

## 教育用マイコンボードを用いた HDL 演習環境の実現

重村 哲至 守川 和夫 力 規晃 新田 貴之 原田 耕治 山田 健仁

徳山工業高等専門学校 情報電子工学科

### 要 旨

高専の計算機系学科で低学年の機械語教育用に使用するマイクロコンピュータを開発した。このマイコンは、FPGA に教育用のオリジナル CPU やメモリ、入出力回路を集積し、ワンボードマイコンとして組み立てたものである。高学年では同じマイコンボードの FPGA を書き換えることで HDL の教育に使用できる。

本稿では、マイコンボードを使用した HDL 演習環境の概要、実験科目での使用例と使用した結果について述べる。

## Realization of an HDL Training Environment using Educational Microcomputer

Tetsuji SHIGEMURA Kazuo MORIKAWA Noriaki CHIKARA  
Takayuki NITTA Koji HARADA Takehito YAMADA

Dept. of Computer Science and Electronic Engineering, Tokuyama College of Technology

### Abstract

We developed a board computer named TeC5 for computer education at the lower-grade of technical college. TeC5 provides an original CPU for education, a memory and I/O interface, those are implement on an FPGA(Field Programmable Gate Array). For the upper-grade, TeC5 can be used for education of HDL(Hardware Description Language) design by reconfiguring FPGA.

In the paper, we present an HDL training environment and examples of experiment using TeC5.

# 1 はじめに

計算機系学科における計算機初期教育で学生に計算機の原理を理解させることを目的に、学習が容易な命令セットアーキテクチャを持ち、かつ、ランプやスイッチのON/OFFで2進数を表現するコンソール・パネルと、最小限の入出力装置を装備した教育用のマイクロコンピュータ(以下マイコン)を開発した<sup>[1]</sup>。

このマイコンは、VHSビデオカセットケースに収まるコンパクトなもので、かつ安価なものである。学生が個人で所有し持ち運ぶことにより、学校でも自宅でも機械語の演習が可能である。開発当初は、本マイコンを高専の学生が入学時に購入し、1年次から2年次にかけて機械語学習のために使用することを想定した。

しかし、3年次以降、使用する機会がないのでは全員に購入させるメリットを生かし切ることができない。全員が同じハードウェアを所有しているメリットを生かし、3年次以降も一人1台の演習環境として有効利用することが望ましい。そこで、このマイコンに予めFPGAの学習ボードとしての機能を組み込んだ。すなわち、CPUや周辺回路を実装し、本マイコンボードの核となるFPGAの設計データを書き換えることを可能とした。このことにより学生は、低学年で機械語の学習に使用したマイコンボードを、高学年ではFPGAの学習ボードとして使用できる。

本稿では、このマイコンボードを用いたHDL演習環境と、これを用いた本校の実験科目での使用例と使用結果について報告する。

## 2 HDL 演習環境

今回実現したHDL演習環境は、マイコンボードとFPGA設計環境をインストールしたWindows PCから構成される。使用できる記述言語はVHDLである。

### 2.1 マイコンボード

マイコンボードの外観を写真1に、回路図を付録1に示す。構成は以下の通りであり、FPGA学習ボードとしても使用可能である。



写真1 マイコンボード外観

#### (1) FPGA

プリント基板の中央やや左下に実装された正方形のICチップがXilinx社Spartan-2(XC2S30)FPGAチップである。マイコンとして使用するときは、ボード上のシリアルPROMから設計データをダウンロードし、マイコンのCPU、RAM、ROM、入出力インタフェース回路がこの内部に実現される。

ボード上のジャンパーを引き抜くことにより、設計データをJTAGコネクタからFPGAにダウンロードする状態となり、本ボードがFPGA学習ボードとして使用できる。

#### (2) JTAG コネクタ

プリント基板下部の左側コネクタは、FPGA学習ボードとして使用する時、開発システムから設計データをダウンロードするためのJTAGコネクタである。市販のXilinx対応JTAGダウンロードケーブルを用い、PCと接続する。

#### (2) 発振回路

FPGAチップの左側に2.4576MHzの水晶発振ICが実装されている。このICの出力はFPGAのクロック入力ピンに接続されており、FPGA内部

に作成した回路のクロックとして使用できる。

### (3) リセット回路

ボード左側上に電源監視 IC が実装されており、これが FPGA のリセット回路になっている。リセット手段はパワーオンリセットのみで、手動で FPGA をリセットする方法は用意されていない。

### (4) 電源回路

ボード左側上に FPGA のコア用 2.5V, I/O 用 3.3V 安定化電源回路が実装されている。電源電圧の制約、既にボード上に実装されて接続されている周辺回路の制約により、FPGA の入出力ピンは TTL 互換モードのみで使用することができる。

