

再構成可能な半導体を用いた情報教育用教材に関する提案

Proposal for New Teaching Materials for Information Technology
Using the Reconfigurable Processor, FPGA

八柳 祐一・紅林 秀治

Yuichi YATSUYANAGI and Shuji KUREBAYASHI

（平成19年10月1日受理）

ABSTRACT

A new teaching material for information technology using reconfigurable processor (FPGA) is proposed. Key features in a computer are provided by a central processing unit (CPU). Thus, it is very important for students who wish to become a teacher for information technology to study an architecture of CPU. But unfortunately, a mechanism of CPU is treated as a blackbox. In such lectures, materials are usually text book only and no practical examples are given. A new teaching material we are plan to produce is based on recently-developed FPGA technology. It may be valueable for the students to have a chance to experience the leading technology.

1. Introduction

情報技術は、近年目覚ましいスピードで進化を続けており、留まることを知らない。インターネット、携帯電話など、情報技術の賜は枚挙に暇がない。また、最近の自動車は、燃料の噴出や点火タイミングの調節等をマイクロコンピュータにより制御しており[1,2]、マイクロコンピュータ無しでは走ることができない。このようなマイクロコンピュータに代表される半導体製品(以下略して半導体と呼ぶ)は、社会の様々なところで活躍しており、半導体無しでは生活ができないと考えられるほど、私たちの生活は高度な情報技術の上に成り立っている。

ところで、1種類の特定期用途向け半導体を設計するためのコストは、近年、製造設備の微細化が進んだため、徐々に高くなる傾向にある。携帯電話に代表される中規模の半導体で現在約3億円程度と高額である。携帯電話のように1000万台以上生産されるならば、3億円の設計コストを回収することが可能だが、1機種あたり何万台も生産されることが無い炊飯器や電子レンジでは、専用チップを設計することは不可能である。しかし、汎用CPUとプログラムで代替可能かということ、OSの起動時間が遅かったり、応答速度が遅かったりというハードウェア上の問題が起こるケースが多い。このように、市場が小規模な製品でも手軽に専用チップが作れる技術として、FPGAが注目されるようになった。現在では、前述の炊飯器、電子レンジのみならず、冷蔵庫、薄型テレビにも使われるなど、日本の産業界における存在感はますます大きくなってきている。

これからの情報産業の現場を支える人材を輩出すべく、大学、高専等に科せられた使命は大きいが、

近年の学生は、コンピュータそのものに対して興味を示さなくなりつつある[3]。

高校の教科情報の授業は、ワープロや表計算ソフトの操作を教えるだけの表面的な教育に終わっており、真の情報教育になっていない[4]。しかし、CPUの動作原理を教えることが可能ならば、その根本であるデコーダーや演算回路はブラックボックスではなくなり、コンピュータの本質に迫る授業展開も可能になる。

いわゆる情報機器の要は、CPUである。情報処理技術者試験においても、CPUの動作原理に関する知識が求められている[5]。CPUの動作原理を理解するのは、たやすいことではない。本や資料だけでは、データがCPU内を流れて行く様子や演算回路を理解することは困難であるため、何らかの形で目に見え、かつ体験的に学習できる教材が望まれる。

筆者らは、この問題解決への第1歩として、FPGAを用いて非常に低機能ながら基本機能はきちんと実装された電卓用プロセッサを用いて、半導体の設計技法も網羅した教育系学生のための情報教育の講義(講義名：マイクロコンピュータ)案について、提案を行う。

以下、本論文の内容は、次の通りである。

第2章 プログラマブル・デバイスについて

第3章 教員養成課程でのコンピュータハードウェアに関わる情報教育

第4章 FPGAを用いた教育の利点

第5章 教材の内容

第6章 今後の展望

2. プログラマブル・デバイスについて

2.1 FPGA

論理仕様を電氣的にプログラムすることによって、さまざまな論理回路を実現できるLSIを総称してPLD (Programmable Logic Device) とよぶ。PLDは、図1(a)のように、回路図として何もプログラムされていないブランク状態で生産され、ユーザの手元で図1(b)のように回路図が焼き込まれる。すなわち、1個単位で設計を行えるASIC(Application Specific Integrated Circuit)と見なすこともできる。

