

2進法の理解からリレー式コンピュータの制作まで

植野義明*

概要

東京立正高校で行っている SPP 講座 [4] について紹介する。今年は本活動の 3 年目にあたり、リレー式コンピュータを制作した。本稿はその講座の狙いの説明、および今年度の活動の報告である。

1 講座の概要

筆者は、東京立正高校（杉並区、私立中高一貫校）において、2 年前から SPP 講座*¹として、数学のクラブ活動指導の支援を行っている。講座 3 年目となる今年度は、リレー式コンピュータの制作という課題に取り組むことにした。

1.1 活動の狙い

情報化社会となり、コンピュータは我々の日常生活に欠かせないものとなった。しかし、その動作原理についてはあまり知られていない。現在の生徒たちは生まれたときから TV、携帯電話などの電子機器に囲まれた便利な環境で暮らしており、その使い方については精通しているが、内部の構造に興味をもつことはほとんどない。また、これらの家電製品の中に含まれている IC チップを取り出して眺めても、内部の構造や動作原理は見えてこない。

数学部の活動計画を考えるにあたって、日常生活の中で使われている数学に光を当てることにした。コンピュータの中では 2 進法が使われているとは、よく聞くことばであるが、それが実際にどのようなことなのか生徒たちはあいまにしか答えられなかった。2 進法を日常生活で使うことはなく、現行課程の教科書にも載っていないので、しかたのないこと

であるが*²。

2 進法が教科書で扱われていたこともあったが、簡単な計算練習に習熟するだけで終わっていた。他分野への応用としては、今回のカリキュラム改訂でもパズルを解くのに使う程度であろう。そこで、IC チップではなく、生徒たちが見てしくみがわかり、自分たちでも組み立てられる材料を使ってコンピュータを作ることによって、実際に 2 進法の原理によって動いていることを確かめられるのではないかと考えた。

材料としては、はじめビー玉転がしコンピュータや水流式コンピュータのような、力学的な「おもちゃ」を考えていたが、検討していくうちに、それらは工作が大変なことがわかった。そこで、秋葉原の電気街で現在でも簡単に手に入るリレーを使うことにした。電気の流れは目に見えないが、スイッチや豆電球を導線で繋ぎ、スイッチを手で操作したり、豆電球が点いたり消えたりするのを目で見たりすれば、構造的な仕組みをより体感できる。

論理回路の構築にリレーを使うのは教育的にすぐれたアイデアである。実際、スイッチを直列に繋がれば AND 回路ができ、並列に繋がれば OR 回路ができる。電池や豆電球の直列、並列は小学校の理科でも学習する。水流やビー玉では答が出るのに時間がかかり、思った通りの結果になるように制作するのは難しいが、電気回路であれば、回路図の通りに導線を繋ぎさえすれば比較的容易に正しい答に到達

* Associate professor, General Education and Research Center, Tokyo Polytechnic University, Received Sept.16, 2011.

*¹ 科学技術振興機構のサイエンスパートナーシッププロジェクト。

*² 来年度から使用の高校教科書では「整数の性質」の章で 2 進法が扱われる予定である。

する。

1.2 コンピュータの演算素子の歴史

リレー式コンピュータの制作は、1960年代に1つのピークがあったのではないと思われる [1]。

コンピュータの歴史では、1964年から第2世代コンピュータのトランジスターに代わって、第3世代コンピュータのICが始めていた。その前の時代は真空管である。

従って、リレーはコンピュータの素子としては標準的に使用された時代はなかったと思われるが、NTTでは、電話交換機を部屋いっぱいのリレーを使用して組み立てた時代があったとのことである。また、コンピュータの創成期に、富士通の研究所でリレー式コンピュータを試作したことがあった*3。2009年3月2日、富士通リレー式計算機「FACOM128B」が第一回情報処理技術遺産に認定された。富士通ミュージアム池田記念室に「富士通リレー式計算機 技術継承プロジェクト」として、この機械が展示されている [2]。

リレーは現在でも製品としてさまざまなものが使用されており、店頭で買うことができる*4。

2 講座の構成

講座の対象者は、東京立正高校数学研究部の生徒約10名であった。

以下に講座の日程と主な内容を記す。6月の2回は授業期間中であり、放課後16:30~18:30に行った。8月は夏季休暇期間中であり、9時半~15時半に行った。最終回も同じ時間帯であるが、講座ではなく、学園祭の機会を利用して生徒たちによる展示発表を行った。

