

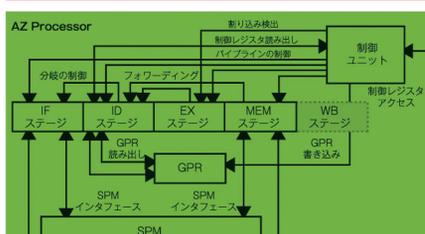
HDLによる論理設計・基板製作・プログラミング

CPU自作入門

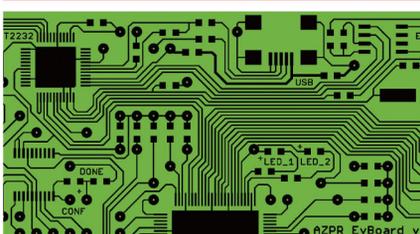
水頭一壽
米澤遼
藤田裕士
[著]

お試し版PDF

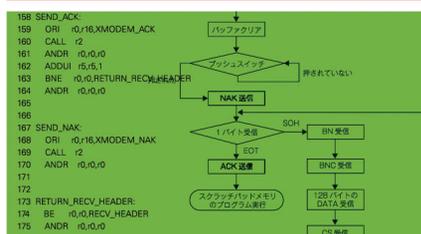
CPUの設計と実装



基板設計と製作



プログラミング



オリジナルCPUを実装し、FPGA基板を製作し、プログラムを動作させるまでの過程を詳しく解説!

本書に記載された内容は、情報の提供のみを目的としています。したがって、本書を用いた運用は、必ずお客様自身の責任と判断によって行ってください。これらの情報の運用の結果について、技術評論社および著者はいかなる責任も負いません。

本書記載の情報は、2012年9月現在のものを掲載していますので、ご利用時には、変更されている場合があります。

また、ソフトウェアに関する記述は、とくに断わりのない限り、2012年9月現在での最新バージョンを基にしています。ソフトウェアはバージョンアップされる場合があり、本書での説明とは機能内容や画面図などが異なってしまうこともあり得ます。本書ご購入の前に、必ずバージョン番号をご確認ください。

以上の注意事項をご承諾いただいたうえで、本書をご利用願います。これらの注意事項をお読みいただかずに、お問い合わせいただいても、技術評論社および著者は対処しかねます。あらかじめ、ご承知おきください。

◆ Microsoft Windows は米国 Microsoft Corporation の登録商標です。
◆ その他、本文中に記載されている製品名、会社名等は、すべて関係各社の商標または登録商標です。

はじめに

本書ではオリジナルの CPU をゼロから設計することで、CPU の内部構造を理解するとともに、CPU 設計の面白さを読者に伝えていきたいと考えています。

本書は CPU の設計をメインターゲットとしていますが、CPU だけでなく周辺機器を制御するための I/O やバスの設計を行い、SoC としました。CPU だけでなく、ボードの設計やソフトウェアの設計までコンピュータに必要な要素を全てをカバーします。ハードウェアからソフトウェアまで全てを自分でゼロから設計・実装し、実機で動かします。CPU の設計から基板の設計、そしてソフトウェアの設計までを 1 冊の書籍で扱うことで、それぞれの関連性を包括的に理解することを可能にしています。

CPU の実装には FPGA を使用します。近年、高性能な FPGA が安価で手に入るようになり、個人レベルで充分楽しむことが可能です。開発ツール等は無償のものを使用し、電子部品は読者が実際に作ることを考慮し、入手性が高い物を選定しました。製作コストは極力安くなるように配慮しました。

また、CPU 及び I/O、バス等に関しては HDL のソースコードを、ソフトウェアに関してはプログラムのソースコードを、技術評論社の Web サイト (<http://gihyo.jp/>) の本書サポートページで公開しています。ただし基板に関しては本書に付録として付けるのではなく、既製品をリファレンスモデルとすることで対応しています。これにより、読者の興味に応じて作りたい部分だけを作るという読み方を可能にしています。

本書はエンジニアを目指している学生をメインターゲットとしていますが、前提とする知識を極力減らし、ハードルを下げることによって様々な層に受け入れられるよう配慮しています。本書は**学ぶことよりも実際に製作することに重点を置いており、「実際に製作することの楽しさ」を知る**、ということが他の技術書と異なる大きなアピールポイントです。FPGA を用いて CPU を設計・実装し、基板製作を行い、ソフトウェアの開発を行う、これらすべての工程を自らの手で行うという趣旨の書籍は他に例がありません。雑誌の付属のマイコンを PC でプログラミングして動かすといった手軽な開発よりも達成感が得られると考えています。

