

## 6

コンピュータの上流と下流を  
つなぐ電子工作

■秋田純一（金沢大学）

## コンピュータのブラックボックスを解くこと

フィジカルコンピューティングの基盤となる「電子工作」は、古くは鉱石ラジオや真空管アンプなど、最近では簡単な電子ゲームやロボットなど、ホビーや夏休みの工作の定番でした。その多くは、必要な部品や説明書がセットになって販売されていて、半田ごてなどの工具を用意するだけで、自分で「作ることができました。その電子工作は、コンピュータの進化と密接にかかわりながら発展してきた分野があり、フィジカルコンピューティングは、それが一気に花開いた形であると言えます。その一方で、コンピュータそのものは高度化・複雑化し、高機能となってきたものの、その中身のブラックボックス化が言われて久しい、という事実もあります。

本稿では、筆者が考える、コンピュータのブラックボックスを解くことの意義と、そのための手段としての「電子工作」について述べたいと思います。

## 1980年代のコンピュータと電子工作

この本の読者の皆さんにコンピュータの歴史を述べるのは、まさに釈迦に説法ですが、私の青春時代である1980年代のコンピュータとのかかわり方について振り返ってみたいと思います。1980年代といえば、世界初のマイクロプロセッサであるインテル i4004 が発表されてから生まれた、パーソナルコンピュータの黎明期でした。その時代をよく知る方ならばご存知であろう、NEC の TK-80 や PC-8001、SHARP の MZ-80K、Apple の Apple II などの時代

です。またこの時代のホビー向けのコンピュータ雑誌としては、Bit、I/O やマイコンベーシックマガジンなどがありましたが、この時代には、次のような共通点があったと記憶しています。

- (1) パソコン本体のマニュアルには回路図が載っていて、雑誌にも改造記事が載っていた。
- (2) ゲームなどのプログラムリストが載っていて、自分で打ち込んで実行させた。

(1) の改造は、近年の PC の CPU や拡張ボードを差し替えるというレベルではなく、拡張ボードを自作したり、または本体基板のパターンを切って信号を取り出すようなものも、よく載っていました。またプログラムリストも、BASIC だけでなくマシン語のダンプリストの数字の羅列をひたすら打ち込んだ経験をお持ちの方も多いと思います。

これらの時代には、コンピュータは、まさに電子工作の対象であり、回路図で CPU のバス配線を読み取ったり、入出力端子につなぐアンプなどの回路を自作するのも一般的でした。これは、コンピュータと電子工作のユーザが一致していたのも大きな原因だとは思いますが、この時代のコンピュータは、回路図上の信号を追いかけて理解することが、まだぎりぎり可能な規模のものであったことが、最も大きな原因ではないかと思います。つまり、論理回路のステートマシンの動作としての CPU の命令実行と、それに伴うアドレス・データバス上のやりとり、メモリへのアクセスなどが、まだ一人の頭で、頑張ればつなげて理解できるものであったと思います。もちろんパソコンをブラックボックスとして、趣味

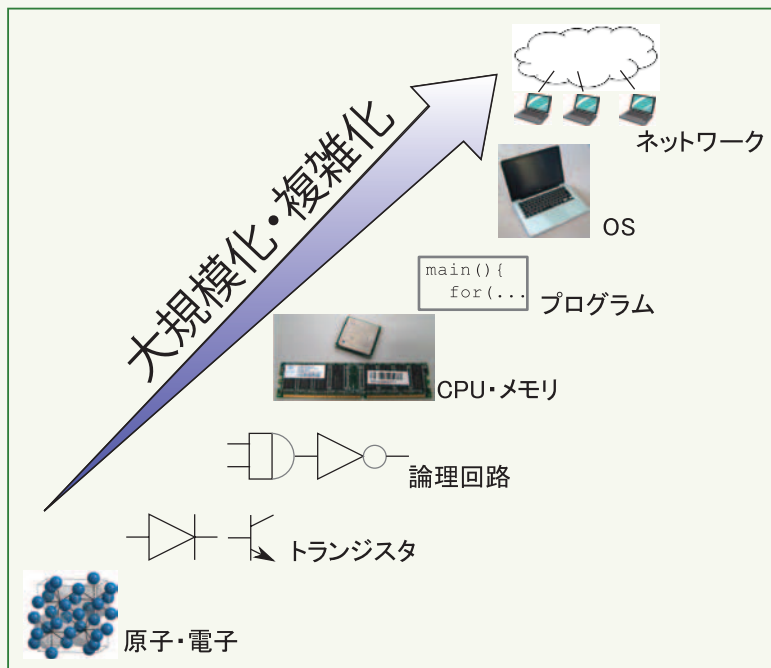


図-1 コンピュータの階層構造

や仕事に「使う」ユーザも多くいましたが、この時代のコンピュータは、一人の人間が、ソフトウェアの世界とハードウェアの世界を通して理解することができる時代だったのではないかと思います。