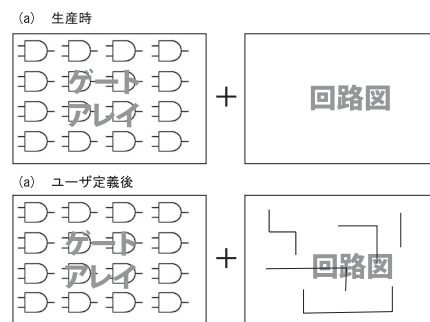


図1 PLD

PLDが初めて現れた1970年代初頭では、「プログラム可能な論理回路」という基本機能はマスクパターンによる金属配線によって実現されていたが、ユーザの現場"Field"でプログラマブルであるという特徴が追加されたFPGA (Field Programmable Gate Array) がXilinx社により1985年に発表されて以後、市場は大きく発展するに至った[6, 7]。FPGAは現在、集積度の点で、いまだASICに及ばないが、その手軽さゆえに活躍の場は広がる一方である。

2.2 HDL

従来、デジタル回路の設計は、人間の手作業で行われるのが主であったが、半導体プロセスの微細化が飛躍的に進み、集積可能なトランジスタ数が飛躍的に伸びた結果、設計すべきシステムの規模も飛躍的に増大し、人間の手作業による回路図作成は一部の熟練者を除いて事実上不可能となった。この状況を解決するべく導入されたのが、HDL (Hardware Description Language) である[8]。

HDLは、デジタル回路の動作や構造を、いわゆるプログラミング言語と同様のスタイルで記述するための言語であり、システム設計における上流から下流にいたる様々なレベルでの記述が可能である。このプログラミング言語流の簡便な記述スタイルは開発者に支持され、ASICの開発で、広く使われるようになった。もちろん、FPGAにおいても、プログラムする回路データを定義するためにHDLが使われている。

その後、様々なHDLが開発、提案され、1990年代当時にはVHDL、Verilog HDL、UDL/I、SFLなどが存在したが、その中で標準化が進められた結果、現在、広く用いられているHDLは、VHDLとVerilogの2種類となっている。

3. 教員養成課程でのコンピュータハードウェアに関わる情報教育

3.1 マイクロコンピュータの講義内容

教員養成課程での情報教育の中で、コンピュータハードウェアに関わる情報教育に関して述べる。情報教育に関する講義の中で、コンピュータのハードウェアの仕組みに関わる内容を扱う講義は筆者らが静岡大学教育学部において担当している「マイクロコンピュータ」である。表1は、マイクロコンピュータの講義内容である。講義は、「コントローラとしてのマイクロコンピュータの仕組みとその制御方法について知見を広める」ことを目標にしており、「高等学校 教科情報」、「技術・家庭科」の免許取得希望学生を対象に行っている。表1の「第2回 マイコンのしくみ」や「第6回 マイコンの回路」の学習内容でもわかるようにマイクロコンピュータの回路について学習する。この回路に関する学習は主に、マイクロコンピュータのCPUからメモリへのデータの流れに関する内容である。また、「第5回 デジタル回路」、「第12回 デジタル信号とアナログ信号」でデジタル回路についても学習できるようになっており、学生は、講義全体を通じてCPUのアーキテクチャ(入出力データの流れ)や入出力信号の処理についての概略が把握できる構成になっている。さらに、「第9回～11回 PICプログラムについて」、「第13回～14回 PICを使った回路作り」により、アセンブリプログラムを体験的に学ぶことを通して、データ処理の流れとプログラムの関係をイメージしやすくしている。

このような講義を通じて、コンピュータハードウェアの基本を学ぶことが可能である。

表1 マイクロコンピュータの講義内容

第1回	マイコンについて	マイコンの応用分野
		コントローラ的な活用が最大の特長
		マイコンの役割
第2回	マイコンのしくみ	CPU
		メモリ
		I/O ポート
		コンピュータの5大機能

第 3 回	マイコンに使う数学	コンピュータに 2 進数を用いるメリット
		2 進数での加算と減算とかけ算
		16 進数を使った表現
第 4 回	論理演算	論理演算とは
		論理和 論理積 否定 排他的論理和
第 5 回	デジタル回路	ゲート回路
		ゲート回路の確認
		NAND 回路を使った実習
第 6 回	マイコンの回路	フリップフロップ回路について
		マイコンの回路
第 7 回	マイコンのプログラムについて	アドレス選択のしくみ
		コンパイラ
		高級言語
		アセンブリ言語
第 8 回	PIC について	フェッチサイクル
		PIC について
		PIC のアーキテクチャに (仕組み) について
		PIC の命令について
第 9 ~ 11 回	PIC プログラムについて	PIC を使った回路について
第 12 回	PIC アセンブラの内容と演習	PIC アセンブラの内容と演習
第 13 ~ 14 回	デジタル信号とアナログ信号	AD 変換と DA 変換の仕組みと回路
第 13 ~ 14 回	PIC を使った回路作り	PIC16F819 を使った回路作り演習 (発光ダイ
		オードの点滅)
第 15 回	まとめ	これからのマクロコンピュータ