### (5) コンソールパネル

プリント基板の右半分にマイコンのコンソールパネルが実装されている。コンソールパネルは 2 進数でマイコンの CPU レジスタやメモリの値を表示したり書き換えたりするためのものであり、ランプ 25 個、押しボタンスイッチ 9 個、トグルスイッチ 10 個から構成される。

マイコンのアーキテクチャが 8 ビットアドレス、8 ビットデータであるので、それに合わせて 8 桁のアドレスランプ、データランプ、データスイッチ (トグルスイッチ) が実装されている。その他に、CPU やコンソールパネル自体の状態を示すランプや、パネルの機能に対応した押しボタンスイッチが実装されている。

ランプやスイッチのほとんどは FPGA の入出力ピンに直接接続されている (付録 1 参照) ので、FPGA 学習ボードとして使用する場合は全てのスイッチやランプを自由に使用できる。しかし、スイッチに接続されたピンを間違えて出力に設定すると FPGA チップが破壊される恐れがある。

押しボタンスイッチの FPGA への接続方法が、チャタリング防止対応等により数種類あり、教材として役に立つ。なお、ボード左下隅の RESET スイッチも回路構成上はコンソールパネルの一部である。

### (6) シリアル入出力インタフェース

プリント基板左上の D-SUB コネクタは、RS-232C に準拠したシリアル入出力インタフェースのコネクタである。コネクタには FPGA の入出力ピンがト



写真 2 7セグメント LED 基板

ランシーバ IC を介して接続されている。FPGA の内部にシリアル・パラレル変換回路を作成することによりパソコンとの通信が可能になる。

### (7) スピーカ

プリント基板中央上部の円形の部品は圧電スピーカである。これも、回路構成上は FPGA の入出力ピンがドライバ IC を介して接続されたただけのものであり、FPGA の内部に音源回路を作成することにより音を鳴らすことができる。

### (8) 拡張コネクタ

プリント基板下部の右側コネクタは拡張コネクタである。回路構成上は、電源・グランドと FPGA の入出力ピン 16 本が直接接続されたものであり、様々な用途に利用可能である。

今回の実験科目では、このコネクタに写真 2 に示す 7セグメント LED 基板を接続して使用した。

## 2.2 FPGA 設計環境

写真 3 に FPGA の開発システムの様子を示す。パソコン教室の 50 台の PC にダウンロード用のケーブルを増設し、マイコンボードと接続できるようにした。

これに、Xilinx 社の WebPACK ISE をインストールした。WebPACK は、Xilinx 社のホームページからダウンロードし、無償で使用できる Windows 上で動作する FPGA 設計用統合環境である。この設計環境で、VHDL 入力、論理合成、配置配線、ダ

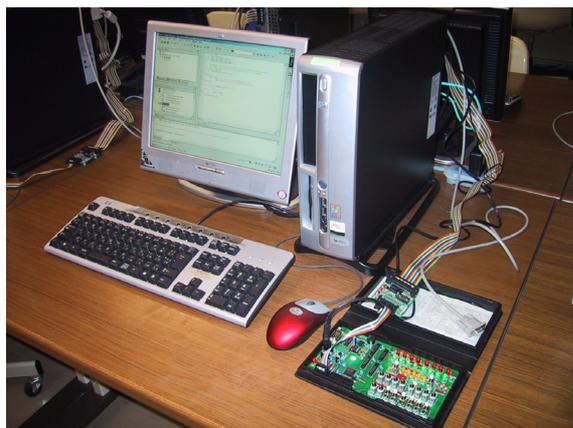


写真3 FPGA 設計環境

ダウンロードまでを行うことができる。

### 3 実験科目での授業例

上記のマイコンボードと設計環境を1クラス分(50セット)準備し、徳山高専情報電子工学科4年生の実験科目「コンピュータシステム実験」で使用した。

#### 3.1 科目設計の背景

従来、論理回路を扱う実験テーマではハードウェアの制限により非常に限られた規模の回路を扱うことしかできず、数ビットのカウンター設計等をテーマとしてきた。そのため、論理回路の設計をマスターさせることは難しかった。一方で、企業等の現場ではHDLを用いた設計が主流になりつつあり、学校の授業や実験でもこれを取り入れる例が多くなってきている。そこで、本学科の実験科目でもHDLを用いた本格的な論理回路設計テーマの新設が望まれていた。

今回、FPGA学習環境の整備が可能になったことで、HDLを用いた論理回路設計を実験テーマとして取り入れることが可能になった。このテーマを取り入れた科目は新設の「コンピュータシステム実験」である。この実験科目は、コンピュータシステムに関するソフトウェアとハードウェアを融合したテーマを扱うために平成16年度より新設された。この前期15週(90分2コマ/週)をVHDL学習テーマとした。

