レーザーパルスによる制御	高周波電磁波との相互作用
２量子ゲート	非線形光学素子や線形素子を組み合わせるKLM方式	イオンの集団の振動モードの基底状態と第１励起状態を介して行われる相互作用や、レーザー照射とイオン間のクーロン反発（電荷の反発）を介した相互作用	磁気的相互作用、電荷による電荷相互作用

	半導体量子ドット	NV中心が入ったダイアモンド	NMR（核磁気共鳴）
量子ビット	人工原子のエネルギー準位や電子スピン	ダイアモンド中の格子欠陥による電子スピンや核スピン	液体溶液中の分子の核スピン
１量子ゲート	高周波電磁波との相互作用	高周波電磁波との相互作用	高周波電磁波との相互作用
２量子ゲート	静電気ゲートの電圧変化？	スピン間の磁気相互作用	電子を介した間接的なカップリング

出所：［QunaSys１］より作成

Unitary行列を量子ゲートと呼ぶ。

量子コンピュータにおける演算とは量子ビット群に次々にゲート操作を行うことである。

理論的に整理できた量子ビットや量子ゲートを現実のものとして実現するには非常に多くの工夫が必要となる（［阿部］、［富田］p53-p58）。量子ビットや量子ゲートの物理的な実現方法をまとめると**表２**のようになる。

$\mathbb{C}^2$における任意の単位ベクトルは

$$|\varphi\rangle = e^{i\Phi}\begin{bmatrix}\cos\frac{\theta}{2}\\ e^{i\eta}\sin\frac{\theta}{2}\end{bmatrix}$$

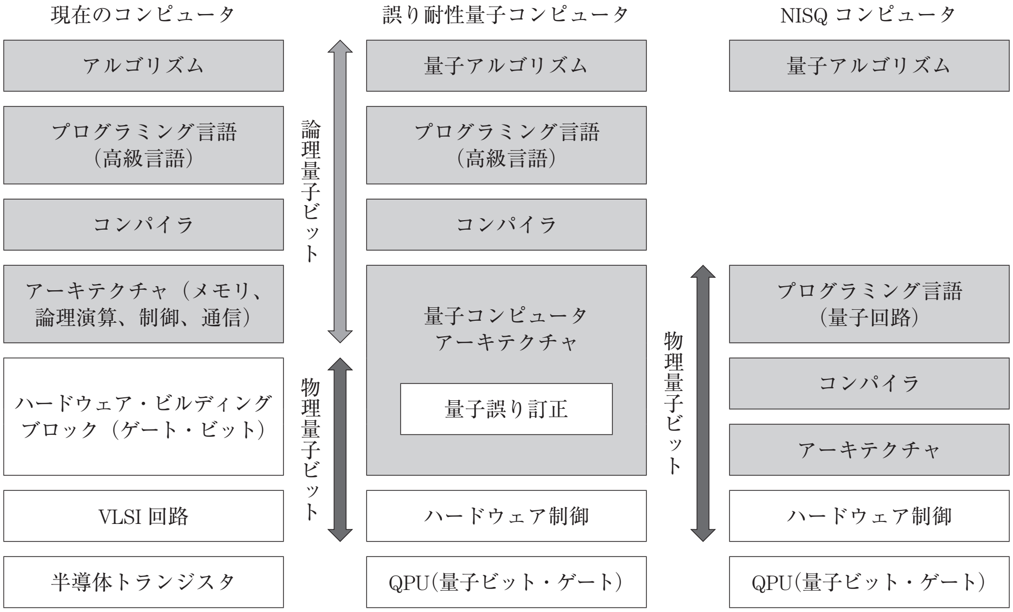
$$(0<\Phi\le 2\pi,\ -\pi<\theta\le\pi,\ 0<\eta\le 2\pi)$$

と表示できるが、全体にかかる位相（グローバル位相）$e^{i\Phi}$を無視すると、２次元球面上の１点と１対１に対応する。この２次元球面をBloch球と呼ぶ（［嶋田２］p11）。１量子ビットに対するUnitary行列による線形変換 $|\varphi'\rangle = U|\varphi\rangle$ をBloch球面上での点の移動として捉えると、Uでどのような操作を行っているのかを視覚的に理解しやすい。