## コンピュータの複雑化

ところが1990年代以降、ご存知の通り、コンピュータは高性能化・複雑化の一途をたどります。ソフトウェアの世界では、たとえばMS-DOSからWindowsに代表される、CUIからGUIへの大きな流れが生まれ、またインターネットの普及も重なって、多くの人々がコンピュータを「道具」として使うようになりました。それが社会にどのような影響を与えてきたかは、ここで述べるまでもありません。またこれに合わせてソフトウェア自体が大規模化・複雑化・高機能化してきたことで、ソフトウェア開発のための言語や開発環境も、オブジェクト指向型言語のように、ソフトウェア開発効率を高めるために、高度に抽象化されてきました。

一方のハードウェアの世界は、行すべき処理が多様化・複雑化するのに合わせて、高速化・高機能化の道を進んでいきます。すなわちムーアの法則に支えられてきたCPUの高速化やメモリの大容量化、

RISCのような計算機アーキテクチャの革新、PCIや高速Ethernet、WiFiなどのインターフェースの高速化・高度化が進められてきました。

その結果、おそらく多くの人々が、なんとなく感じているのではないかと思います。私は、ソフトウェアの世界とハードウェアの世界が、つながっているのかが徐々にあやしくなっているような気がしてなりません。もちろん、コンピュータは、すべての挙動が把握できる構成要素を組み合わせで成り立つ、完全な決定論的システムですから、半導体中の電子の挙動のレベルから、トランジスタ回路、論理回路、コンピュータアーキテクチャ、OS、コンピュータネットワークに至るまで、すべての階層(図-1)の挙動や仕組みは完全に理解されているはずですが、ところが、システム開発の現場では、2つの世界の分断を感じる方も多いのではないかと思います。すなわち、書いたソフトウェアの動作が遅いときに、CPUの命令実行レベルで原因を探ることはほぼ不可能ですし、トランジスタを組み合わせでPentiumのようなCPUを自作することも、ほぼ不可能でしょう。これらは、ただ規模が大きいため手間がかかりすぎて現実的ではない、という面もあると思うのですが、では十分な時間とやる気があれば、

これらの作業は、はたして一人あるいは数人のグループが行うことは可能なのでしょうか？ どうも私には、近年のコンピュータは、そろそろ、どれだけ時間と手間をかけても、両者をつなぐことが不可能になりつつあるような気がしてなりません。

これは、生物学における階層構造とその分断と共通するものがあるように思えます。すなわち、本来は生物を構成する原子・分子のレベルからタンパク質、核酸、細胞、器官、動植物に至るまで、それぞれの理解・とらえ方の階層があり、またそれぞれの階層は相互に現象・理解が連続しているはずですが、しかし学問体系としては化学と生物学（医学や脳科学も含む）ははっきりと分かれているのが現状です。

私は、いずれコンピュータのソフトウェアとハードウェアの世界の分断が、化学と生物学などのように決定的なものとなることを非常に危惧しています。コンピュータの世界は基本的には決定論的であるという仮定が崩れない限りは、仮に両者の分断が起こってもコンピュータそのものの動作には支障はないでしょう。しかしムーアの法則に沿った半導体技術の進歩の結果、原子数10個分の大きさのトランジスタが現実的となりつつあります。そこでは、トランジスタの特性を決めるための不純物濃度のばらつきや、電子のトンネル効果によってトランジスタの動作そのものが、必ずしも理想的なモデル通りではないということが現実起こってきています。それでもコンピュータは、その構成要素であるトランジスタの動作が完全であることが前提で成り立っているシステムですから、これらの非理想的な現象を抑え込むために多大な努力がなされています。幸い、今のところトランジスタが理想的な動作をするというコンピュータの大前提は崩れていないのですが、今後、徐々に、確率的に誤作動をする素子の数が、統計的には無視できない数になってくるのは避けられない事実です。そのような理想的ではないトランジスタからなるコンピュータは、大前提である決定論的システムとはなり得ず、コンピュータシステムそのものが成り立たなくなることとなります。もちろんそれに対して、ソフトウェア的に冗長系を構成