本書では前提知識の敷居を下げ、できるだけ広い層の読者に読んでもらえるよう配慮しています。しかし、ブール代数や電子回路、プログラミング言語、コンピュータアーキテクチャなどの初歩的な知識は少なからず必要になります。これらについても本文中で最低限の説明をしていますが、紙面の都合上、体系的に説明するには至らない部分も多いです。これは、「物を作る」ことを主眼とする本書の性質上、ある程度はご容赦下さい。その代わりに、本書の背景となる知識を理解するのに有益な書籍を、本文中のコラムで紹介していきます。

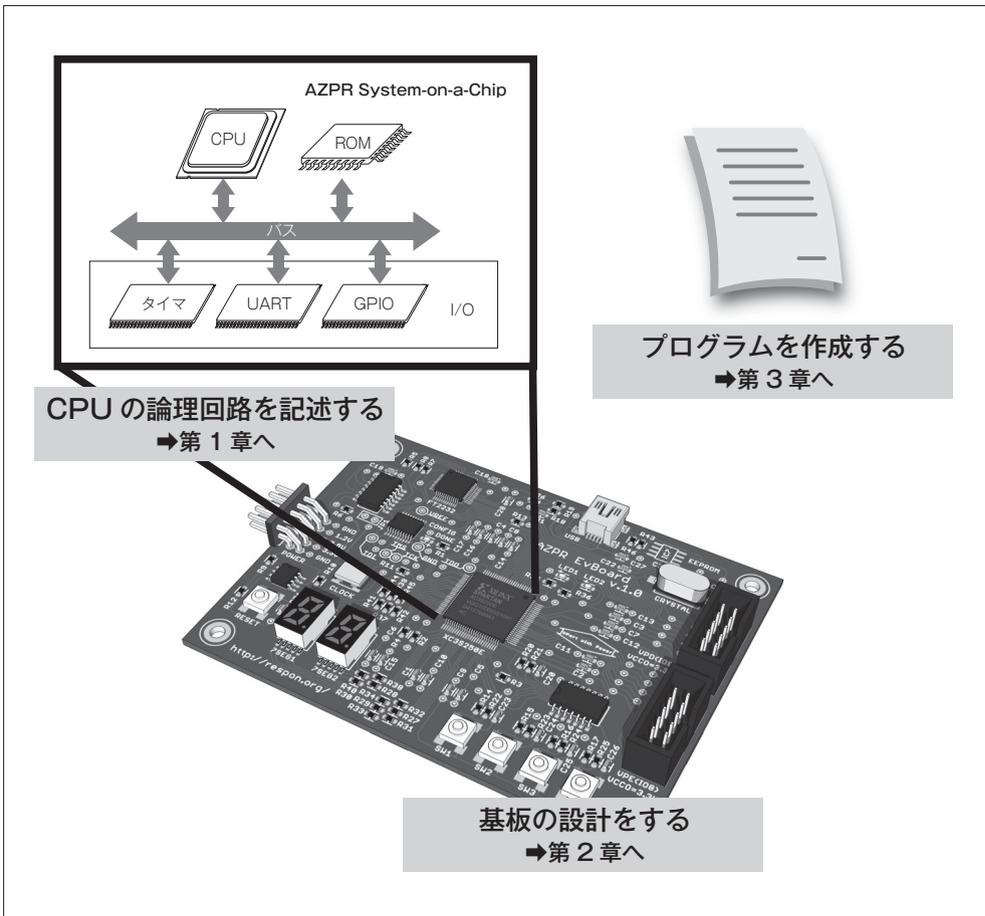
本書のメインターゲットとなるのは、情報系や電気電子系分野の大学生や高専生としています。また、そういった分野を目指す中高生や、コンピュータに興味のある一般の読者にも広く読んでもらえるように配慮しています。簡単に読める、簡単に理解できるとは言えませんが、意欲を持って読めば十分に理解できる内容であると考えます。