$N=2^n$ 準位系の量子状態は量子測定の理論に従って測定することができる（［堀田］第７章）。量子コンピュータにおいては、各量子ビット（２準位量子系）の状態ベクトル空間である $\mathbb{C}^2$ の正規直交基底への射影測定を行う。測定を１回行うと量子状態が変化するので、同じ量子状態を何回も作り出して測定を多数回繰り返し、$\mathbb{C}^2\otimes\cdots\otimes\mathbb{C}^2$ の基底の出現確率を求め、これにより測定しようとしている量子状態 $|\varphi\rangle$ を求める（［嶋田２］p14）。

４．量子コンピュータの構造

誤り耐性量子コンピュータ、NISQコンピュータの違いは量子ビット数やノイズに対する耐性の違いだけではない。それは次の図



出所：[嶋田１] p９の図に加筆

図３　各種コンピュータのハードウェア・ソフトウェアの構造

によって明らかになる。

図３における物理量子ビット・論理量子ビットとは、各層で操作対象となる量子ビットが何であるかを明示したものである。ここで、物理量子ビットとは２準位量子系のことである。２準位量子系の量子状態の保持時間（量子ビットの寿命T_1、コヒーレンス時間T_2の区別がある（［阿部］p454））は多くの場合、μ秒からm秒のオーダーであるため、ゲート操作を繰り返して量子コンピュータの演算を行ううちに量子状態が壊れ、結果の信頼性が損なわれてしまう。そこで量子エラー訂正（Quantum Error Correction：QEC）が必要となるのであるが、その基本的な方法の一つが１つの量子ビットの量子情報を複数の量子ビットに埋め込む方法である（［阿部］p453）。この複数の量子ビットで構成する１量子ビットを論理量子ビットと言う。論理量子ビットと区別するために、本来の量子ビット（２準位量子系）を物理量子ビットと言う。エラー率１％の物理量子ビットの情報を正確に保持するには10^4個の物理量子ビットで１論理量子ビットを構成する必要があり、エラー率0.001％の場合は170個の物理量子ビットで１論理量子ビットを構成すればよい（［阿部］p454）。誤り耐性量子コンピュータにおいては、上位レイアにおいて１量子ビットとしては１論理量子ビットを考えるというのが図３の意味である。

さて、誤り耐性量子コンピュータと現在のコンピュータはハードウェア部分である下部レイアにこそ違いがあるものの、上部レイアは同じ構造をしており、プログラミングにおいてはほぼ同様な使用感になるのではないかと予測できる。しかし、前論文の「４．量子コンピュータの現状」で見たように、誤り耐性量子コンピュータの実現は2040年～2050年頃（現在は、実現が10年以上早まるという見

方もある）とされており、量子コンピュータにおける高級言語がどのようなものになるかは今の所不明である。

一方、NISQコンピュータと現在のコンピュータは構造が大きく異なっている。高級言語やそのコンパイラに相当する部分がなく、量子コンピュータアーキテクチャに当たる部分(量子回路)をプログラムで書くことになっている。現在のコンピュータであればハードウェアで実現される論理回路部分をプログラムで書くということであるが、このような不便なことを行う一番の理由は、頭脳に当たるQPU（Quantum Processing Unit）を構成する物理量子ビット数が2023年９月時点で、通常利用で数個～数10個程度、多くても100個～400個程度であり、誤り訂正機能もなく、この限られたリソースを有効に使うにはハードウェアを無駄なく使うプログラミングが必要であるからである。ただ、量子コンピュータ開発を積極的に行っているIBMは

2023年　1121物理量子ビット
2025年　4158物理量子ビット以上
2026年以降　１万～10万物理量子ビット以上

のNISQコンピュータを発表する計画であるとのこと（[IBM]）なので、物理量子ビット数が増えるにつれ、論理量子ビットの導入や、論理回路そのものをプログラムで書くという状況からの変化が起きてゆくものとも予想される。

以上の構造上の違いを基に、各コンピュータ上での一般的なプログラミングを修得する上で学ばなくてはいけない部分に図３で色を付けてみた。各コンピュータのOSや低レイアを制御するプログラムなどの特殊なプログラミングは除き、いわゆるアプリケーションプログラム開発のために修得すべき部分である。

