

## 電子計算機の教育についての一方法

瀬戸 博 幸

### 1. はじめに

電子計算機の働きについてその概要を教授する場合、演算・記憶・入力・出力および制御の機能があることはよく言及されるが、なぜ演算可能なのか、どのようにデータが処理されているのか具体化されることが少なく、結果、機械に疎遠のまま機械に翻弄されている様子をしばしば見受ける。果たして初学者にとってこの課題は難解なのであろうか。本稿では電子計算機を機械として具体的に説明する一つの方法について述べる。

### 2. 演算可能性について

まず現在の電子計算機は0と1のデジタルデータに対して様々な演算を行うことができる機械である。その演算可能性は図1のような懐中電灯をモデルに説明をはじめることができる。図1で、スイッチAが開いている場合を0、閉じている場合を1と表し、同様に電球Bが点灯する場合を1、点灯しない場合を0と表せば懐中電灯のふるまいは表1の真理値表に対応する。つまり懐中電灯は入力値Aに対し結果Bを出力する演算機械とみなすことができる。ここでもう少し分析してみると電池および電球で構成する部分はスイッチAが電流を流せる状態か否かを具現する出力装置であり実質的な演算機械はス

イッチAのみで構成されていると考えてよい。

このように考えれば、さらにスイッチ2つで構成する演算機械へと話を展開することが容易である。具体的に部品としてスイッチAとスイッチBの2つのスイッチにより構成される機械を考えよう。機械全体として電流を流せるか否かの状態を結果CとするとAおよびBの構成方法により2種類の機械が出来上がる。一つは図2のように直列に構成する場合であり、その真理値表は表2に示される。もう

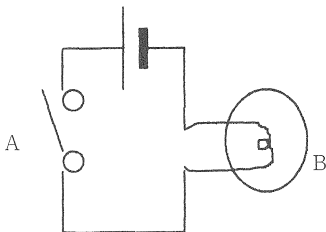


図1 懐中電灯の回路

表1 真理値表

A	B
0	0
1	1



図2 AND演算機械

表2 図2の真理値表

A	B	C
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

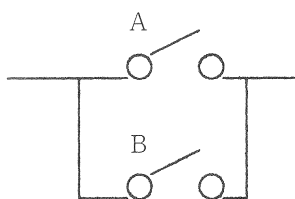


図3 OR演算機械

表3 図3の真理値表

A	B	C
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

一つは図3のように並列に構成する場合であり、その真理値表を表3に示す。結果を見ると図2はブール代数のAND演算を行う機械であり、同様に図3はOR演算を行う機械であることが分かる。

それならばさらにNOT演算を行う機械をスイッチで構成でき、それらを組み合わせることが出来れば様々な演算を行う機械を作ることが出来る。すなわちスイッチで構成される計算機の演算可能性を説明できることになる。

NOT演算を行う機械の説明はこうである。今まで説明に使ったスイッチはすべて常時は開いており、手で押すなどの外部入力があった場合に閉じて電流を流せる状態になるものであった。そこで図4のように常時は閉じており手で押すなどの外部入力があった場合に開くスイッチを使い、外部入力Aが無かった場合を0、有った場合を1とし、機械全体に電流が流れるか否かの結果をBとすると表4の真理値表が得られ、NOT演算が可能であることを示せる。

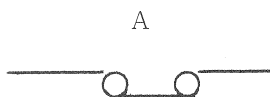


図4 NOT用のスイッチ

表4 図4の真理値表

A	B
0	1
1	0

最後にこれらの演算を組み合わせることについて説明する。今まで説明に用いたスイッチは全て機械的な外部入力が必要とし結果は電流が流れるか否かの状態であるものを考えていた。

この入力と出力の質の違いが組み合わせの概念構築を妨げる要因である。よって入力と出力が同質のスイッチ（これをスイッチング素子とよぶ）を具体的に示せばよい。上記の例に取り上げたスイッチに最も近いスイッチング素子は電磁石の力で機械的なスイッチを制御するリレーである。図5にその模式図を示すように、リレーは電磁石Aのコイルa-b間に流す電流により機械的なスイッチBを制御するものである。端子c-e間を使うこと

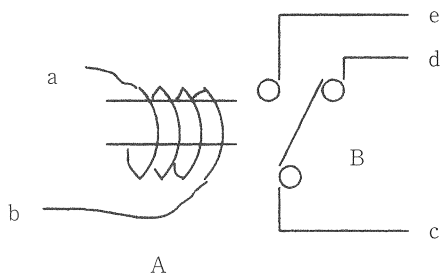


図5 リレーの模式図

により表1の真理値表を実現するスイッチング素子として、また端子c-d間を使えば表4の真理値表つまりNOT演算機械を実現するスイッチング素子として使える。よってリレーを2個つかえばAND演算機械またはOR演算機械も実現可能である。しかし、初学者にとってAND・ORおよびNOTの演算は決して馴染み深いものではなく、その実現可能性を示されたとしてもその有効性を理解しがたいようである。また、その組み合わせとはどのようなものか具