2012 年 9 月 筆者

本書の読み方

本書は大きく3つの章から構成されています。第1章ではCPUを中心に、プログラムやデータを格納するためのメモリや、外部との入出力を行うためのI/O、それらを繋ぐバスを作成し、簡単なコンピュータシステムを作成します。第2章では、このコンピュータシステムを実機で動作させるための基板を設計・製作します。第3章では、このコンピュータシステム用のプログラミングを行い、実機にて動作確認を行います。本書の最大の特徴は、コンピュータシステムをすべて自作可能ということです。

3つの章はそれぞれ独立しており、読者の興味に応じて好きな章のみを選択して読むことができます。



繰り返しますが、本書は大きく3つの章から構成されています。第1章はCPUの論理設計、第2章は基板設計、第3章はソフトウェア設計です。



第1章のCPUの設計では、CPU、メモリ、I/O、さらにそれらを接続するバスを設計し、ハードウェア記述言語 Verilog HDL によって実装します。最終的にはそれらを組み合わせで簡単なコンピュータを作成します。まず、コンピュータ、デジタル回路、Verilog HDL の基礎について説明します。その後、バス、メモリ、CPU、I/O の順でコンピュータを作成していきます。また、Verilog HDL のシミュレーション環境についても説明します。

第2章の基板設計では、製作したCPUやソフトウェアを動作させるための実機を製作します。CPUの実装にはFPGAと呼ばれる、内部構造を書き換えることができるICを利用します。製作の手順は、まず必要な部品を選定し、回路図・配線図を作成します。その後、実際のプリント基板を製作します。基板の製作では感光基板を利用した方法と、製造業者に注文する方法を選択することができます。プリント基板が完成したら部品を実装し、動作確認を取ります。

第3章のソフトウェア設計では、設計したCPU用のプログラムを作成し、製作した基板でプログラムを動作させます。まず開発環境について説明します。開発に必要なツールを紹介し、各ツールのインストール方法と使い方を説明します。その後、プログラミングについて説明します。サンプルプログラムを用いて、CPUやI/Oの使い方を説明し、製作した基板を使ってプログラムを動かします。



本書での最終的な成果物は実機によるデモプログラムの動作になります。本書では「何ができるか」よりも「実際に自分の手で製作すること」に重点を置いているため、あまり高度なデモを用意していません。高度なデモを行うという観点から言えば、市販のマイコン基板などを利用したほうがより手軽に製作が行えます。しかし、コンピュータに関わる全ての部分を自分の手で自作するということは、市販のマイコン基板を動作させるだけでは得られない達成感があります。また、現在、マイコンなどを利用して電子工作をしている読者にとっても、論理設計や基板設計、ソフトウェア設計に対してより理解が深まるはずです。ありものの部品だけでは必要な機能が実装できないケースは多々あります。そんなときに本書を読み直していただくと幸いです。

◎目次 CONTENTS

はじめに.....	3
本書の読み方	4
目次	6

第1章 CPUの設計と実装 13

1.1	はじめに.....	14
1.2	コンピュータについて.....	16
1.2.1	コンピュータとは.....	16
1.2.2	CPUとは.....	17
	コラム CPUのビット数.....	20
1.2.3	メモリとは	21
1.2.4	I/Oとは.....	22
	コラム エンディアン	23
1.2.5	バスとは	25
	コラム バスの利点・欠点	27
1.2.6	まとめ.....	28
	コラム コンピュータに関する書籍.....	28
1.3	デジタル回路の基礎.....	29
1.3.1	デジタル回路とは.....	29
1.3.2	数値表現	29
1.3.3	符号付き2進数.....	30
	コラム ビットとバイト	31
	コラム 1キロバイトの大きさは?	31
1.3.4	MOSFETの仕組み	32
1.3.5	論理演算	33