５．量子計算と量子プログラミング、量子アルゴリズム

「３．量子ビット・量子ゲート・測定」で述べた量子ゲートには**表３**のようなものがある。

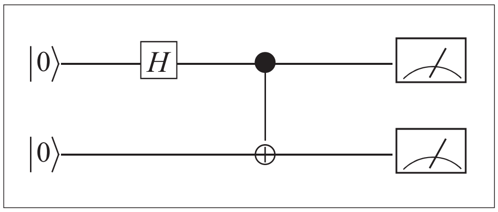
量子プログラムは量子ビットにゲートを作用させる形で量子回路として書き、回路の最後を測定で終わらせる形に書く。この量子回路を実行するとは、QPU（$N=2^n$ 準位系）において各量子ビットにゲートに対応する物理的な操作を実際に行い状態ベクトルを変化させ、最後に量子測定を行い、量子状態を読み取ることである。このような方式で計算を行うことを回路型量子計算と言う。例えば、**図４**の量子プログラム（量子回路）を考える。

すると

$$|00\rangle = |0\rangle \otimes |0\rangle \xrightarrow{H} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \left(|0\rangle + |1\rangle \right) \otimes |0\rangle \right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|0\rangle \otimes |0\rangle + |1\rangle \otimes |0\rangle \right)$$

$$\xrightarrow{\text{CNOT}} \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|0\rangle \otimes |0\rangle + |1\rangle \otimes |1\rangle \right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|00\rangle + |11\rangle \right)$$

となる。ちなみに、出来上がった量子状態はBell状態という量子もつれ（エンタングルメント）状態になる。Bell状態はエンタングル・エントロピーが最大の量子もつれ状態である（[堀田] p72-p75)。



出所：筆者作成

図４　量子回路例

表３　代表的な１量子ビットゲートと２量子ビットゲート

（1）１量子ビットゲート

ゲート名	Unitary行列	意味（Bloch球面での操作）	量子回路記号
X	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	ビット反転（x軸周りの回転）	$\boxed{X}$
Y	$\begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}$	位相・ビット反転（y軸周りの回転）	$\boxed{Y}$
Z	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$	位相反転（z軸周りの回転）	$\boxed{Z}$
H（アダマール）	$\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$	重ね合わせ（xz軸の変換）	$\boxed{H}$
S	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}$	位相シフト（z軸周り$\pi/2$回転）	$\boxed{S}$
T	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{bmatrix}$	位相シフト（z軸周り$\pi/4$回転）	$\boxed{T}$
$R_x(\theta)$	$\begin{bmatrix} \cos\frac{\theta}{2} & -i\sin\frac{\theta}{2} \\ -i\sin\frac{\theta}{2} & \cos\frac{\theta}{2} \end{bmatrix}$	（x軸周りのθ回転）	$\boxed{R_x(\theta)}$
$R_y(\theta)$	$\begin{bmatrix} \cos\frac{\theta}{2} & -\sin\frac{\theta}{2} \\ \sin\frac{\theta}{2} & \cos\frac{\theta}{2} \end{bmatrix}$	（y軸周りのθ回転）	$\boxed{R_y(\theta)}$
$R_z(\theta)$	$\begin{bmatrix} e^{-i\theta/2} & 0 \\ 0 & e^{i\theta/2} \end{bmatrix}$	（z軸周りのθ回転）	$\boxed{R_z(\theta)}$

（2）２量子ビットゲート

ゲート名	Unitary行列	意味	量子回路記号
CNOT （制御NOT）	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	１ビット目（制御ビット）に$\|1\rangle$が入力されたときのみ、２ビット目（ターゲットビット）をビット反転する。	
SWAP	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	２つの量子ビットの交換	
CZ （制御Z）	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	１ビット目（制御ビット）に$\|1\rangle$が入力されたときのみ、２ビット目（ターゲットビット）を位相反転する。	

出所：［嶋田２］p18の表２.１、p25の表２.２より作成

このような量子計算を利用して数学的な問題を解くことができることを最初に示したのがP.W.Shorである。彼は1994年に、量子計算によりn桁の整数の素因数分解を $O(n^3)$ という多項式時間で解くアルゴリズムを発表した（論文［Shor］の掲載は1997年）。現代のコンピュータ（古典コンピュータ）での計算ではこれほど速く計算できる方法が発見されておらず、量子コンピュータ実現への大きな動機付けになった（［嶋田２］p80）。