表5 半加算器の真理値表

A	B	C	D
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

体的に示すために、身近な2進数1桁の加算の実現可能性を示す。まず下位からの桁上りを考慮しない加算機械（半加算器）について説明する。元になる2つの値をA, B, 加算結果の上位への桁上りをC, その桁の残余をDとすると加算のふるまいは表5の真理値表として示せる。この半加算器はAND・ORおよびNOTの演算機械を組み合わせることで実現できる。本稿ではそれを数式で示すことにする。基本となる3つの演算を

$$\text{And}(A,B) \quad \text{Or}(A,B) \quad \text{Not}(A)$$

と関数の形で表すことにすると半加算器は式(1)で示すような組み合わせを行えばよいことが分かる。

$$\text{式(1)} \quad \begin{cases} C = \text{And}(A,B) \\ D = \text{Or}(\text{And}(\text{Not}(A), B), \text{And}(A, \text{Not}(B))) \end{cases}$$

下位からの桁上りを考慮した2進数1桁の加算器（全加算器）の実現も簡単であるが本稿では半加算器2個とOR演算器1個を組み合わせればよいことを記述するに止める。以上のようにスイッチング素子を多数使うことによって簡単に演算可能な機械が実現できることを理解してもらえる。この単元を学ぶことにより2進数の概念および2進数の演算を実現する機械を、スイッチング素子により簡単に作れることが理解できる。それに必要な知識は小学校の理科で習得している程度のものである。([1], [2], [3])

### 3. 電子計算機の歴史

現在の計算機の歴史は、それを構成するスイッチング素子の歴史を通して説明すると理解しやすい。2の演算可能性を学んだ者に対してはリレーから出発し、その欠点を補うかたちで真空管、さらにトランジスタへと進んでいることを説明する。また、その実装技術の進歩としてICの誕生からVLSIへと進み、1チップコンピュータが様々な機械や装置に組み込まれている現状を把握させることが出来る。

これらを教授するには実物やビデオを使うのがよい方法である([4], [5], [6])。実際に使用してみるとかなり細かい物や場面が登場するので一斉授業の場合、学習者が画面を占有できるような教材提示環境([7])が必要である。

### 4. ノイマン型コンピュータ

現在のコンピュータの殆どは、メモリに内蔵されたプログラムをCPUが逐次処理し、それによって

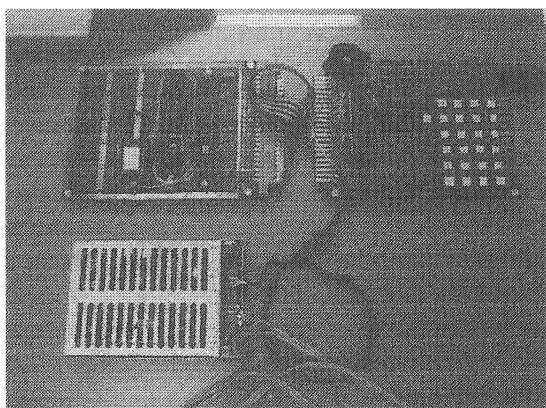


写真1 ボードコンピュータ

様々な入出力装置を制御するノイマン型コンピュータである。このCPUとメモリの役割については、3のように実物やビデオを見せても、言葉だけの説明では理解できる学生が少なかった。我々もCPUのマニュアルを参照しながら写真1のようなボードコンピュータを組み立て実際に使用することで、その概念を習得したと記憶している。しかし、このような組立て作業は工学的な知識を前提とし、また、費用や時間の面からも一般的には現実的でない。そこで、CPUとメモリの働きを、視覚に訴えながら実際にプログラムを

作成し実行可能な仮想的コンピュータ（以下VCPUと呼ぶ。図6）をパソコン上に実現し、それを用いて実習することでCPUとメモリの働きについての概念の習得に役立てている。以下これについて報告する。([8])