1.3.6	CMOS基本論理ゲート.....	35
1.3.7	記憶素子.....	36
	コラム セットアップタイムとホールドタイム.....	40
1.3.8	組み合わせ回路と順序回路.....	41
1.3.9	クロック同期設計.....	41
1.3.10	まとめ.....	41
	コラム デジタルに関する書籍.....	41
1.4	Verilog HDLについて.....	42
1.4.1	Verilog HDLとは.....	42
1.4.2	回路記述.....	43
	コラム デフォルトネットタイプ.....	50
	コラム 組み合わせ回路記述におけるラッチ推定とドントケア.....	56
	コラム 正論理と負論理.....	62
1.4.3	シミュレーション記述.....	62
	コラム 同期回路の信号変化タイミング.....	65
1.4.4	Verilog HDLのシミュレーション環境.....	71
1.4.5	まとめ.....	78
	コラム Verilog HDLに関する書籍.....	78
1.5	本章で作成するもの.....	79
1.5.1	本章で作成するものの全体像.....	79
1.5.2	本章のソースコードについて.....	80
	コラム ワードアドレスとバイトオフセット.....	84
1.6	バスの設計と実装.....	85
1.6.1	バスの設計.....	85
1.6.2	バスの実装.....	88
1.6.3	まとめ.....	101
1.7	メモリの設計と実装.....	102
1.7.1	FPGAのRAM領域.....	102
1.7.2	ROMの設計と実装.....	105
1.7.3	まとめ.....	106
	コラム メモリに関する書籍.....	106

1.8	AZ Processorの設計と実装	107
1.8.1	CPUについて.....	107
	コラム CPIとMIPS値.....	117
1.8.2	AZ Processorの設計.....	118
	コラム 命令セットアーキテクチャとマイクロアーキテクチャ.....	132
1.8.3	AZ Processorの実装.....	132
1.8.4	まとめ.....	194
	コラム コンピュータアーキテクチャに関する書籍.....	194
1.9	I/Oの設計と実装	195
1.9.1	タイマ.....	195
1.9.2	UART.....	201
	コラム UARTの実用例.....	201
1.9.3	GPIO.....	216
1.9.4	まとめ.....	224
	コラム I/Oに関する書籍.....	224
1.10	AZPR SoCの全体接続	225
1.10.1	各モジュールの接続.....	225
1.10.2	クロックモジュールの実装.....	227
1.10.3	トップモジュールの実装.....	230
1.10.4	まとめ.....	230
1.11	AZPR SoCのシミュレーション	231
1.11.1	シミュレーションモデルの作成.....	231
1.11.2	テストベンチの作成.....	234
1.11.3	シミュレーションの実行.....	238
1.11.4	まとめ.....	239
1.12	おわりに	240

第2章 基板設計と製作 241

2.1	はじめに.....	242
2.2	仕様策定.....	244
2.2.1	基板の名称.....	244
2.2.2	基板の構成.....	244
2.2.3	基板のサイズ.....	244
2.2.4	基板の層数.....	245
2.2.5	FPGAの選定.....	246
2.2.6	周辺回路の選定.....	246
コラム	FPGAについて.....	248
コラム	JTAGについて.....	250
2.3	部品選定.....	251
2.3.1	部品の選定基準.....	251
2.3.2	部品の選定.....	252
2.3.3	部品の調達.....	258
2.4	回路設計.....	262
2.4.1	データシートの入手.....	263
2.4.2	コンフィギュレーション回路.....	265
2.4.3	周辺回路.....	271
2.4.4	電源回路.....	276
2.4.5	基板設計環境.....	277
2.4.6	Eagleによる回路図の作成.....	280
コラム	ULPについて.....	285
コラム	Eagleの使用方法を記載した書籍／マニュアル.....	285
2.4.7	完成した回路図.....	285
2.5	レイアウト設計.....	291
2.5.1	基板設計の制約と配線ポリシー.....	291
2.5.2	FPGA基板のレイアウト設計.....	293
2.5.3	電源基板のレイアウト設計.....	296
2.5.4	Eagleによるレイアウト作成.....	298

2.5.5	完成したレイアウト.....	304
2.6	部品ライブラリの作成.....	306
2.6.1	Symbolの作成.....	307
2.6.2	Packageの作成.....	309
2.6.3	Deviceの作成.....	310
2.7	基板の3D表示.....	314
2.7.1	使用するツールの説明.....	314
2.7.2	3Dライブラリの用意.....	316
	コラム 3Dライブラリの管理について.....	324
2.7.3	基板の3D表示.....	325
2.8	感光基板による製作.....	326
2.8.1	全体の手順.....	326
2.8.2	マスク作成.....	328
2.8.3	マスクの貼り合わせ.....	330
2.8.4	露光.....	331
2.8.5	現像.....	335
2.8.6	エッチング.....	336
2.8.7	レジスト.....	339
2.8.8	穴あけ.....	345
2.8.9	VPortコネクタを裏面に取り付ける場合の処理.....	347
2.8.10	スルーホール作成.....	348
2.8.11	ジャンパ配線.....	349
2.9	基板製造サービスへの注文.....	352
2.9.1	基板製造サービスとは.....	352
2.9.2	DRC.....	352
2.9.3	ガーバデータの出力.....	355
2.9.4	ガーバデータの確認.....	356
	コラム DFMのチェック方法.....	360
	コラム レジストマスクの印刷設定.....	363
2.9.5	P板.com社への注文.....	364
	コラム 面付けデータの用意.....	365