Shor以降、様々な問題を解くための量子アルゴリズムが提案されている。**表４**と**表５**はその一部を示したものである。

なお、「オラクル」について［QunaSys２］の説明を引用する：

> 入力に対してある決まった規則で出力を返すオラクル（神託機械）が与えられたとき、できるだけ少ない回数オラクルに問い合わせ（クエリ）をすることでオラクルに関する何らかの性質を求める問題を考える。この時、問題を解くためにオラクルに何回問い合わせをする必要があるかを、問い合わせ計算量（query complexity）と呼ぶ。問い合わせ計算量のSpeedupは、必ずしも同じスケールでの時間計算量の改善を意味するわけではないことに注意。

このように量子アルゴリズムは様々なものが提案されているが、実際に実行するには現在のNISQコンピュータでは手に余る。そこで、NISQコンピュータでも実行可能な量子古典ハイブリッドアルゴリズムが提案されている（［嶋田２］第５章）。

一つの考え方は、パラメータを含むゲートで量子回路を書き、初期パラメータの量子状態から最適パラメータ値の量子状態に至るまでのパラメータ値修正を古典コンピュータ側で計算するという方法である。ニューラルネットワークのバックプロパゲーションで最適な重みを計算してゆく方法と同様な発想である。図示すると**図５**のようになる。

量子古典ハイブリッドアルゴリズムはニューラルネットワークとの親和性が高く、CNNやRNNに量子コンピュータの作る層を組み込んだモデルも提案されており、今後の発展が期待される（［嶋田２］p164-p166）。

６．量子プログラミング教育

前論文（［村田２］）の内容と本論文の１章から５章までの考察を基に、文系学部に所属するSE希望の大学生・大学院生向けの当面の量子プログラミング教育について所見をまとめる。

前提条件

（１）2030年頃までの量子コンピュータで教育用途で使用可能なものはNISQコンピュータであるとする。

（２）NISQコンピュータの量子古典ハイブリッドアルゴリズムに基づく量子プログラムを書けることを目標とする。

（３）文系学部に所属するSE希望の大学生・大学院生ではあるが、大学または大学院で以下の教育を受けることができる者を対象とする。ただし、自習部分があってもよいとする。

必要な教育の体系

３期に分けて学習を進める。

〔予備知識学習期〕

（１）数学の予備知識

・高等学校の新課程で考えると高校数学Ⅰ

表４　量子アルゴリズムの例

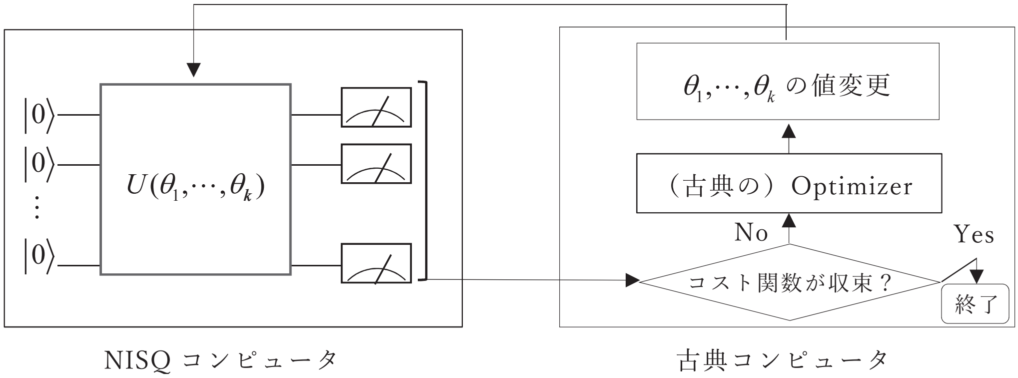
区　分	アルゴリズム例
代数・数論	整数の素因数分解（Shor） Pell方程式 正方行列の積の確認 復号 暗号解読
オラクル	探索（Grover） パターン・マッチング 行列の可換性 統計的有意差 偽造コイン 行列の階数 ネットワークフロー 電気抵抗
近似・シミュレーション	量子シミュレーション 結び目不変量 ３次元多様体の不変量 分配関数 最適化問題の近似アルゴリズム 半正定値計画問題 ゼータ関数 文字列書き換え 行列のm乗
最適化、数値計算、機械学習	関数の勾配 線形システム 機械学習 線形１階常微分方程式系の解法

出所：Webサイト［QAZ］より一部を抜粋

表５　量子機械学習アルゴリズム例

区　分	アルゴリズム例
教師あり	線形回帰 k近傍法 サポートベクターマシン
教師なし	主成分分析 階層的クラスタリング 非階層的クラスタリング（k-means） 非階層的クラスタリング（k-median）
強化学習	Q学習 Projective Simulation