3.2 マイクロコンピュータの講義内容の問題点

マイクロコンピュータの講義を通じて、コンピュータハードウェア、とりわけCPUのアーキテクチャについての概略に触れることが可能である。しかし、この講義では、既存のCPUの仕組みを知るには有効であるが、CPUそのものの構築方法を学ぶことができないという問題が生じる。コンピュータのハードウェアに関する内容の学習の多くは、先に述べた「マイクロコンピュータ」の講義に代表されるようにコンピュータの仕組みが決まった状態であることを前提にして、そのアプリケーション(応用形態)を学ぶことがコンピュータハードウェア学習の基になっている。これらの学習は、CPUの中の入出力データの流れやレジスタやメモリー等の理解を深めることや、機械語を使用しそれらを制御するプログラムを作り、そのプログラムによってアプリケーションが如何様でも作れる事実を学ぶことであり、ソフトウェアにより機能が変るといふコンピュータの本質を学ぶ上でも重要である。

しかし、このような学習を繰り返しても、コンピュータプログラムは改変できても、ハードウェアは改変できないというような、生産者依存的な観念から抜け出すことができない。さらに、それは、コンピュータの仕組みそのもののブラックボックス化を助長することになる。

教員養成課程では、将来コンピュータで生計を立てるコンピュータの専門家やエンジニアを育てるような高度な専門教育を施す必要がないという意見も一考に値するが、時代と共に技術が激しく進歩していく現代、コンピュータハードウェアをブラックボックスとした知識だけの高校教科情報や中学校技術・家庭科の教員免許取得者を世に送り出すことが本当に良いことなのか疑問である。技術者養成という視点でのコンピュータハードウェアの講義ではなく、教員養成という視点でのコンピュータハードウェアの講義、いわゆるコンピュータハードウェアをブラックボックスとしない講義が必要である。

4. FPGAを用いた教育の利点

3章では、情報教育においてコンピュータハードウェアに関して学ぶ「マイクロコンピュータ」の講義内容とその問題点について述べた。3章で述べた問題点としてコンピュータをブラックボックスとして扱わないでガラスボックス化(透明化)を図る具体的な方法としてFPGAを使った演習が考えられる。先にも述べたようにFPGAを用いることで、CPUの設計に関する考え方そのものを学ぶことが可能になり、コンピュータハードウェアの中心的位置にあるCPUのアーキテクチャに関して学べるからである。さらに、FPGAの学習に関しては、以下の利点が考えられる。

① HDLの書き方を覚えられる

「ものづくり」大国日本において、これからますます高度化する情報技術を支える人材を育成する努力を教育機関が果たさなければならない。HDLを用いた教材を授業で使うことによって、最先端の技術の一端に触れるとともに、半導体設計に必要な力を身に付けることが可能になる。

② 教員としての資質向上

将来、教員になった時に、ハードウェア的な面から情報処理の仕組みを児童・生徒だけでなく、教員たちにもわかりやすく教えることができ、さらには、教職員のための情報教育研修会においてリーダー的な存在になることが期待できる。

③ CPUの動作原理を、ブラックボックスからガラスボックスへ

ワンチップマイコンを用いた教材では、CPUヘアセンブリプログラムを与え、その結果を観察することがメインの作業となる。しかし、この形態だと、クロックに従ってメインメモリから命令が取り出され、それが実行された結果がどうなるかを知ることができるが、命令がメインメモリから取り出されて以降、実行結果が出力されるまでの途中経過がブラックボックス化されており、CPUの要であるデコーダや演算器の存在に気づかせるのは、無理である。HDL+FPGAの教材では、これらブラックボックスの中身までも、詳しく見ていくことが可能となる。

④ 教材の扱いが手軽である

回路をテーマにした実習では、配線がやっかいである。ブレッドボードの上にICやLEDを配置して動作を確認するような実習は、学生にとって真にやりがいのあることで、大いに実践したい所であるが、現実には時間との兼ね合いで事前に教員が配線等を行っておいたものを学生に手渡して確認させる程度で精一杯のことも多い。しかしHDL+FPGAによる教材ならば、学生側の手間も、教員の事前準備の手間も大いに軽減できる。なぜならば、配線はすべて、HDLという「プログラミング言語」で行うことができるからである。