2.9.6	OLIMEX社への注文.....	369
2.10	部品実装.....	372
2.10.1	電源基板.....	372
2.10.2	FPGA 基板の実装.....	373
2.11	動作確認.....	375
2.11.1	FPGAの認識.....	375
2.11.2	ダイアグプログラム.....	376
2.12	おわりに.....	378

第3章 プログラミング 379

3.1	はじめに.....	380
3.2	開発環境.....	381
3.2.1	用意するもの.....	381
3.2.2	FPGA開発環境について.....	382
3.2.3	ISE WebPACK.....	384
3.2.4	UrJTAG.....	414
	コラム cblsvr-0.1_ft2232.....	427
3.2.5	クロスアセンブラ.....	428
3.2.6	最初のプログラム.....	436
3.3	シリアル通信.....	442
3.3.1	Tera Term のインストール.....	442
3.3.2	プログラムの作成.....	443
	コラム サブルーチン.....	450
	コラム ASCIIコード.....	451
3.3.3	プログラムの実行.....	452

3.4	プログラムローダ	454
3.4.1	XMODEM 解説	454
3.4.2	プログラムローダの作成	456
3.4.3	ロード対象のプログラムの作成	467
3.4.4	プログラムの実行	468
3.5	割り込みと例外	471
3.5.1	割り込みとは	471
3.5.2	プログラムの作成	476
3.5.3	プログラムの実行	481
3.5.4	例外とは	481
3.5.5	プログラムの作成	482
3.5.6	プログラムの実行	486
3.6	7セグメントLED	487
3.6.1	7セグメントLEDとは	487
3.6.2	7セグメントLEDの制御	487
3.6.3	7セグメントLEDカウンタ動作概要	490
3.6.4	プログラムの作成	490
3.6.5	プログラムの実行	497
3.7	応用プログラムの作成	498
3.7.1	動作概要	498
3.7.2	プログラムの作成	503
3.7.3	プログラムの実行	519
3.8	おわりに	520
索引	521	
謝辞	526	
CPU自作入門 おわりに	527	

第1章

CPUの設計と実装

本章では、CPU、メモリ、I/O、さらにそれらを接続するバスを設計し、ハードウェア記述言語 Verilog HDL によって実装します。最終的にはそれらを組み合わせて簡単なコンピュータを作成します。

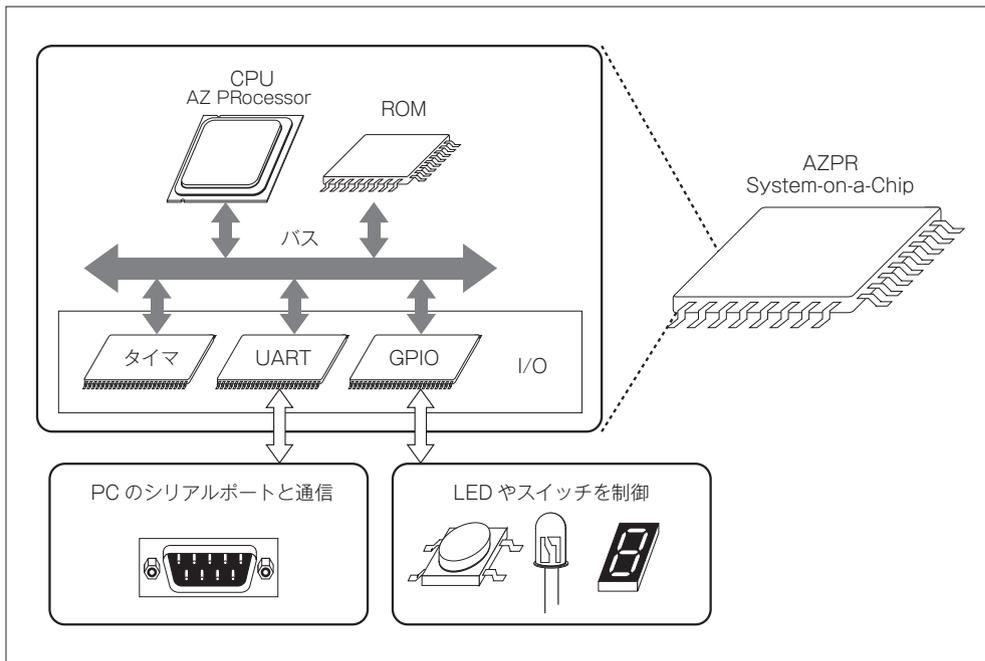
本章の最大の特徴は、コンピュータの各要素をハードウェア記述言語によって実装し、その一つ一つを解説していく点です。本章の内容を理解することで、コンピュータの各要素を理解するとともに、実際に作ることができるようになるでしょう。