*3 1954年10月に完成されたFACOM 100は、富士通が最初に製作したコンピュータであり、国産初のリレー式コンピュータでもあった。当時、真空管もあったが、真空管は寿命が短く、故障率が高かったこと、富士通が電話交換機を製造していた関係でリレーが豊富に使用可能だったことからリレーが採用された。

*4 折しも、秋葉原電気街の象徴ともいえるラジオ会館が、7月末で閉館し、解体作業に入ったことが報道された。多くのもラジオ少年たちが、別れを惜しみに訪れたとのことである。

5月1日(日)11時~14時半。顧問の教員と部員代表2名と筆者が秋葉原に出かけ、ラジオ会館でいくつかの店を見て回り、必要な部品があるかどうか、注文方法などについて調べた。

6月7日(火)16時半~18時半。部活動で使っている部屋で、2進法について講義し、足し算、引き算、掛け算、割り算の筆算による計算法、また、10進法から2進法に直す方法とその逆について演習を行った。

6月21日(火)16時半~18時半。前回の演習問題をもう一度解き、2進法がわかっているかどうか確認をした。その結果、引き算で用いる「補数」の概念は、10進法の計算ではあまり習わないので、慣れていないことがわかった。2進法の計算では、桁数が多くなってしまうことが難点であるが、計算の原理はやさしい(九九表が小さい)という特徴がある。次に、AND回路、OR回路、NOT回路について説明した。ここでは、論理演算の真偽、2進数での1と0、電気回路でのONとOFFの3者の間に1対1の対応があること、2進法の加法を論理演算を使って構成するという考え方が重要である。

8月1日(月)9時半~15時半。この日までに、業者から部品や工具が届いていたので、使用する部品や工具の確認を行った。特に、ラジオベンチの使い方、直流電源の使い方(ショートしたときにどうなるか)などが重要である。半田ごての使い方はこの時点では練習していない。リレーを各生徒に配り、プラスチックのケースの内部を観察して、どのような仕組みになっているかを考えさせた。回路図でリレーの部分を描く方法について、ネットに載っている回路図を参考に考えた。半加算器の回路図、全加算器の回路図を書いて説明した。全加算器を多数並べることによって、複数桁数の加算器や減算器ができることを説明した。

8月2日(火)9時半~15時半。前日の続き。前日とほぼ同じ内容についても一度確認し、理解の定着を図った。生徒に購入した部品、工具の説明をさせた。実際に作ってみる前の段階では、抽象的な話なので、理解できているかどうか分からない。

2進法の計算問題は解けるのだが、回路とどう結びつくのか、実感が無い。そこで、ともかくも、黒板に回路図を書き、AND、OR、NOT回路の制作を始めた。まだ、はんだ付けはしないで、導線を巻きつけるだけである。終わるころには全員がリレーの各端子（8個ある）の区別ができるようになった。組み立てた回路はプラスチック段ボールの板に住友3Mのはってをはがせるテープで固定することになった。

8月26日（金）9時半～15時半。半加算器は完成したが、それを2個組み合わせた全加算器を作った段階で、リレーが振動を起し、うまく動作しなかった。回路図を黒板に書いて、全加算器が動作しない場合（ $A = X = 1, B = 0$ の場合）の電流の流れを検討した結果、その場合だけ電流の逆流が起り、NOT回路のところでは0-1のスイッチの振動が起っていることがわかった。これは、生徒がリレーの個数を節約して、OR回路のところではリレーを挟まずに入力回路と出力回路を短絡してしまったことに原因がある。このため、電流が意図しない方向に流れた。その部分にリレーを2個挟んだら振動は起らず、正しい計算結果が得られた。後は、この回路図の通りに全加算器に必要な桁数分だけ作って繋げれば、加算器ができることがわかった。

8月29日（月）9時半～15時半。手分けしてそれぞれが半加算器を完成。それを組合せて3～4桁の加算器を完成させ、動作の確認をした。全加算器の回路図を見ているうちに、リレーを2個節約できることがわかった。

9月15日（木）16時半～18時半。指導の最終日。展示物の計画の最終確認。展示当日までに何ができるかを検討する。

10月1日（土）9時半～15時半。学園祭の1日目であり、中学、高校の入試説明会の日程と重なっている。午前中、講堂発表の時間に、数学研究部の活動をパワーポイントを使って発表する。午後からは、教室の半分を使い、制作したコンピュータを展示して、訪れた人に説明、演習実験を行う。今回の講座全体の指導の事後学習。