出所：［嶋田２］p123　表４.５より抜粋



出所：［嶋田２］p150図５.２を一部変更

図５　量子古典ハイブリッドアルゴリズムの考え方の例

ⅡⅢABC（[数研]）

データの分析（数学Ⅰ）、場合の数と確率（数学A）、統計的な推測（数学B）を含む。

・１変数関数の広義積分
・多変数関数の微分法・極値問題・勾配法
・できれば多変数関数の積分法・広義積分
・線形代数学

実数体ℝ上の線形代数（行列･行列式･ベクトル空間･線形写像･固有値問題等）

複素数体ℂ上の線形代数（内容は上と同等）

（注意）複素数の扱いに慣れており抽象的思考に慣れていれば、一挙に可換体K上の線形代数を導入してもよい。

・テンソル代数

$(m,0)$ 型のみでよい。

普遍性（universality）は省略してよい。

（２）統計学
・確率密度関数と確率
・期待値計算

（３）プログラミング
・Anaconda 等の環境におけるPython 学習

Jupyter Notebook を使った実習

（４）データサイエンス
・データサイエンスの一連の流れ（[村田１]）
・各種分析手法に関する理論とPythonを使った実習

NumPy, SciPy, pandas, matplotlib, seaborn, scikit-learn その他ライブラリの実習

ニューラルネットワークに関してはTensorFlow+Keras（または Pytorch）での実習

〔理論学習期〕

（１）量子力学と量子情報理論
・量子力学の基本概念（学習範囲や分量について検討を要する部分）

Unitary行列、Hermite行列が出て来る理由

測定の意味

［清水］は東大文系の学生にも講義した内容の教科書とのことであるが高度である。

・量子情報理論

量子ビット・量子ゲート・エンタングルメント

ブラケット計算に慣れる

（２）量子コンピュータの現状

NISQコンピュータ、誤り耐性量子コンピュータなど

量子コンピュータの構造

〔プログラミング学習期〕

（１）プログラミング学習環境

・NISQの実機およびシミュレータを操作できる環境を作る。

例えば、IBM Quantum Platform（旧IBM Quantum Experience）に登録すると現時点で７量子ビットのNISQまでを無料で使用できる（[湊] p52)。ただし、今後も無料で利用できるかは不透明である。

・プログラム開発環境としてはQisikit（[湊]）やTKET（[Quant]）を使う。

TKETはQisikitや他の開発環境との互換性があり、各社のNISQに対応している。

（２）量子古典ハイブリッドアルゴリズムの実例

・ニューラルネットワークなどの機械学習との親和性が高いようである。

・アルゴリズムとプログラムの学習例は教師側で開発する必要がある。

（３）（２）以降はテーマごとに更なる予備知識が必要となる。

７．おわりに

日本政府の「量子未来社会ビジョン」を見ると、2030年に目指すべきこととして「国内の量子技術の利用者を1,000万人に」との謳い文句が目につき、今のパソコンのような手軽さで量子コンピュータを使える時代が来るのではないかと思ってしまう。しかし、この文は「NISQコンピュータの量子古典ハイブリッド技術の恩恵を受ける人々を1000万人に」と考えた方が妥当のようである。NISQコンピュータの量子ビット数増大や量子エラー訂正技術の進歩、AIによる量子プログラム作成補助の進歩などが順調に進んではいるが、現状では、理系出身のSEでもNISQコンピュータの量子アルゴリズム・量子プログラミングの修得はハードルが高い。文系出身のSEや文系学部に所属するSE希望の大学生・大学院生にとっては尚更である。本論文「６.量子プログラミング教育」で述べたような数学・情報・データサイエンス・物理学を学べるように、文系学部・文系大学院でも現在より一歩進んだSTEM（Science, Technology, Engineering and Mathematics）教育が必要であると思える。

参考文献

［阿部］　阿部英介・伊藤公平「固体量子情報デバイスの現状と将来展望　万能ディジタル量子コンピュータの実現に向けて」『応用物理』、第86巻第６号、2017年、p453-p466

［堀田］　堀田昌寛『入門　現代の量子力学　量子情報・量子測定を中心として』講談社、2021年

［IBM］　IBM, Expanding the IBM Quantum roadmap to anticipate the future of quantum-centric supercomputing, 10 May 2022 https://research.ibm.com/blog/ibm-quantum-roadmap-2025

