

なぜ工学部の学生は量子コンピュータを学ぶべきなのか —量子コンピュータへ至る計算機の歩み—

平田 隆幸*

Why Should Engineering Students Study a Quantum Computer? —History of Computers from a Digital Calculator to a Quantum Computer—

Takayuki HIRATA*

(Received February 3, 2020)

Quantum supremacy is demonstrated by some groups. Quantum computer is a hot topic in both the scientific community and the general public. At first, let's summarize the history of a computer to understand a meaning of quantum computing. A Turing machine is an epoch making innovation in calculation by machine. Human being has gotten a powerful tool not only in numerical calculation but also in logical tools. However, Turing machine has a limitation on some problems such as NP complete and so on. Quantum computer may be one of the solutions that is a key of breakthrough of the limitation in modern computing. In this paper, I will discuss why engineering students should study a quantum computer.

Key Words: Quantum Computer, Quantum Supremacy, Computation, History of Computers, Quantum Mechanics, Engineering Student.

1. はじめに

量子コンピュータの超越性(Quantum Supremacy)が、科学者のコミュニティを越えた社会の話題になっている^{[1]-[4]}。一般の人に向けた、量子力学の基礎知識を必要とせず、数式を使わない、量子コンピュータについての分かりやすい解説本も多く出版されている:例えば、概略を知るためには長橋の本^[5]、ソフトウェアが分かりやすく(アルゴリズム)かつ少し理系のバックグラウンドを必要とする宇津木・徳永の本^[6]などを挙げる事ができる。さらに、理系の大学生に向けて、量子コンピュータの研究者である宮野健次郎・古澤明の入門書^[7]も出版されている。

ここで、量子状態を利用した新しい計算機の可能性が議論されるようになった歴史を簡単に振り返ってみよう。1980年、物理学者のP. Benioffが、物理系

としてのコンピュータ、つまり量子コンピュータの可能性を議論したことに端を発する^{[8][9]}。さらに、1982年ノーベル物理学賞受賞者 Feynman が、量子状態を使った計算は、古典計算と比較して、大きな可能性をもつことを示唆した。

また、量子コンピュータのアルゴリズムの面から、1992年にドイチェ・ジョサのアルゴリズム^[10]が、1994年にピータ・ショアによる因数分解に関するショアのアルゴリズム^[11]が提案された。ショアのアルゴリズムは、特定の問題を解くことに限定したものであるが、RAS暗号にも利用されている因数分解を高速で解くことができることを示したインパクトの大きなものであった。さらに、グローバーが、1996年のシンポジウムにおいて、実用的なデータベース内の探索アルゴリズムというテーマで量子コンピュータの有効性を示した^[12]。

さらに、量子コンピュータに注目をあつめることがおこった。量子コンピュータの可能性で、2012年 Serge Haroche と David J. Wineland がノーベル物理学賞(個別の量子系に対する計測および制御を可能に

* 大学院工学研究科知能システム工学専攻

* Human and Artificial Intelligent Systems Course, Graduate School of Engineering

する画期的な実験的手法の開発)を受賞した。同時に、量子テレポーテーションという魅力的なテーマにも発展がみられた。量子テレポーテーションは、最も単純な量子コンピュータと位置付けることができる^[13]。量子コンピュータは、2017年にはNHKなどでも取り上げられた^[14]。また、量子コンピュータという言葉は、アニメにも出てくるほど時代を反映したものとなりつつある。これら、量子コンピュータに対する期待が高まるとともに、工学部の学生がどのように量子コンピュータというテーマに取り組めば良いかという問題が生じた。

本論文では、量子力学の授業がない工学部の学生がどのように量子コンピュータを学べば良いのかについて考える。最初に、量子コンピュータに至る計算機発展の歴史について見ていく。同時に、他大学を含め工学部で量子力学の授業がどのようにおこなわれているのかをみる。さらに、量子コンピュータの状況について簡単に見ていく。そして、学生の量子力学さらには量子コンピュータについての知識について調べる。これらのことを通して、なぜ工学部の学生は量子コンピュータを学ぶべきなのかを議論する。

2. コンピュータの歴史

現代社会では、PCをはじめとし、携帯電話、自動車、家電製品に至るまで、さまざまなところでコンピュータが使われている。ユーザーとしての私たちは、コンピュータと意識せずにコンピュータを使い、コンピュータに囲まれて生活しているといっても過言ではない。ここでは、アナログコンピュータからデジタルコンピュータ、そして量子コンピュータへと、コンピュータの歴史をできる限り日本人の生活に根ざした視点から振り返ってみよう。

2.1 アナログコンピュータ

アナログ計算機の歴史は古く紀元前にまでさかのぼれる。しかし、身近で実用的なアナログ計算機の例は、計算尺であろう。計算尺は、17世紀に対数の発見に伴い、イギリスの数学者ウィリアムオートレット(William Oughtred)によって発明された。日本では、中学校の授業にとり入れられていた時期もあった。計算尺のエッセンスは、対数の足し算は真数の掛け算に相当することを利用しているところにある。つまり、計算尺は、加減乗除という演算を計算尺に刻まれた目盛りを読むという作業で実行できるようにした道具である。アナログ的に手で計算尺を操作し目で目盛りを読む、というアナログ計算機である。

アナログ計算機は、大昔のものではなく、最近まで、科学の発展に大きく貢献してきた。日本人がカオスの研究に大きく貢献した上田アトラクター^[15]の発見は、OPアンプを使ったアナログ計算機によるものである。非線形常微分方程式をOPアンプを使った電子回路によって解かせ、オシロスコープで計測してストレンジアトラクタ(カオス)を見つけた仕事である。常微分方程式のパラメータも、数値を入力するデジタル計算機と異なり、ポテンシオメータを回すことによってアナログ的に変えていた。20世紀後半ごろまで、アナログ計算機は最先端研究においても使用されていたのである。しかし、時代は汎用性の高いデジタルコンピュータへ向かう。