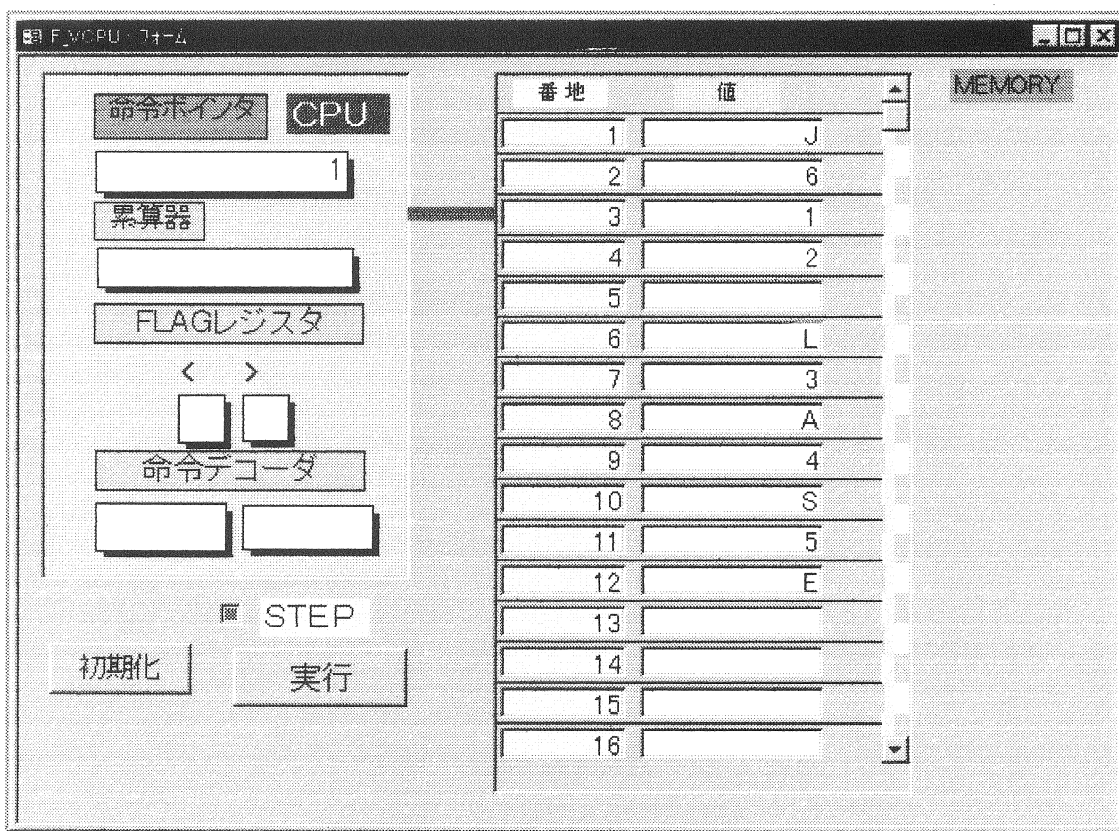


図6 VCPUの実行画面

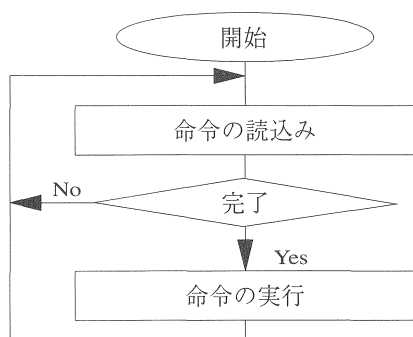


図7 CPUのモデル

表6 VCPUの命令セット

L	Acc ← Mem	J	Jump
S	Acc → Mem	C	大小比較
A	Acc ← Acc + Mem	JE	条件分岐
E	停止		

VCPUを作成するに当たり、はじめにCPUの動作について図7のようにモデル化した。具体的には図6の命令ポインタの値を参照し対応するメモリから命令を命令デコーダに読み込み、読み込みが完了したならば命令を解釈実行することを繰り返すものである。さらにVCPUで解釈可能な命令セットを表6のように定めた。表6のL、S、Aなどは一般にオペレーションと呼ぶものでありCPUがどう振舞えばよいかを表している。この動作の対象を示すものがオペランドであり、オペレーションとオペランドが対になって1つの命令が完成する。オペレーションやオペランドは実際の機械では2進数で表現されているため、ボードコンピュータやそれを模した仮想的なコンピュータでは便宜上16進数で表現し機械語とするものが多い〔9〕,〔10〕が、表現だけの問題であり、そのためにだけ2進16進変換の知識を強要する必要を感じなかったので、VCPUではオペレーションはL、S、Aなどのニーモニックな表現をそのまま使えるようにし、オペ