以上の利点から、FPGAを用いた教材を検討することとした。

5. 教材の内容

教材で扱う内容について、類書[9-12]の内容を精査した結果、浮き彫りになった問題点は、以下の通りである。

① 内容が技術者志向

筆者らが目指す教材は、あくまで「教員養成課程における情報教育用教材」であり、単なる技術者養成ではない。筆者らが考える教員養成課程における情報教育用教材では、まず真空管からトランジスタ、ICに至る技術史を俯瞰した上で、現在の技術の位置づけを行い、その上で、

技術の到達点の一つであるFPGAを示すことによって、情報システム全体の知識を体系的に学ぶことができると考えている。

② 教える側に相当のスキルを要求する

これらの教材では、教える側にハードウェア全体に対する深い知識を要求する。これでは、学生が教員となったときに、実際に授業を行うことはできない。筆者らは、教員には、浅くはこまるが、ある事柄に対する深い知識よりも、体系化された広い知識を要求したい。そこで、そのような教育を行うための教材とすることを目標とする。

以上の点から、筆者らはCPUの動作原理を教えるにあたり、FPGAに実装する機能は、CPUの全機能である必要は必ずしもない、という結論に至った。そこで、インプリメントする機能を絞り、ターゲットシステムを「加減算用電卓」とした。電卓には、CPUの全機能ではないが、重要な機能は一通り必要だからである。なお、インテル社が開発した初代CPU 4004も、電卓用に開発されたプロセッサであったことを申し添えておく。

筆者らが使用したFPGA機材は、次の2種類である。図2はXilinx社製XC3S400-4（40万ゲート相当）を搭載した製品、図3はAltera社製EP1K10（1万ゲート相当）を搭載した製品である。図3の製品は、雑誌の付録として入手可能であり、値段も9,975円と手頃なため、学生実習用の機材として適切である。

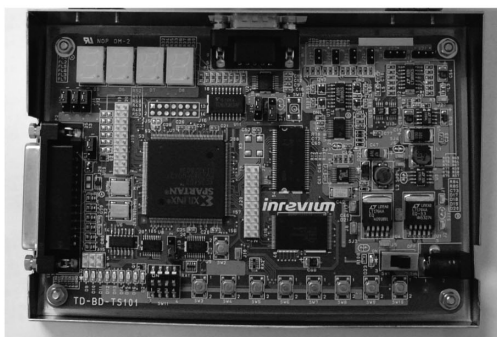


図2 Xilinx社製FPGAボード

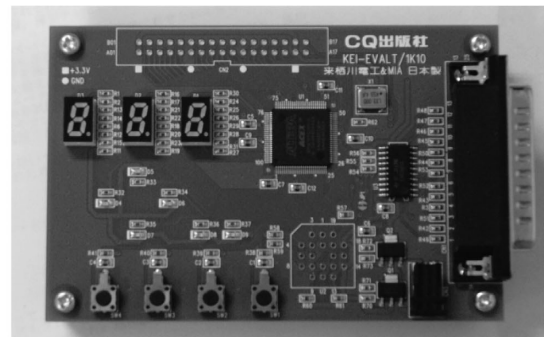


図3 Altera社製FPGAボード

電卓に必要な機能を基本的な要素から順に列挙すると、演算回路（加算回路、補数回路）、メモリ（セル、レジスタ）、制御装置（入力された命令のデコーダ）となる。これらをVHDLにより一つ一つ独立して定義し、それらを積み重ねていくことで一つのシステムができあがる。たとえば、4ビットの加算器を表現するVHDLは、つぎのようになる。

```
library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;
use IEEE.std_logic_unsigned.all;

entity ADDER4 is
    port ( A, B : in  std_logic_vector(3 downto 0);
          Z   : out std_logic_vector(3 downto 0));
end ADDER4;

architecture DATAFLOW of ADDER4 is
begin
    Z <= A + B;
end DATAFLOW;
```