2.2 デジタルコンピュータ

デジタル計算機の歴史も古く紀元前にまでさかのぼれる。しかし、日本人に馴染み深いデジタル計算機は、そろばんである。「読み、書き、そろばん」と言われるように、日本人の素養と考えられていた。そろばんは、16世紀に伝来し、現在も義務教育のカリキュラムに組み入れられている。デジタル計算機といえば、電卓を思い浮かべるかもしれないが、日本人はもっと古くからそろばんに代表されるデジタル計算機に接してきたのである。そういう意味で、デジタル計算機は、日本人の生活に根ざしたものであったことが分かる。

さて、近代的なデジタル計算機の歴史は、17世紀の機械式計算機(例えば、パスカルの計算機など)にまでさかのぼることができる。日本では、タイガー式計算機(手回し計算機)がよく使われた。タイガー式計算機は、1960年代頃まで大学の研究室においても数値計算に用いられていた(例えば、情報処理学会 HP^[16]参照)。プログラミングができる汎用計算機の登場は、人類の計算機による計算におけるパラダイムシフトであった。

電子素子を用いたデジタルコンピュータの登場は、衝撃的なできごとであるといえる。例えば、電子素子として真空管をもちいて作られ1946年に公開されたENIAC(Electronic Numerical Integrator and Computer)は、限定されているがプログラミングが可能な電子式コンピュータであった。当初、企画された弾道計算のみならず様々な計算がなされた。しかし、真空管をもちいたコンピュータは巨大なサイズと膨大な電力を必要とするものであった(30×50feet, 30tons^[17])。

チューリングマシンとしてのコンピュータは、ノイマン型コンピュータであった。初期のコンピュータは、ENIACのように非常に大型なものであった。

ENIAC を含む初期のコンピュータは、メモリも少なく限られた用途にしか使えなかった。汎用の商用コンピュータとしては、1960年代に登場したメインフレームを待たなければならない。メインフレームとして、実用的な大型計算機をリードしたのは、IBMであった。IBMは、1964年4月にSYSTEM/360を発表し、以降メインフレームは、汎用コンピュータとして、金融、製造、運輸などに使われるようになった^[18]。コンピュータの利用は、弾道の軌道計算などの科学計算の目的から始まったが、より広範なものへと移っていった。

日本の状況は、どうであったのだろうか？日本のメインフレームメーカーは、富士通、日立製作所、日本電気（NEC）の3社である。日本における大型計算機導入状況を、大学の大型計算機センターを中心に振り返ろう。日本もコンピュータ産業を育成するために、1965年に東京大学^[19]を皮切りに、旧帝国大学の7大学に大型計算機センター^{[20]-[25]}が設置された。産業界のバランスをとるため東京大学は日立のコンピュータ（HITACシリーズ）、東北大学、大阪大学はNECのコンピュータ（NEAC）、京都大学、北海道大学、名古屋大学、九州大学は富士通のコンピュータ（FACOM）、というように棲み分けがなされた。なお、大学以外に目を向けると、1944年に設立された統計数理研究所は、1950年代の富士通の継電器式自動計算機に始まり、1960年代の日立製作所のパラメロン計算機を経て、1970年代以降日立製作所のHITACシリーズを導入している^[26]。

日本の3つのメインフレームメーカーのコンピュータが、大学の大型計算機センターにバランス良く導入され、棲み分けが行われているのを見てきた。しかし、一般的な汎用大型計算機の利用が、金融などのシステムに使用されたのに対して、大学での計算機（コンピュータ）の利用は、数値計算、数値シミュレーションなど科学技術計算が主であった。そのため、科学技術計算に特化した計算機であるスーパーコンピュータの開発が渴望されるようになった。大学の大型計算機センターの主力コンピュータは、汎用コンピュータからスーパーコンピュータへと変遷していくのである。

Cray Research Inc.によって開発されたベクトル計算を含む数値計算に特化したスーパーコンピュータCray-1^[27]が米国ロスアラモス国立研究所に納入されたのは、1976年であった。Cray-1は、並列計算の能力が高いベクトル計算機であるという特徴をもっていた。その後、スーパーコンピュータCrayシリーズは、政府機関や大学の大型計算機センターに次々と導入された。このスーパーコンピュータの系譜が、

地球シミュレータなど、神戸市の次世代スーパーコンピュータ「京」につながっているのである。スーパーコンピュータは、ベクトル計算や専用のCPUを使って並列計算に特化したコンピュータと言える。言い換えると、巨大な投資をおこない、高速な並列処理を達成しようというのがスーパーコンピュータの潮流と言える。

さて、大型計算機センターでは汎用大型コンピュータからスーパーコンピュータへと発展した一方、各研究室がコンピュータを所有できるようになってきた。1970年の小型コンピュータDEC PDP11の登場である。それまでは、パンチカードでプログラムを作り、大型計算機センターに制作したパンチカードを持っていき、コンピュータにカードリーダーを使ってプログラムを読み込ませ実行させていた。PDP11は、コンソール端末からプログラムができ、Fortranを走らせることができた。OSとして公式にUnixが使われたのもPDP11からである。ダウンサイジングの始まりである。

小型コンピュータは、数百万円から数千万円した。大型コンピュータが億円単位であったことから比較すると、非常に身近なものになったが、依然として、高価な設備であった。しかし、ダウンサイジングの波はこれに留まるものではなかった。ワークステーションの登場である。Sun Microsystemsのスパークステーション(1989年SPARC Station 1)が果たした役割は大きい。SPARC(Scalable Processor Architecture)は、RISCベースのCPUであり、OSにはUnixが使われていた。スパークステーションによって、予算の少ない大学の研究者にとっても、科学計算ができるコンピュータが身近な存在になった。