するなどの対策もありますが、これは、私たちの体に現れる癌細胞に対して、化学と生物学という分断した学問体系しか持たない我々が現実的にとる対処方法に似ているように思えます。本来は原子・分子のレベルで癌細胞の発生メカニズムがあるわけですが、現実的にはそのレベルから解明ができず、外科的・内科的治療という生物学的な対処療法を行うしかありません。

完全にソフトウェアとハードウェアが分断化したコンピュータの世界では、どちらかにこのような「癌細胞」が現れた場合に、分野をまたがった原因究明と対処が不可能となることは、十分にあり得ると思います。ここまで極端ではないにしても、たとえば私の実家のHDDレコーダは、電源OFFの状態ではEjectボタンを押すとトレイが開くまでに約45秒かかるのですが、これは家電製品としては実用的な時間とは言えません。しかし組み込まれているソフトウェアの開発者にとっては、ハードウェア（CPUでの1つ1つの命令実行レベルなど）が見えないように抽象化された言語・開発環境では、たとえば「オブジェクトの初期化」が実際に命令数でいくつになるのかは、とても考えることはできませんし、そもそも電源ON後にリセットベクトルの分岐先からどのような過程を経てメインルーチンに至るか、を実行命令レベルで追うことはほとんど不可能です。その結果、おそらくCPUでの命令実行レベルで最適化をすれば、このようにトレイが開くまでに45秒かかるようなことは起こらないはずなのですが、システム開発の現場としては、もっと速いCPUを使うか、メモリを増やすぐらいの対策、つまり「ソフト屋ではお手上げなのでハード屋がなんとかしてほしい」という対策しか講じることができなくなってしまいます。

## 電子工作と「マイコン」

一方の電子工作の世界では、長らくトランジスタレベル、または論理IC（TTL）の回路が一般的で、そのため、コンピュータのような複雑なことができる工作は、ほとんどありませんでした。



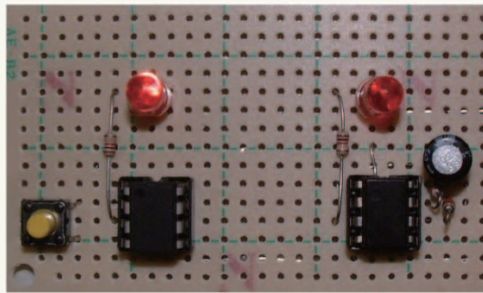


図-2 LEDを点滅させる回路(右:発振回路(555),左:マイコン).  
両方とも部品代は200円程度だが、部品点数はマイコンの方が少なく、かつ点滅周期変更などの機能が高い。

ところが、ムーアの法則によって高度に進化したコンピュータの製造技術を、逆にコンピュータの小型化・低価格化に向けてすることで、いわゆる「ワンチップマイコン(マイコン)」が登場しました。製品としては、日立(現ルネサスエレクトロニクス)のH8シリーズ、MicrochipのPICシリーズ、AtmelのAVRシリーズなどが、秋葉原などの電子部品店の店頭でも1,000円程度という安価で購入でき、ホビーとしての電子工作で使われる機会が多くなりました。これは、動作ロクは数MHz程度、演算性能で数MIPS程度しかなく、メモリも数KBしかありませんが、これらを1つの部品として統合しているため単体で動作でき、またプログラムメモリをフラッシュメモリなどの書き換えが容易な不揮発性メモリとして使いやすさを高め、さらにコンパイラなどのソフトウェア開発環境もセット(しかも無償で使えるものが多い)にしたものです。つまりマイコンは、いわば枯れた技術の組合せなのですが、マイコンの登場は、電子工作の世界に大きな革新をもたらすこととなります。すなわち、それまではトランジスタや論理ICの組合せしかできなかったの、「できること」に限界があり、一方でマイコンではないコンピュータは、それなりに高価で使い勝手が悪く、「お手軽に使う」ものではなかったのですが、マイコンという、小さいながらもコンピュータがお手軽に電子工作で使うことができるようになり、複雑な挙動を示す電子工作が現実的となりました。また複雑な挙動だけでなく、たとえば「LEDを点滅させる」という、普通に考えれば発振回路で組むような

ものでも、ワンチップマイコンでソフトウェア的に無限ループをまわすという、いわば「ぜいたくな」使い方も、価格や回路規模の面で現実的な選択肢となってきました(図-2)。すなわち、マイコンは、電子工作のパラダイムをも変えつつあるといえます。