［石坂］　石坂智・小川朋宏・河内亮周・木村元・林正人『量子情報科学入門』共立出版、2012年

［川村］　川村嘉春『相対論的量子力学』裳華房、2012年

［小出］　小出昭一郎『量子力学（Ⅰ）（改訂版）』『量子力学（Ⅱ）（改訂版）』裳華房、1990年

［湊］　湊雄一郎・比嘉恵一郎・永井隆太郎・加藤拓

己『IBM Quantumで学ぶ量子コンピュータ PythonとQiskitでプログラミング!!』秀和システム、2021年
［宮野］ 宮野健次郎・古澤明『量子コンピュータ入門 第２版』日本評論社、2016年
［村田１］ 村田嘉弘・鈴木斉「データサイエンス再考」『経済と経営』、第101巻第１・２・３号、長崎大学経済学会、2021年、p79-p104
［村田２］ 村田嘉弘「量子コンピュータのプログラミング教育に向けて（I）」『埼玉学園大学紀要 経済経営学部篇』、第22号、埼玉学園大学、2022年、p67-p77
［内閣府１］ 統合イノベーション戦略推進会議「量子技術イノベーション戦略（最終報告）」、2020年
［内閣府２］ 統合イノベーション戦略推進会議「量子技術イノベーション戦略 ロードマップ改訂」、2022年
［内閣府３］ 統合イノベーション戦略推進会議「量子未来社会ビジョン～量子技術により目指すべき未来社会ビジョンとその実現に向けた戦略～」、2022年
［内閣府４］ 内閣府 科学技術・イノベーション推進事務局「量子未来社会ビジョン～量子技術により目指すべき未来社会ビジョンとその実現に向けた戦略～ 概要」、2022年
［内閣府５］ 統合イノベーション戦略推進会議「量子未来産業創出戦略」、2023年
［内閣府６］ 内閣府 科学技術・イノベーション推進事務局「量子未来産業創出戦略 概要」、2023年
［Nielsen１］ M.A.Nielsen, I.L.Chuang, Quantum Computation and Quantum Information, Cambridge University Press, 2000
［Nielsen２］ M.A.Nielsen, I.L.Chuang, Quantum Computation and Quantum Information 10th Anniversary Edition, Cambridge University Press, 2010
［QAZ］ S. Jordan, Quantum Algorithm Zoo https://quantumalgorithmzoo.org
［Quant］ QUANTINUUM, Work Across Platforms with TKET™ https://www.quantinuum.com/developers/tket
［QunaSys１］ 株式会社QunaSys Qmedia「量子コンピュータを実現するハードウェア（後編）」、2018年 https://www.qmedia.jp/making-quantum-hardware-2/
［QunaSys２］ 株式会社QunaSys Qmedia「Quantum Algorithm Zoo全訳 オラクルアルゴリズム」、2018年 https://www.qmedia.jp/oracular-algorithms/
［QunaSys３］ 株式会社QunaSys「Quantum Native Dojo」 https://dojo.qulacs.org/ja/latest/index.html
［堺井］ 高エネルギー加速器研究機構監修 堺井義秀・山田憲和・野尻美保子著『素粒子物理学』共立出版、2012年
［Sakurai］ J. J. Sakurai, J. Napolitano, Modern Quantum Mechanics, Third Edition, Cambridge University Press, 2020
［嶋田１］ 嶋田義皓「量子技術の研究開発・政策動向」量子技術イノベーション戦略見直し検討WG（第１回）資料２、2021年
［嶋田２］ 情報処理学会出版委員会監修、嶋田義皓著『量子コンピューティング 基本アルゴリズムから量子機械学習まで』オーム社、2020年
［清水］ 清水明『新版 量子論の基礎 その本質のやさしい理解のために』サイエンス社、2004年
［Shor］ P.W.Shor, Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer, SIAM J. Sci. Statist. Comput., Vol.26, No.5, pp.1484-1509, 1997
［数研］ 数研出版編集部「高等学校新学習指導要領「数学」について」 https://www.chart.co.jp/subject/sugaku/suken_tsushin/91/91-1-2.pdf
［高柳］ 高柳匡『量子エンタングルメントから創発する宇宙』共立出版、2020年
［富田］ 富田章久『量子情報工学』森北出版、2017年
［横山］ 横山寛一『量子電磁力学 ゲージ構造を中心として』岩波書店、1978年