ワークステーションに留まらず、ダウンサイジングはさらに進んでいく。マイクロコンピュータの登場である。1971年に、Intelから4bitマイクロプロセッサIntel 4004(クロック周波数500kHz, 10 μ mプロセス・ルール。以降、クロック数が複数あるCPUの場合、CPUのクロック周波数およびプロセス・ルールに関しては、最初に発表されたものあるいは代表的なものを記している)が発表された。さらに、1972年に8bitマイクロプロセッサIntel 8008(クロック周波数500kHz, 10 μ mプロセス・ルール)が発表され、その後Intel 8080(クロック周波数2MHz, 6 μ mプロセス・ルール)、Intel 8085(1976年発表、クロック周波数3MHz, 3 μ mプロセス・ルール)と発展していく(図1に、Intel CPUのクロック数をプロットしたものを示す。)。マイクロコンピュータの黎明期である。1978年には、現在まで続く最初のx86アーキテクチャである16ビットCPUのIntel 8086(クロック周波

数 5MHz, 3 μ m プロセス・ルール)が発表された. Intel 8086 は, NEC PC-9801 や IBM PC(Intel 8088 外部データバス 8bit にした低価格版)に使用され, パーソナルコンピュータの普及に大きく寄与した. 特に, IBM PC は, IBM PC/AT Compatibles (IBM PC 互換機あるいは DOS/V マシンとも呼ばれる)に引き継がれた.

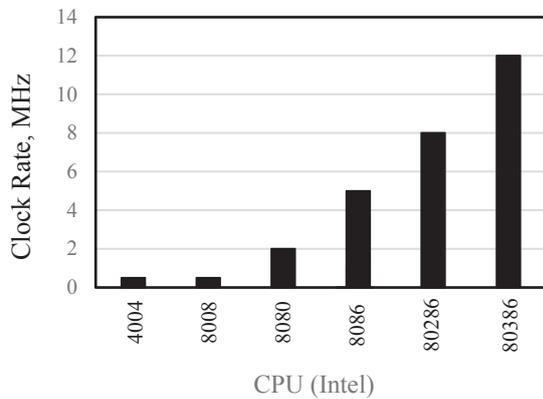


図 1 Intel CPU のクロック数

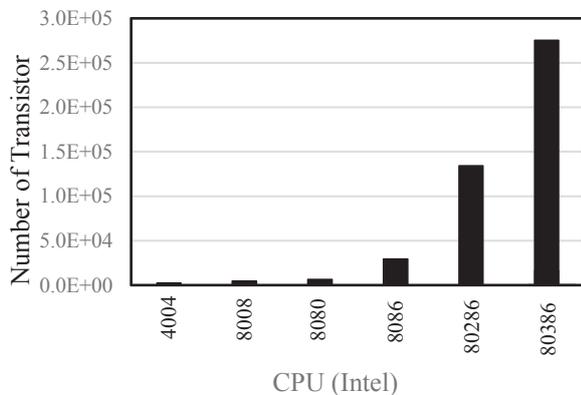


図 2 Intel CPU の集積度

マイクロプロセッサの黎明期には, Intel の 8080 だけでなく, モトローラの MC6800 やモステクノロジーの MOS 6502 などの CPU があつた. 1974 年に発表されたモトローラの MC6800 および 6800 シリーズ(6809 など)は発展を続け, 1980 年から生産された 32 ビットの MC68000 は, Apple 社の Lisa, Macintosh, シャープの X68000 に使用された. モステクノロジーが 1975 年に発表した MOS 6502 は, コモドル社が発売した PET 2001 やアップル社の Apple II に使われた, また, 1976 年にザイログから発表された Z80 の設計には, 日本人の技術者嶋正利が中心的役割を

果たしている. Z80 は, 1979 年に日本で発売された NEC PC-8001 に使用されていたり, 組み込み型マイコンとして使用されていたり, 日本ではなじみが深い CPU である.

Intel 8086 CPU は, Intel x86 系として, 16 ビットアーキテクチャ 8086, 80186, 80286 から 80386 で 32 ビットアーキテクチャに拡張され, さらに 64bit ビットアーキテクチャ AMD64 や Intel64 に引き継がれている. 80386 で実装された 32 ビットの命令 (IA-32 命令) は, 現在に引き継がれ, 使用されている.

さて, Intel x86 CPU に代表される CPU は, CISC(Complex Instruction Set Computer)である. CISC は複雑な命令を実行できる代わりに, クロック数を上げることが比較的困難であった. そこで, 命令を単純なものに厳選し, クロック数を上げる試みがなされるようになった. それが, RISC(Reduced Instruction Set Computer) CPU である. 前述の Sun Microsystems の SPARC(Scalable Processor Architecture)や MIPS アーキテクチャの R2000 (MIPS Computer Systems, Inc. (現 MIPS Technologies, Inc.))は, RISC ベースの CPU の代表例である.

現在の PC に使用されている CPU は, CISC の代表例である Intel x86 系 CPU である. それゆえ, マイクロプロセッサと言え, CISC を思い浮かべるかもしれないが, RISC 系の CPU も良く使われている. 携帯電話などに使われている CPU は, RISC の系譜につながるものである. 例えば, モバイル機器において多く使われている ARM Ltd の組み込みマイクロプロセッサ ARM も RISC に分類される. また, Intel も CISC である x86 系だけではなく, RISC に分類される Xscale (Intel が実装した第五世代の ARM アーキテクチャ)を使っている. なお, 現在の CPU, Intel atom などは, CISC・RISC の区別が意味をなさなくなっていることを付記しておく.