3 この講座から分かったことと今後の目標

夏休み最後の講座が行なわれた8月29日の段階では、全加算器を組合せて3～4桁の加算器の動作確認までできていた。減算器は加算器から少し繋ぎ方を変えるだけでできること、また、桁数は制作時間がどれだけとれるかの問題であることはすでに生徒たちに説明してあった。

乗算器については、あまり桁数の多いものは出来ないと思うが、桁数が少なくてもよければやる価値がある。また、10進数 \leftrightarrow 2進数の変換器を作りたいという生徒の希望もあった。リレーの動作原理について、だいぶ理解が深まってきたので、これらについては生徒たちに初めから回路図を書いてもらいたい。また、書いてみて改良点に気づくこともある。

9月に入ると、2学期の授業が始まり、生徒たちは部活動にあまり時間がとれなくなった。最終の講座を9月15日に行うことになり、放課後の図書室を借りて、はんだ付けを行った。これまで動作が不安定だった加算器がはんだ付けを行うことによって、安定して動作することが分かった。生徒たちは2進法で3桁+3桁まで（すなわち、7+7の計算まで）のできる加算器と、10進数から2進数への変換器を作ることをこの段階で決断した。

生徒たちは、部活動の目標が学園祭での発表にあることから、コンピュータの動作原理の説明（プレゼンテーション）も考慮しながら手分けして制作している。例えば、回路図と実際の機械内部の配線の対応が見て分かるように導線の色を変えたり、AND、OR、NOT回路の説明のためのパネルを作るなどである。

加算器を収める容器については、5月ごろはアルミ製のシャーシを使う予定であったが、夏休み後半に業者とも相談した結果、より加工しやすいプラスチック製の箱に部品を固定することを検討した。9月に入り、学園祭までの日数が少なくなると、箱に固定するなどの作業にとれる時間がなくなり、また、展示の際に加算器の構造をわかりやすく説明し

たいとの生徒たちの希望もあったので、平らなプラスチックの板の上に部品を固定し、その間を導線で繋いで配線することに落ち着いた。

10月1日の学園祭当日、結局5名の部員が講堂の壇上に上がり、パワーポイントで写真を示しながら、それぞれが担当した部分の説明を行った。以下に、生徒が書いた解説文の一部を紹介する。

- 今まで2進法ということばは聞いたことがあったが、計算方法は知らなかった。しかし、講座を受けて2進法で計算ができるようになり、それがコンピュータのしくみに繋がっているのだと思うと、これからがとても楽しみになった。
- AND回路、OR回路から半加算器の話までいくと、わかる人はほとんどいない状態で、自分もまったくわからなかった。そこで、まず簡単な回路から1人ずつ勉強し、1つずつ作り始めることになった。皆で分担して1つずつ作っていくことで、自分もやっと参加できるようになったと実感した。
- 卒業した先輩も参加し励ましてくれたおかげで、半加算器まで完成できた。長い時間がかかったが、良かった。
- 実際の回路を完成させるのは大変で、まず配線が大変で、ようやくできたかと思うと電気が逆流してしまい、正しく動かなかったり、導線とリレーを繋げるときに隙間があり、電気が流れず、最初からやり直したりした。
- 接続が完了して、皆が息をのむ中でテストすると、見事、「複数ビットの加算器」が完成した。これで $7+7=14$ の計算ができるようになった。
- 加算器はとても良いものです。加算器は $6+7$ などの計算ができます。わかりやすく、見やすいものなので、私たちの努力の結晶を見に来てください。

今回のSPP講座を担当してみて、生徒たちだけでなく講座実施校の教員のコンピュータに対する理解も回を追うごとに深まっていった。クラブの顧問は数学科教員であるが、電気回路の知識はほとんど

なかった。生徒たちも小学校で乾電池や豆電球の直列、並列の違いを学び、中学の理科でオームの法則を少し習っただけであった。

実際に動くものを作りながら、どういう場合に意図した動きをしないかを調べて回路図の間違いに気づくなど、一步一步進んでいくプロセスを生徒たちと共有できた。

もし、機会があれば、今回できなかったもっと桁数の多いものや、減算器、乗算器などの制作も取り上げてみたい。

参考文献

- [1] C. L. ストング (編), 村山 信彦 (翻訳) 『アマチュア科学者一輪ゴムのエンジンから原子破砕器まで』 (白揚社, 1963)
- [2] 富士通りレー式計算機 技術継承プロジェクト
<http://jp.fujitsu.com/museum/relay/>
- [3] 大矢 隆生 『テスターの使い方がよくわかる本』 (技術評論社, 2009)
- [4] サイエンスパートナーシッププロジェクト
<http://spp.jst.go.jp/>