表1 実験項目

週	実験項目
1	ガイダンス
2	FPGA と VHDL による回路設計の概要
3	VHDL の記述方法の基礎
4	FPGA 設計環境の使用方法
5	デコーダ, エンコーダ, マルチプレクサの設計
6	フリップフロップとシフトレジスタの設計
7	7セグメントデコーダの設計
8	カウンタ (バイナリ, ジョンソン, 10進) の設計
9	ALU の設計
10	ステートマシンの設計
11	自由課題 (1)
12	自由課題 (2)
13	自由課題 (3)
14	課題発表の資料作成
15	課題発表

#### 3.2 実験内容

実験項目の一覧を表1に示す。

実験は半期で一つの目標を達成する大実験に近いものである。しかし、学生にFPGA, VHDLについての予備知識がないため、前半10回をこれらの学習を目的としたトレーニング的な内容とした。この間は毎回「教員による設計課題と関連するVHDL文法の説明」、「学生による課題のVHDL記述とFPGAへの実装」、「教員による動作確認」を行った。学生はグループではなく個人で課題を解決する。

後半5回の自由課題は、3~4人の班を作り、班の学生で協力して行った。それまでに習得した技術を利用し、マイコンボードで実現可能なシステムを提案し実現する。最後に班毎のプレゼンテーションを行う。

#### 3.3 実験結果

自由課題は夏休みをはさんだため、多くの学生が夏休みも学校に出てきて予想外に大がかりなシステムを作成した。作成したシステムの多くは簡単なゲームを実装したものが多かった。例を挙げると、「神経衰弱ゲーム」、「スロットマシン」、「相性占い」

等である。

「神経衰弱ゲーム」は、LED の表示により二十数枚のカードの場所を表現し、場所を指定しカードをめくることができるものである。教員側の感覚からすると、VHDL で記述する気の起こらないようなものであるが完成させ動かすことに成功した。

「スロットマシン」は、与えた7セグメントLEDが2桁のものであったので、マイコン2台をRS-232Cのクロスケーブルで接続し、必要な桁数を確保したものである。

このようにVHDLに慣れ、かなり複雑なシステムも記述できるようになった。実験を行った学生は、1年次からC言語のプログラミング教育を長く受け、プログラミングが得意な者が多い。そのため、ある程度複雑なシステムを組み立てることに慣れており、予想以上に大きなシステムを記述できたと考えられる。

しかし、実験中に学生から受けた相談の多くはVHDL記述を回路記述ではなくアルゴリズム記述と考えたために陥ったバグに関するものであった。また、不適切な記述により無駄なフリップフロップが多数できたため、FPGAのゲートを使い尽くしてしまう例もあった。

「VHDLで記述したプログラムが並列に動く」のような発言をする学生が少なくない。相当大きな回路を記述したにもかかわらず、プログラミングと混同している可能性があり、真の意味で論理回路設計をすることができるようになったのか疑問も残る。

今回のように論理回路設計に慣れさせる目的の場合は、HDLを使用するのではなく回路図入力ですっかり「回路を作る」という感覚を教えた方が良く感じる。回路図が書けるようになった後に、効率良く記述する方法としてHDLを導入するべきであった。

### 3.4 マイコンボードの使用結果

半年にわたり、40名以上の学生が自由にマイコンボードを使用してFPGAの設計ができる環境を提供した。マイコンボードはFPGA学習ボード専用ではないため、入出力ピンの設定ミス等によりチップを破壊する等のトラブルも予想されたが1台の故障もなく実験を終わることができた。

初めてボードを使用する週に、破損する可能性があるるので設定ミスに十分注意するよう説明したが、

半年の間には恐らく設定ミスは何度も発生したはずである。しかし、短時間のうちにミスに気づく等して破壊に至らなかったものと考えられる。

この程度の使用なら、本格的なFPGA学習ボードを使用しなくてもこのボードで十分実用に耐える。むしろ、ボードの小ささやシンプルさ、クラスの人件数の台数が揃うこと等からこのマイコンボードを使用するメリットの方が大きい。

## 4 おわりに

本稿では、教育用に開発したマイコンボードをFPGA学習ボードとして使用したHDL演習環境と、この演習環境を使用した実験科目の例を紹介した。マイコンボードを含む演習環境の機能は十分であったが、実験科目の内容は改良の余地があるものとなった。

VHDLが記述できるようにはなったが、記述しているものを回路として認識することが不十分である。そのため、コンピュータのプログラムを記述することとの差が十分に理解できない学生が少なくないようである。

今後の課題は、今回よりも論理回路設計をしている実感を学生に感じさせることである。回路図入力の併用等が有効であると予想される。

## 5 謝辞

実験科目の運営にあたり、PC教室の整備、7セグメントLEDボードの開発等に積極的に協力して頂いた、本校の山本孝子技術室長、寺西信技術職員に感謝の意を表す。

## 参考文献

- [1] 重村哲至, 山田健仁, 新田貴之, 力規晃, 原田徳彦, 三木幸: コンソールパネルを持つビデオカセットサイズの教育用マイコンの開発, 情報処理学会研究報告, 2004-CE-74, pp.25-32(2004)

# 付録1 マイコンボード回路図