図4 VHDLコード

このVHDLからは、次のような回路が専用ソフト(VHDL用のコンパイラ)によって生成される。

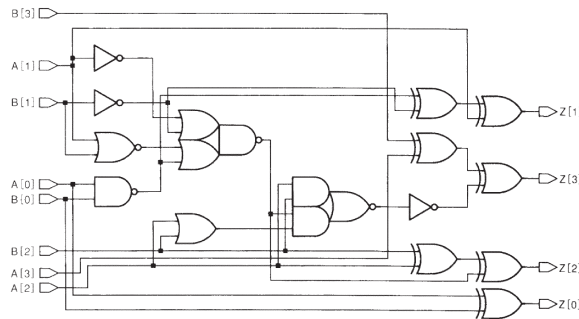


図 5 回路図

6. 現状と今後の展望

現在までで、VHDLにより、半加算器、全加算器、組合せロジック、フリップフロップ、レジスタ、カウンタ等の実装が終了し、個別の部品は大分揃ってきた。今後は、これらをシステムとしてつなぎ合わせる行程に入る予定である。

また、電卓には、残念ながらシステムクロックに同期した命令サイクルの概念がない。機能を限定して、わかりやすい教材を目指した結果とはいえ、命令サイクルはCPUの命であり、可能ならば、マクロ機能などを入れることによって、命令サイクルの考えも理解できるようなシステムにしたいと考えている。

表2は、新たにFPGAの学習を加えた講義内容である。今後、提案した講義を行う学生からの評価をもとに開発した教材と講義内容について評価検討をしていく。

表 2 提案するマイクロコンピュータの講義内容

第 1 回	マイコンについて	マイコンの応用分野
		コントローラ的な活用が最大の特長
		マイコンの役割
第 2 回	マイコンのしくみ	CPU
		メモリ
		I/O ポート
		コンピュータの 5 大機能
第 3 回	マイコンに使う数学	コンピュータに 2 進数を用いるメリット
		2 進数での加算と減算とかけ算
		16 進数を使った表現
第 4 回	論理演算	論理演算とは
		論理和 論理積 否定 排他的論理和
第 5 回	デジタル回路	ゲート回路
		ゲート回路の確認
		NAND 回路を使った実習
第 6 回	マイコンの回路	フリップフロップ回路について
		マイコンの回路
		アドレス選択のしくみ
第 7 回	マイコンのプログラムについて	コンパイラ
		高級言語
		アセンブリ言語
		フェッチサイクル

第 8 回	デジタル信号とアナログ信号	A/D 変換と D/A 変換の仕組みと回路
第 9 回	CPU のしくみについて	CPU における演算
第 10 回	FPGA について	FPGA について FPGA のアーキテクチャ
第 11 回	VHDL について	VHDL の命令
第 12 ～ 14 回	FPGA を使った回路作り	VHDL でゲート回路を組む仕組み FPGA を使った電卓の回路の製作
第 15 回	まとめ	これからのコンピュータ

参考資料

- [1] 雨宮好文、末松良一：「制御用マイコン入門」、pp.2-4、オーム社、2005
- [2] 加藤佐一：「マイコンシステムの基礎知識」、pp.4-5 ECB No.4特集「PICマイコンを使おう」、CQ出版、2000
- [3] 立田ルミ：「新入生が受けた入学前の情報教育の推移と今後の計画」、pp.283-289 情報教育シンポジウム論文集IPSJ Symposium Series Vol.2006, No.8
- [4] 中野由章：「高校専門教科『情報』の現状と課題」、pp.271-276、情報教育シンポジウム論文集IPSJ Symposium Series Vol.2006, No.8
- [5] 独立行政法人情報処理水新機構 情報処理技術者試験センター：「情報処理技術者スキル標準」、http://www.jitec.jp/1_04hanni_sukiru/_index_hani_sukil.html
- [6] CQ出版社編集部：FPGA/PLD設計スタートアップ 2007/2008年版」、CQ出版社、2007年
- [7] 山際伸一：「FPGAボードで学ぶ論理回路設計」、CQ出版社、2005年
- [8] 吉田たけお、尾知博：「VHDLで学ぶデジタル回路設計」、CQ出版社、2006年
- [9] 仲野巧：「VHDLによるマイクロプロセッサ設計入門」、CQ出版社、2004年
- [10] 葉山清輝：「マイクロコンピュータの構造」、<http://www2.ee.knct.ac.jp/~e19hayama/sim/index.html>
- [11] 葉山清輝：「CPUを作ろう」、<http://plaza.rakuten.co.jp/CPU4Edu/> (2007年10月に書籍化：「作って学ぶCPU設計入門」、森北出版)
- [12] 坂本康治：「コンピュータの論理設計」、日本理工出版会、2005年