コンピュータの計算速度を速くする方法として, CPU が一度に処理できる bit 数を向上させる方法とクロック数を上げる方法とがある. Intel の CPU を例に見ていく. 4bit CPU: 4004 は, クロック周波数 0.5MHz, 8bit CPU: 8008 は, クロック周波数 0.5MHz, 8080 は, クロック周波数 2MHz, 16bit CPU: 8086 は, クロック周波数 5MHz, 80286 は, クロック周波数 8MHz, 32bit CPU: 80386 は, クロック周波数 12MHz と高速化された. 現在, x86 系 CPU のクロック数は 4GHz にまで高速化された, これは, 集積度を上げることによって達成された. 4bit CPU 4004 は, 2300 トランジスタ, 8bit CPU 8008 は 4500 トランジスタ, 8080 は 6000 トランジスタ, 16bit CPU 8086 は 29000 トランジスタ, 80286 は 134000 トランジスタ,

32bit CPU 80386 は 275000 トランジスタであった。図 2 に、CPU の集積度(トランジスタ数)の変遷を示す。「集積回路上のトランジスタは 18 か月で倍になる」というムーアの法則がうまく成り立っていた。

しかし、集積度を上げることの限界が見え始めた。同時に、クロック周波数を上げることによる高速化にも限界が現れた。そこで、複数のコアを走らせる、並列処理による能力向上がなされるようになってきた。例えば、AMD の最新の CPU Ryzen Threadripper 3990X(2020 年 2 月 7 日発売予定)は、ベースクロック 2.9GHz(ターボ時、最大 4.3GHz)、64core となっている(AMD の HP 参照：<http://www.amd.com/ja>)。ここでの高速化のポイントは、複数の Core を走らせる、並列処理がキーワードとなっている。

新しい潮流として、RISC の系譜につながる新しい種類の CPU である GPU(Graphics Processing Unit)も注目に値する。GPU は、画像を並列処理する。ここでは、並列処理、画像処理に特化した並列計算ができるようになっており、高い処理速度を誇っている。GPU の分野では、Intel や AMD 以外の新しいメーカーが台頭してきている。例えば、台湾の NVIDIA などである。トピックとして、NVIDIA は、GPU で培われた技術を使い Level 4 から Level 5 の自動運転の一翼を担うのでは、と期待されている。

3. 量子コンピュータに向けて

ノイマン型コンピュータは、非常に大きな成功を収めた。一方、ノイマン型コンピュータの限界も議論されるようになってきた。そこで、ノイマン型コンピュータの成功を越えた、新たな可能性が模索されるようになってきた。

3.1 デジタルコンピュータから量子コンピュータへ

量子コンピュータは、デジタルコンピュータの限界を打ち破る可能性があることから注目を浴びるようになってきた。デジタルコンピュータが、トランジスタによるスイッチ機能を利用して、古典状態(古典ビット bit)を扱うのに対し、量子コンピュータは量子状態(量子ビット qubit)を扱う。量子コンピュータでは、計算中の量子状態をアナログ値として取り扱い、入出力をデジタル値で与えるのである。つまり、量子状態を使うことによって量子コンピュータは、並列処理を実行でき、その結果として高速な演算が期待されるのである。

さて、量子コンピュータの新しい可能性と実現可能性について見ていく。最初に、量子コンピュータの基礎となる量子ビットについて考える。量子ビッ

トの実現方法は、光、スピン(電子スピン、核スピン(NMR)、シリコンのリン原子のスピン)、超電導量子ビットなどがある。初期のデジタルコンピュータにおいて、デジタルビット(古典ビット)が、真空管やトランジスタによるスイッチ機能を利用していたのと対応する(現在は、トランジスタに収束した)。それぞれの量子ビットには、メリットとデメリットがある。レーザーをつかった量子ビットは、任意の量子ビット間にエンタングルメント(entanglement)を構成しやすいが集積度を上げにくい。一方、半導体を使った量子ビットは、集積度は上げやすいが、近接した量子ビット間以外では、エンタングルメントを構成するのが難しい。将来、デメリットが克服され、どの量子ビットが有望になるか楽しみである。

次に、量子ビットを利用した量子コンピュータについて考える。量子テレポーテーションは、最もシンプルな量子コンピュータといえる^[13]。量子コンピュータは、通信にも大きな影響を与える可能性がある。ネットワークにおいて、セキュリティの問題は重要な問題である。量子暗号(例えば、BB84^[28])は、情報理論的安全性がある暗号技術として期待されている。量子コンピュータによって、計算量的安全性に基づく現在使用されている RAS 暗号が破られる可能性が指摘されている。一方、量子テレポーテーションを含めた新たな量子情報処理によって、量子暗号の有用性が議論されているのは興味深いことである。

量子コンピュータは、量子ビット数を増やすことが困難である。デジタルコンピュータと比較すると、非常に限られた量子ビット数しか実現できていない(使用できない)。では、現実にはまったく役に立たないのであろうか?しかし、限られた量子ビットでもデジタルコンピュータでは困難であった問題の解決に役に立つことが分かってきた。

現在、現実的な量子コンピュータのアルゴリズムは、量子アニーリングと NISQ(Noisy Intermediated-Scale Quantum (Computer))がある。NISQ でも RAS 暗号を短時間で解くことができる可能性が示された。量子アニーリングは、1998 年に日本人の物性理論の研究者の西森秀稔らが提案したアルゴリズムである^[29]。スピングラスの研究をおこなっていた西森が、量子アニーリングのアイデアに至ったのは、必然ともいえるし、非常に興味深い。量子アニーリングは、トンネル効果による local minimum からの脱出など、量子力学の現象を利用している。組合せ最適化問題(例えば、巡回セールスマン問題)を解くのに利用されている。すでに、D-Wave 社^[30]が有料で量子ビットを使用したシステム D-2000Q を提供している。D-

2000Q は, 128000 のジョセフソン接合を使って, 2048 qubits と 6016 結合(couplers), を実現している(D-Wave-2000Q-Tech-Collateral_1029.pdf 参照). 量子コンピュータは, 遠い将来に実現されるかもしれない理論的なものから現実的なものになりつつある.