1.1	はじめに	14
1.2	コンピュータについて	16
1.3	デジタル回路の基礎	29
1.4	Verilog HDL について	42
1.5	本章で作成するもの	79
1.6	バスの設計と実装	85
1.7	メモリの設計と実装	102
1.8	AZ Processor の設計と実装	107
1.9	I/O の設計と実装	195
1.10	AZPR SoC の全体接続	225
1.11	AZPR SoC のシミュレーション	231
1.12	おわりに	240

1.1 はじめに

本章では CPU を中心に、プログラムやデータを格納するためのメモリ、外部との入出力を行うための I/O、それらを繋ぐバスを作成し、簡単なコンピュータシステムを SoC (System-on-a-Chip) として実装します。SoC とは 1 つのチップに一連のシステムを集積する設計手法です。

開発にあたり、まずは CPU の名前を決めます。今回作成する CPU の名前は **AZ Processor** としました。本書では、コンピュータの設計を最初から最後まで自分たちの手で行います。このことをアルファベットになぞらえて、A から Z まで全て自分たちの手で作るという意味を込めました。そして、AZ Processor とメモリ、各種 I/O を搭載し、バスで結合した SoC を、AZPR SoC (AZ Processor System-on-a-Chip) とします。図 1-1 に AZPR SoC の概要を示します。

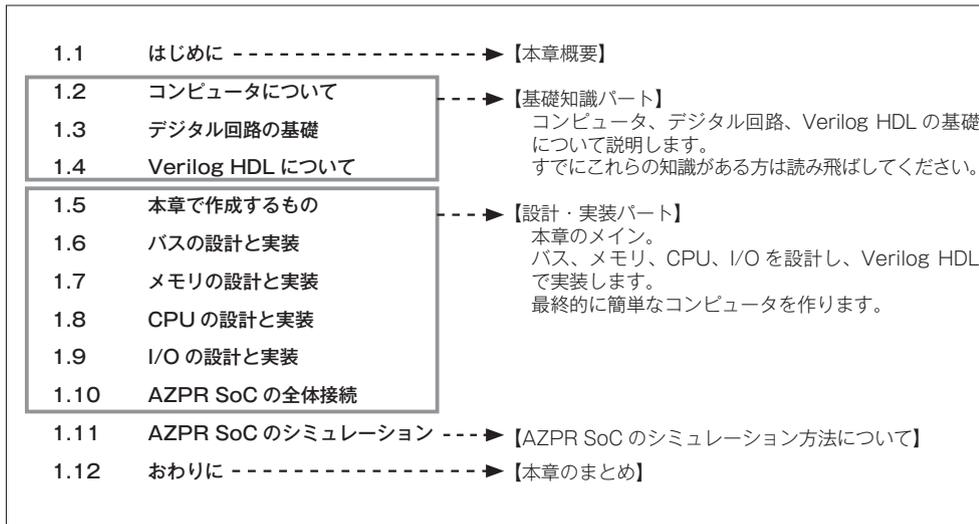


▲ 図 1-1 AZPR SoC の概要

本章の構成を図 1-2 に示します。1.2 節でコンピュータについて、1.3 節でデジタル回路の基礎について、1.4 節で Verilog HDL についてそれぞれ簡単に説明します。1.2 節から 1.4 節は本章で AZPR SoC を作成していくうえで、最低限必要な前提知識を補う基礎知識