## フィジカルコンピューティングとその先へ

### ■ フィジカルコンピューティングの階層

このマイコンの登場により電子工作の中に入ってきたコンピュータを、さらに使いやすく仕上げたものや、それを使った工作の世界が、フィジカルコンピューティングの世界であると思います。すなわちコンパイラなどの開発環境の使いやすさの向上や種々のライブラリの整備などのソフトウェア面と、USBでPCに接続するだけで使用でき、また周辺回路も半田付け不要のブレッドボードで手軽にテストできるなどのハードウェア面、さらにはそれらの導入や発展を支える教材やそれを生み出すコミュニティ面のすべてがあって、フィジカルコンピューティングが生まれたのだと思います。それにより、いままでは電子工作とは無縁であった多くの人が、(意識的、無意識的に)電子工作を取り込んでいることは、結果として電子工作の裾野や応用分野が大きく広がることになりました。

フィジカルコンピューティングの世界では、導入のしきいを下げるために、物理層に近いところは、ある程度ブラックボックス化されています。たとえばLEDを接続するときを使う電流制限抵抗の値を正しく求めなくても、かなり適当な値の抵抗器を使えばそれなりにLEDが点灯しますし、I/Oポートや内蔵回路の制御をLED\_On();のような関数に抽象化しています。このような抽象化された関数では、CPUの命令実行サイクルレベルでの厳密なタイミングは制御できませんが、実用上はほとんど気になりません。このように物理層をある程度ブラックボックス化することで、電子工作の先にあるもの、「工作として作りたいもの」を具現化する手段として、非常に有用なものとなっていると言えます。

ところが、たとえば作ったものが動かない、また



図-3 マイコンブの活動風景

は壊れた、という現象に遭遇したとき、このようなブラックボックス化に慣れてきた人は、困ってしまいます。たとえばマイコンのI/OピンにLEDを直接接続して、そのLEDに電流が流れすぎて壊れて(焼けて)しまった場合、その原因を探り、解決策を見出すためには、LEDの電圧-電流特性とオームの法則に立ち入らなくてはなりません。もちろんそのように必要になったときに、より深い世界に入っていくことは、学ぼうとするモチベーションも高いので、知識習得としても有効ですし、それを支えるコミュニティがあることも、非常に心強いものです。

次節では、そのような考えに基づいて私が実践している教育活動について紹介します。

### ■ ボトムアップ式電子工作

私は、学部3年生の選択演習で「ボトムアップ式電子工作」と称した取り組みを行っています。また研究室に配属された学部4年生の導入教育でも、これと連携した取り組みを行っています。後者は、「マイコンブ」と称する研究室内サークル(<http://combu.merl.jp/>)として、各学生が取り組む研究テーマとは別の活動となっています(図-3)。

このマイコンブの活動は、まずLED点滅などの一通りのチュートリアルを終えたあと、電子工作への高いモチベーションを持つために、実現可能性を抜きにして作りたいもののアイデアを出す、とい

う段階から始まります。その後、そのアイデアと実現可能性とのすりあわせを、私や経験豊富な先輩を交えて行い、用いる部品などの具現化するための方策を決定します。その後、各自でそれらの部品の使い方やマイコンとの接続方法について、必要事項を調べたり教わったりし、徐々にシステムを完成させていきます。

システム構築の基盤となるマイコンそのものは、マイコンブ内でのノウハウの蓄積をしやすいするために原則として統一していて、現在は汎用性の高さから、Cypress社のPSoCシリーズを使っています。使うマイコンを統一することで、開発環境の使い方やサンプルプログラムのような導入の際のハードルを低くすることができ、また学生同士での情報交換も促進できています。

具現化の過程では、使う部品に合わせて、センサからのアナログ電圧を読み取ったり、モータに適切な電流を流したり、またはI2Cなどのデジタル通信プロトコルを、1バイト単位や、さらに物理層に近い電圧波形・タイミングのレベルで理解する必要があるなど、物理層に近い知識も段階に応じて必要となります。もちろん、これらの知識は、自分で調べるだけではなかなか解決できませんから、適宜先輩に教えられたり、調べ方を教えられたりすることで、徐々に具体性の伴った知識習得がなされていきます。そしてこのように得た知識や経験は、どれほど些細なことであっても、マイコンブWiki内に「作業日誌」として記録することをルールとしています。たとえば電流制限抵抗の計算を間違えてLEDが焼けたような本人にとっては恥ずかしいことでも、その事実と解決方法、およびそれに至った過程や未解決の問題点を記録し、またそれに対して知っている人が解決策などをコメントとして投稿していきます。このようにしてノウハウが蓄積されていくと、ほかの人が似た後で同じ問題にぶつかったときに、解決策やそこに至る過程を学ぶことで解決できますし、自分自身が後日似た問題に遭遇したとき役立つことも多いようです。それ以外にも自分が作ったユニバーサル基板の裏面の写真をアップロードして、半田