量子コンピュータを利用するというエンドユーザーとしての立場に満足するのではなく, 工学系の大学生として, 量子コンピュータを開発し, 新しい世界を創造するための基礎を考えてみよう. そのためには, 何を学ぶべきかをみていく.

3.2 量子コンピュータで使う量子力学

量子コンピュータでは, 古典状態をつかう bit の代わりに量子状態 qubit を使う. そのため, 量子状態の理解が必要となる. つまり, 古典力学ではない, 量子力学の知識が必要となる. ここで, 量子コンピュータに必要な量子力学を考えていこう.

3.2.1 工学部での量子力学のカリキュラム

量子コンピュータに関する授業は, 大学の工学系の学部・大学院において, どのようにおこなわれているのだろうか? 日本を代表する 2 つの大学で調べてみた. 東京大学では, 学部学生を対象に長谷川秀一氏による量子コンピューティングが理工学部の授業としてリストされている. 京都大学では, 工学研究科融合工学コースの大学院生を対象に, 量子情報科学という授業が竹内繁樹・岡本亮氏によって開講されている. これらは, 東京大学・京都大学の HP から調べたものである(2019年12月1日時点). 授業を受けるにあたり, 事前知識として量子力学を勉強していることが推奨されている.

一般的に, 工学系のほとんどの学生は, 量子力学を学ばない. 一方, 量子コンピュータは, NHK でも取り上げられるように工学系の大学生のみならず, 世間一般の人の人口に膾炙するほどホットなテーマである. 量子力学の授業がカリキュラムにない工学系の学生にどのように, 量子コンピュータの授業をおこなえばよいのだろうか.

光子をもちいた量子アルゴリズムの実験をおこなない, 大学で量子コンピュータに関する授業も担当している竹内の本 BLUE BACKS^[31]を例に考えてみよう(竹内が担当している量子情報科学の参考書としても挙げられている). BLUE BACKS という本の性質上, 量子コンピュータについて, 数式を使わずに量子力学の確率波から量子コンピュータに必要な重ね合わせ状態までの説明を試みている. また, 「超並列計算」と称し, 量子アルゴリズムを紹介している. ここでは, 量子力学で使われる表記法(例えば, ブラ

ケットなど)を使用している. 一方, 従来の量子力学の授業でメインとなるシュレディンガー方程式, 応用としての井戸型ポテンシャルの水素原子, 散乱断面積, Born 近似などは, 取り上げられていない. 従来の量子力学の授業と量子コンピュータを学ぶことを主眼においた量子力学の授業では, 異なってくるのではないだろうか? このことについて考えていく.

3.2.2 量子コンピュータを理解するための量子力学

量子コンピュータの超越性という論文^[1]を基礎レベルから理解することを主目的とすると, 必要な勉強はなんだろうか? どのような授業が必要か? 従来の量子力学の授業は, シュレディンガー方程式, 応用としての井戸型ポテンシャルの水素原子, 散乱断面積, Born 近似, などが主となる. しかし, 量子コンピュータに現れる entanglement (絡まりあい)などは, あまり取り上げられていない.

最初に, 一般的な量子力学の授業を振り返ってみよう. 福井大学工学部では, 本格的な量子力学の授業は応用物理学科で開設されている. 量子力学 I・II (必修単位) であり, 標準的な受講スケジュールでは, 2年後期, 3年前期で履修することになる. シラバス上は, HP 参照), I・II と別れているが, 通年で共通の教科書^[32]を用いる. 教科書として用いられる小出の本は, 前期量子論から不確定性原理, シュレディンガーの波動方程式, そしてスピンや量子電磁力学までについて取り扱ったバランスの良いものである. 同時期に同じ出版社から出版された小出の量子力学 I・II^{[33][34]}からディラックの形式や行列による取扱を省くあるいは触れる程度にとどめた構成になっているといっても良い.

小出の本を教科書にした量子力学の授業では, シュレディンガー方程式がメインであり, 箱型ポテンシャルでエネルギー状態を求めるのがゴールになるものと考えられる. つまり, 工学部の授業では, シュレディンガーの波動関数を主に教え, ハイゼンベルグの行列力学(不確定性原理)は触れるのに留まり, またディラックの形式は, メインではない.

一方, 量子コンピュータの論文では, ディラックの形式, ブラケットが主役である. そう考えると, 量子コンピュータの理解を主目的とした量子力学の勉強のための量子力学の本としては, ディラックの本が良いだろう^[35]. 竹内や古澤の本の量子力学に関するもやもやした部分は, ディラックの本を読むとすっきりするかもしれない.