ランドは身近な10進数がそのまま使えるようにしている。例えば図6の6番地と7番地に存在するL3はオペレーションがL、オペランドが3であり、「3番地のメモリの内容を累算器に複写せよ」という命令である。学生は図6の画面を見ながら、マウスとキーボードを使ってメモリに直接プログラムを作成し、命令ポインタをプログラムの実行開始番地にセットし、実行ボタンを押せば作成したプログラムが実行され、停止命令Eが実行されるまで処理が進む。また、1命令の実行毎に命令ポインタや累算器などCPU内部の値やメモリの内容が変化する。この実行速度は毎秒3命令程度で、動作していることを実感できる。さらに、STEPのチェックボタンをセットしておけば、一命令ごとに実行が停止し実行ボタンによって処理を再開するので、逐次処理される様子を確認しながらすすめることもできる。なお、初期化ボタンは命令ポインタを1にセットし、他のCPU内部の値を空にする。

VCPUが表示するメッセージは二つである。一つは停止命令Eを実行したとき「停止しました」というメッセージボックスを表示する。他の一つは解釈不可能な命令に出会ったとき「実行できない命令です」というメッセージボックスを表示し実行を停止する。よって学生は試行錯誤を繰り返しながら目的のプログラムを作成することが出来る。

ちなみに図6のプログラムは「3番地の内容に4番地の内容を加算し結果を5番地に作るプログラムを1番地から書け」という課題に対する解の一例である。当然、学生は「8番地の内容に9番地の内容を加算し結果を10番地に作るプログラムを1番地から書け」というような、より簡単な課題をすでにこなしている。図6のプログラムはデータエリアと作成しようとするプログラムのエリアが重なってしまう場合の解決方法を問うものであり、これによりプログラムやデータがメモリ上に散在していてもよい

ことを実感する。この概念は I P L などオペレーティングシステムの導入部を理解する上でも役立つものである。

また、無限ループを引き起こすようなプログラムも簡単に作れる。(たとえば 1 番地に J, 2 番地に 1) この場合、実行ボタンを押すと以後マウスは砂時計になり、一般のキーボード入力も受け付けなくなる。結果、C T L + A L T + D E L キーによりタスクマネージャを呼び V C P U そのものを強制終了するより手はない。これにより学生は無限ループの危険性を実感する。

さらに、番地に対応したメモリセルの概念が確立されれば、メモリセルの内容により制御可能なインターフェースの話など、実際に即した計算機のさらなるテーマへの導入も容易である。

## 5. おわりに

本稿では電子計算機のハードウェアをブラックボックス化せず、基本的な仕組みを教育することは重要であり ([11])、また、容易であることを具体的な方法として示した。たしかにパーソナルコンピュータですら 10 年前の大型計算機以上に高性能化し高度なオペレーティングシステムに隠蔽されてハードウェアを知らずとも十分活用できるのであるが、一度トラブルが発生するとパニックに陥るケースも多々みられる。その多くの理由はハードウェアの確かな土台に法った使用をしていないためであり、小中高および大学のコンピュータ基礎教育に一貫性がないこともその要因といえ、多に反省すべき点である。1998 年の教育課程審議会の「審議のまとめ」により高等学校に教科「情報」が必修として設置されることが決定された。本稿のテーマはその内の「情報 B」の「コンピュータの仕組みと働き」に相当する。これを踏まえて小中高および大学のコンピュータ教育についてさらに検討して行きたいと考えている。

## 参考文献

- [1] 教育出版 理科 教師用指導書 小学校 3 年下 (乾電池に電球をつないで)
- [2] 教育出版 理科 教師用指導書 小学校 4 年上 (直列・並列)
- [3] 教育出版 理科 教師用指導書 小学校 6 年下 (電磁石)
- [4] NHK ソフトウェア 「電子立国 日本の自叙伝」 1 (脅威の半導体産業)
- [5] NHK ソフトウェア 「電子立国 日本の自叙伝」 3 (電卓戦争)
- [6] NHK ソフトウェア 「電子立国 日本の自叙伝」 4 (8 ミリ角のコンピュータ)
- [7] 瀬戸ほか 視聴覚機能を持った電子計算機教室の活用 信学技報 Vol. 87 No. 283
- [8] 瀬戸 電子計算機の教育についての一試み 平成 10 年度電気関係学会九州支部連合会大会論文集 P. 140
- [9] 新田ほか ワンボードコンピュータを用いた演習、実習環境の構築への試み 平成 10 年度電気関係学会九州支部連合会大会論文集 P. 154
- [10] 松尾ほか Java による Z80 教育システムの開発 平成 10 年度情報処理研究集会講演論文集 pp. 223-226
- [11] 河村 コンピュータのアーキテクチャ教育 ―小中高の情報教育の本格化を踏まえて― 平成 10 年度情報処理教育研究集会講演論文集 pp. 603-606