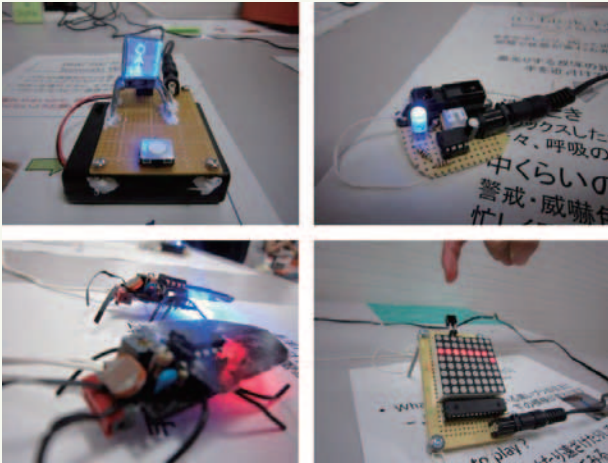


図-4 マイコンブでの学生の作品の例

付けの善し悪しや配線の引き回しのテクニックなどをコメントとして共有することも（最近は停滞気味ですが）実践しています。これは、たとえば半田付けするときの基板の固定方法や半田付けのコツといった、なかなかマニュアル化しにくい暗黙知レベルのノウハウを伝えるのに一定の効果があるようです。

しかしこのような課外活動では、ともすると自己満足で終わってしまい、なかなか完成までモチベーションを維持したりするのが困難なものです。そこでマイコンブでは、最後に完成させた「作品」(図-4)を学内学外の各種イベントで展示したり、その際に「マイコンペ」（これは学生の発案）として人気投票をしたりする機会を設けています。これは、「作ったものを自慢したい」という、おそらく誰もが持っているものづくりに対する心を刺激するものとして、必ずしも学生全員とはいえませんが、本業の研究に支障が出るのではないかと心配するほど力を注ぐ学生もいます。

マイコンブでは、このような相互啓発のコミュニティを、オンライン(WiKi)とオフライン(研究室内活動)の双方で形成することを目指しています。もちろんフィジカルコンピューティングの世界に存在

するような、世界的な(主にオンラインの)コミュニティも大切で有用なのですが、マイコンブのようなオフラインの比率が高い小さなコミュニティは、初心者でも入りやすく、また「自分の作品はたいしたものでもない」と萎縮せずに成果を発信する経験をして、さらにステップアップしていくのに一定の効果があるようです。

このような、まずは作りたいものというゴールを決め、それに向けて部品などの物理的な階層から徐々に複雑・抽象度の高い階層へと学びながら進んでいくというボトムアップ式電子工作と、それを実践するマイコンブの活動の過程では、電圧波形のような物理現象と、マイコン上のソフトウェア開発、さらに場合によってはアセンブラレベルでの最適化などの、コンピュータのソフトウェアとハードウェアの両方にまたがる経験をするることになります。これは、システム内で起こっていることを、ソフトウェア面とハードウェア面の両方にまたがって理解する経験ともなります。そして両方がある程度見えるシステムを作る経験をすることで、さらに必要に応じて、物理層により近い電子回路に入っていったり、またはそれまではPCでしか考えたことがなかったTCP/IP通信や簡易OSのような高度なソフトウェアをマイコンで扱ったりと、それぞれのさらに先へも入っていくきっかけともなります。このボトムアップ式電子工作が、分断化しつつあるコンピュータのソフトウェアとハードウェアをつなぐ知識体系を持つきっかけとなり得ると考えています。

(2011年4月6日受付)

■ 秋田純一 (正会員) akita@is.t.kanazawa-u.ac.jp

1998年東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻修了(博士(工学))。金沢大学助手、公立はこだて未来大学講師、金沢大学講師を経て、2007年より金沢大学理工学域電子情報学類准教授。専門は集積回路とその応用システム。