量子コンピュータの可能性に言及した Feynman とともにノーベル物理学賞を受賞した朝永振一郎の教科書についても触れておく. 名著として名高い朝永

の本^{[36][37]}は、量子力学の成立過程（前期量子論）の歴史を丁寧に扱っている。そういう意味で、現在の量子コンピュータの成立過程の状況は、量子力学の成立時期と類似しているかもしれない。朝永やディラックの本を読むことは、黎明期の分野を大切に育てようとする気持ちが伝わってくるようで興味深い。逆に、量子コンピュータを理解するための最小限の量子力学の知識を得ることを目的とした人には、冗長と感じられるかもしれない、勧められないかもしれない。

4. 現実的な量子コンピュータ

4.1 量子ビットの実現

量子コンピュータの基礎となるものは、量子ビット(qubit: quantum bit の略)である。古典的コンピュータの基礎となるのは binary bit(2 値: 0, 1)である: 0, 1 の離散値をとる。一方、量子ビット qubit は、

$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

の複素数で表される。ここで、 α および β は複素数であり、 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ を満たす。古典ビット 0, 1 に対応するものは、 $|0\rangle$, $|1\rangle$ で表される状態ベクトルである。古典状態が 0, 1 という整数であるのに対し、量子状態は複素数で表されるという点で、ハードルが高いかもしれない。

さて、量子ビットの実現方法には、幾種類もの方法がある。原子核や電子のスピン、光子の偏光などである。原子核や電子のスピンを利用した量子ビットの実現には、0K から数 mK の超低温下でのシステムを必要とする。集積度を上げやすいというメリットがある。一方、光の偏光を利用した量子ビットは、超低温は必要としないが、集積度を上げにくいというデメリットがある。それぞれの特色を考慮すると、光の偏光を利用した量子ビットは、量子テレポーテーションには向いているのかもしれない。

量子ビットが実現できると、いよいよ量子コンピュータが現実のものとなってくる。竹内は、量子ビットから量子コンピュータへの発展性を議論しており^[31]、以下に条件として、

- 1) 量子ビットの初期化
- 2) 量子ビットの状態の読み出し
- 3) 基本ゲートの構成
- 4) スケーラブル
- 5) 重ね合わせの持続時間（緩和時間）

を分かりやすくリストアップしている。どのような量子ゲート(例えば、X ゲート、アダマールゲート、位相ゲート、Controlled-NOT ゲートなど)を用いて、どのような量子コンピュータを作るかは、楽しくかつ難しい問題である。

では、量子コンピュータが実現するとどのようなメリットがあるのだろうか。量子超越性という観点に立ち戻ってみる。NISQ(Noisy Intermediated-Scale Quantum (Computer)としての量子コンピュータが、スーパーコンピュータが約1万年かかる問題を200秒で解けたというのが、Quantum Supremacy の論文^[1]の骨子である。このように数十 qubits しかない量子コンピュータでさえ、古典的なスーパーコンピュータに優ることが示されたことがポイントである。

4.2 量子コンピュータをとりまく状況

量子コンピュータの状況を日本人による研究に重点を置いてみていこう。古澤らは、レーザーを使い1998年に決定論的量子テレポーテーションの実験に成功し、量子テレポーテーションをもっともシンプルな量子コンピュータと位置付けている。レーザーによる量子コンピュータは、真空管によるデジタルコンピュータに対応するかもしれない。ENIACがビル丸ごと使用したようにレーザー（光）によって量子ビットを実現する方法は、集積度を上げることが期待できない。日本人科学者がリーダー的役割を果たしたことにこだわって、量子コンピュータとして、レーザーを用いるのはあまり賢明と言えないかもしれない。同様に、西森らによる量子アニーリングも巡回セールスマン問題を解くことは得意かもしれない。NP complete を解くことができるのは、重要であるが、汎用性に劣るのは否めない。新しい可能性をもった分野であるがゆえに、現在の状況に拘泥することなく、若い学生の新しい挑戦が期待される。

次に、近い将来、量子コンピュータの活躍が期待される分野を考えてみよう。例えば、製薬に関連する分子シミュレーションなどが期待されている。さまざまな化学物質の可能性が短期間かつ安価に評価できるようになると、我々の生活は一変するかもしれない。

さらに、量子コンピュータをクラウドで利用することは、魅力的なアイデアである。量子コンピュータを現在のデジタルコンピュータのように小型化して、PCだけではなく家電製品から自動車などあらゆるところに組み込まれているような感じで利用できるようになるのは難しい。しかし、視点をかえると、量子コンピュータを誰も利用できるようになる可能性がある。今年からサービスが開始される5G（第5世代移动通信システム）や10年後に予定される6G（第6世代移动通信システム）がもたらす通信環境は、量子コンピュータの利用に大きな可能性を秘めている。基幹システムがクラウドに移行するのにもない量子コンピュータもクラ

ウドで利用されるようになると、冷却装置を含む巨大なシステムも大きな問題にならないだろう。このようにシステムは、すでに存在している。例えば、翻訳システムのポケットクである。ポケットクは、クラウド上にあるシステムで70言語以上の翻訳に対応している。量子コンピュータもよく似た利用方法が考えられる。

クラウド下で、量子コンピュータを使ってプログラムすることはすでに実現している。もっとも、より現実的な問題を量子コンピュータで解くのは、今後数年から数十年待たなければならないだろう。しかし、限られた少数の量子ビットしか取り扱えないことに我慢すれば、量子コンピュータの計算環境は提供されているのである。例えば、2020年1月現在、IBM (IBM Quantum Experiences <https://quantum-computing.ibm.com/>) や Amazon (Amazon Braket <https://aws.amazon.com/jp/braket/>) (AWS:アマゾンウェブ サービス)が量子コンピュータを使って計算する環境を提供している。さらに、IBMは、量子コンピュータ用のプログラミング言語 Q#を公開している。Amazonでは、notebook style のインターフェイスを通して、PythonでAmazon Braket SDKのコードを作成させる。こうしてみると、量子コンピュータは、すでに身近に存在していると言える。

5. 量子コンピュータに対する意識調査

急速な発展が期待される量子コンピュータの研究分野では、若い学生の挑戦が待たれている。そこで、工学部の学生に対して量子力学・量子コンピュータに関するアンケート調査(アンケート用紙は付録を参照)をおこなった。創造演習Ⅱ(必修単位)を受講している機械・システム工学科ロボティクスコースの3年生が対象であった。54名の学生からの回答が得られた。内訳は、男性47人、女性7人、平均年齢20.9歳(男子学生20歳12人、21歳28名、22歳7人、女子学生21歳7人)であった。アンケート結果をまとめたものを表1に示す。

アンケート結果を質問1から質問9まで順に見ていこう。質問1から、1人を除きほぼ全員が量子力学という言葉を知ったことがあることが分かる。さらに、質問2より、機械・システム工学科ロボティクスコースでは、必修科目として量子力学の授業が開講されていないにもかかわらず、76%の学生が量子力学の勉強をしたことがあると回答している(注:選択科目(半期のみ:2年~4年生対象。教科書は、小野寺嘉孝の演習で学ぶ量子力学^[38]、非常勤の方が担当)としての量子力学の授業はある)。アンケートか

ら、工学部の学生が量子力学に興味を持ち、かつ勉強したいと思っていることが分かった。しかし、質問3で、量子力学と古典力学の違いについて説明できると回答した学生は54名中3名にすぎなかった。このことは、質問4で、不確定性原理について説明できると回答した学生が6名であったこととほぼ合致している。しかし、小野寺嘉孝の教科書の3章が不確定性関係であることからすると不思議と言える(なお、教科書では、併記はしているが、不確定性原理を不確定性関係と記しているのが原因かもしれない)。

表1 量子力学・量子コンピュータについて*

質問内容	人数	人数	人数
1 量子力学という言葉を知ったことがありますか	ある 53	ない 1	——
2 量子力学の勉強をしたことがありますか	ある 41	ない 13	——
3 量子力学と古典力学の違いを説明できますか	できる 3	できない 42	わからない 9
4 不確定性原理を説明できますか	できる 6	できない 41	わからない 7
5 物理学は好きですか	はい 30	いいえ 24	——
6 力学は得意でしたか	はい 22	いいえ 25	わからない 7
7 量子コンピュータを知っていますか	知っている 33	知らない 21	——
8 量子コンピュータに興味がありますか	ある 23	ない 12	わからない 19
9 量子コンピュータについて勉強をしたいと思えますか	はい 23	いいえ 12	わからない 19

*2020年1月23日創成実験Ⅱの後にアンケートした結果(回答54人)。

次に、量子力学を離れて、より一般的な物理学に対する意識に関して、アンケート結果を見ていく。質問5の物理学が好きであると考えている学生が30/54(56%)、質問6の力学が得意であると思っている学生がわからないと回答した学生を除くと22/47(47%)であった。これらの結果は、工学部の学生だから物理が好きで、力学が得意だとは言えないことを意味する。約半分の学生は、物理学が好きではなく、力学も苦手であると思っている。

最後に、量子コンピュータに関する質問をおこなった。質問7より、量子コンピュータに関しては、33/54(61%)の学生が知っているという回答結果を得た。また、分からないと答えて判断を保留した回答19人を除くと、量子コンピュータに興味があると回答した学生が約6割(23/35(66%))にのぼることが分かった(質問8)。また、質問9において、量子コンピュータについて勉強したいと答えた学生は、興味を持つと回答した学生と同数であった(なお、興味を持

った学生全員が勉強したいと回答したわけではなかった。たまたま、結果として同数になった)。興味がある学生の多くが勉強したいと思っていることが分かった。

6. おわりに

量子コンピュータにいたる計算機の歴史を振り返ることで、量子コンピュータの超越性あるいは学ぶべき理由を考えてきた。しかし、工学部では、量子力学の授業をおこなっていない学科が多い。それゆえ、量子コンピュータを勉強する必要性を感じないことがと多いかもしれない。アンケートの結果でも、34%(12/35)の学生が量子コンピュータについて興味がないと回答している。逆に言うと、約3分の2の学生は、新しい量子コンピュータを学んでみたいと考えている。これは、単に量子力学の勉強をさせるのではなく、量子コンピュータなどのトピックを紹介することにより、基礎となる量子力学などの学習に対する動機づけとなるのではないだろうか。

本論文では、量子コンピュータに至る計算機発展の歴史を振り返り、量子コンピュータを学ぶ意義を考えた。同時に、他大学を含め工学部で量子力学の授業がどのようにおこなわれているのかを調べた。さらに、現在の量子コンピュータの状況について調べ、すでに量子コンピュータが身近な存在であることが分かった。工学部の学生が新しいテクノロジーである量子コンピュータにどう取り組むかは、本論文だけでは完結しない大きなテーマである。本論文は、量子コンピュータをどう学ぶかの概要に相当する。

今後、量子コンピュータを使ったプログラミング、量子コンピュータの実現および現実的な応用について議論を展開したいと考えている。具体的には、量子ビットの具体化を通じた様々な量子ビットのメリットとデメリット、量子超越性に関連したショアのアルゴリズムなどソフトウェア、さらに IBM の Q# を使った量子コンピュータのプログラミングなどを介して、工学部学生の教育と量子コンピュータの可能性を議論する予定である。

謝 辞

論文を執筆するにあたり、議論および有益なコメントをしてくださった高田宗樹教授、大学院生の高津和紀君をはじめとする研究室のメンバーに感謝いたします。

参考文献

- [1] F. Arute et al.: Quantum supremacy using a programmable superconducting processor, *Nature*, 574, 505-511 (2019).
- [2] M. Brooks: Before the quantum revolution with decades still to go until the first general-purpose quantum computers, the race is on to make today's systems useful, *Nature*, 574, 19-21 (2019).
- [3] E. Gibney: Google publishes landmark quantum supremacy claim, *Nature*, 574, 461-462 (2019).
- [4] William D. Oliver: Quantum computing takes flight, *Nature*, 574, 487-488 (2019).
- [5] 長橋賢吾: よくわかる最新量子コンピュータの基本と仕組み, 秀和システム, pp. 159 (2018).
- [6] 宇津木健著, 徳永裕己監修: 絵で見てわかる量子コンピュータの仕組み, 翔泳社, pp.173 (2019).
- [7] 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, pp.165 (2016).
- [8] P. Benioff: The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines, *Journal of Statistical Physics*. **22** (5), 563–591 (1980).
- [9] P. Benioff: Quantum mechanical Hamiltonian models of Turing machines. *Journal of Statistical Physics*. **29** (3), 515–546 (1982).
- [10] David Deutsch & Richard Jozsa: Rapid Solution of Problems by Quantum Computation, *Proceedings: Mathematical and Physical Sciences*, vol. 439, pp. 553-558 (1992).
- [11] Peter W. Shor: Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring, *Proceedings, 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, Santa Fe, November 20-22, IEEE Computer Society Press, PP. 124-134 (1994)
- [12] Lov K. Grover: A fast quantum mechanical algorithm for database search, *Proceedings, 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing (STOC)*, May, pp. 212-219 (1996).
- [13] 古澤明: Blue backs B1648 古澤明の量子テレポーテーションー瞬間移動は可能なのか?ー, 講談社, pp. 185 (2009).
- [14] 解説アーカイブ (2017年09月29日金曜) 量子コンピューターはくらしを変える? 土屋敏之解説委員
- [15] 上田皖亮: 非線形性に基づく確率統計現象ーDuffing 方程式で表わされる系の場合, *電気学会論文誌 A* 第98巻, pp. 167-173 (1978).
- [16] 情報処理学会 HP: IPSJ コンピュータ博物館 /www.ipsj.or.jp/ IPSJ

- [17] ENIAC at Penn Engineering:
/www.seas.upenn.edu/about/history-heritage/eniac/
- [18] IBM HP (ibm.com) 誕生から 55 年 IBM メインフレームはどこまで進化しているのか
- [19] [PDF] 全国共同利用大型計算機システム利用の手引き-東京大学-
<https://www.cc.u-tokyo.ac.jp/public/VOL4/No2/tetsuzuki-gaiyou.pdf>
- [20] 学術情報メディアセンター 京都大学情報環境機構 -沿革-
www.media.kyoto-u.ac.jp/accms_web/wp-content/uploads/2016/03/ACCMS-2016-history.pdf
- [21] 北海道大学情報基盤センターHP センター概要 沿革 <https://www.iic.hokudai.ac.jp/overview/history/>
- [22] 東北大学サイバーサイエンスセンター HP センター概要 沿革
<https://www.cc.tohoku.ac.jp/enkaku.html>
- [23] ちょっと名大史 大型計算機センターの設置
[Nua:nua.jimu.nagoya-u.ac.jp/upload/meidaishi/210/180737dc73934291f11496e8142b5444.pdf](http://nua.nua.jimu.nagoya-u.ac.jp/upload/meidaishi/210/180737dc73934291f11496e8142b5444.pdf)
- [24] 大坂大学 サイバーメディアセンター
https://www.cmc.osaka-u.ac.jp/?page_id=89
- [25] 九州大学情報基盤研究開発センター 研究用計算機システム <https://www.cc.kyushu-u.ac.jp/scp/>
- [26] 統計数理研究所 HP 統計数理研究所 計算機展示室 <https://www.ism.ac.jp/ism-tour/>
- [27] CRAY Homepage company history
<https://www.cray.com/company/history>
- [28] C. H. Bennett, G. Brassard: Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing, Proceedings of IEEE International Conference on Computers Systems and Signal Processing, Bangalore India, pp. 175-179 (1984).
- [29] T. Kadowaki & H. Nishimori: Quantum annealing in the transverse Ising model, Phys. Rev. E, 58, 5355 (1998).
- [30] D-Wave Systems Inc. HP
<https://www.dwavesys.com/>
- [31] 竹内繁樹: 量子コンピューター超並列計算のからくり-, 講談社 BLUE BACKS, pp. 272 (2005).
- [32] 小出昭一郎: 量子論(改訂版), 裳華房, pp.194 (1990)(注; 1968 年第 1 版).
- [33] 小出昭一郎: 量子力学 I (改訂版), 裳華房, pp. 265(1990) (注: 1969 年第 1 版).
- [34] 小出昭一郎: 量子力学 II (改訂版), 裳華房, pp. 213 (1990)(注: 1969 年第 1 版).
- [35] P. Dirac: The Principles of Quantum Mechanics fourth edition, Oxford University Press, London, pp.312 (1958)(量子力学 原書第 4 版, ディラック著, 朝永振一郎, 玉木英彦, 木庭二郎, 大塚益比古, 伊藤大介 共訳, 岩波書店, pp. 474(1968)).
- [36] 朝永振一郎: 量子力学 I, みすず書房, pp. 294 (1980).
- [37] 朝永振一郎: 量子力学 II, みすず書房, pp. 447 (1980).
- [38] 小野寺嘉孝: 演習で学ぶ量子力学, 裳華房, pp. 185 (2002).

付録 Appendix

量子コンピュータについてのアンケート

2020年1月23日

年齢 歳 性別 男 女

1. 量子力学という言葉聞いたことがありますか？
 ある ない
2. 量子力学の勉強をしたことがありますか？
 ある ない
3. 量子力学と古典力学の違いを説明できますか？
 できる できない わからない
4. 不確定性原理を説明できますか？
 できる できない わからない
5. 物理学は好きですか？
 はい いいえ
6. 力学は得意でしたか？
 はい いいえ わからない
7. 量子コンピュータを知っていますか？
 知っている 知らない
8. 量子コンピュータに興味がありますか？
 ある ない わからない
9. 量子コンピュータについて勉強をしたいと思いませんか？
 はい いいえ わからない

ご協力ありがとうございました。

情報の取り扱いについて
 本アンケートで得られた結果は、研究のみに使用します。