パートです。既にこれらの知識や設計経験がある方は、読み飛ばして構いません。

1.5 節から 1.10 節が本章のメインとなる設計・実装パートです。1.5 節にて本章で作成する AZPR SoC について説明します。1.6 節でバス、1.7 節でメモリ、1.8 節で CPU、1.9 節で I/O の設計と実装について説明します。1.10 節で各モジュールを接続し、AZPR SoC が完成します。1.11 節では AZPR SoC のシミュレーションについて説明します。最後に 1.12 節で本章をまとめます。



▲ 図 1-2 本章の構成

1.2 コンピュータについて

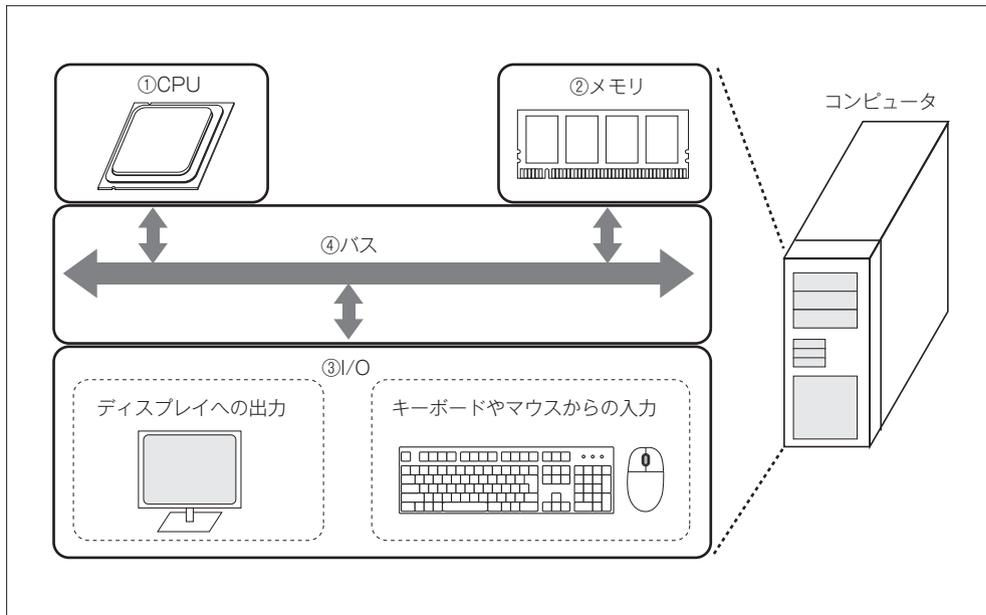
この節では、コンピュータの構成要素とそれぞれの役割について説明します。

1.2.1 コンピュータとは

コンピュータとは、プログラムに従って様々な演算やデータ処理を行う**計算機**です。近年、パソコン（パーソナルコンピュータ）は一般家庭に広く普及し、我々の生活に深く関わってきています。現在では、パソコンだけではなく、携帯電話や家電など、我々の生活のあらゆる場面でコンピュータが利用されています。

コンピュータは多くの場合、計算やデータの処理などを行う **CPU**、プログラムやデータを記憶するための**メモリ**、外部とデータのやり取りを行う **I/O** で構成されています。各要素はバスで接続され、1つのコンピュータが構成されます。

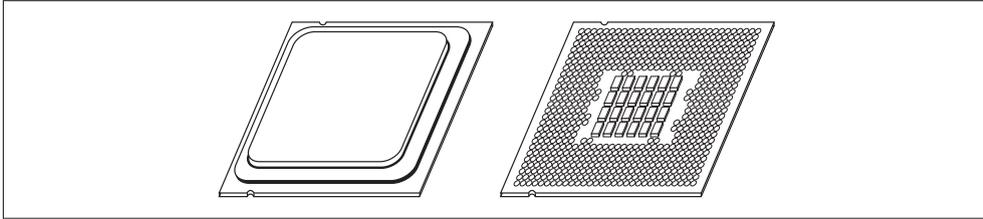
図3にコンピュータの構成要素を示します。パソコンを例に見てみると、Intel社製やAMD社製のCPUに、DDR3 SDRAMなどのメモリ、そして、キーボード、マウス、ディスプレイなどのI/Oで構成されています。これらCPU、メモリ、I/O、バスはパソコンに限らず、多くのコンピュータにおいて共通の4大構成要素です。



▲ 図 1-3 コンピュータの構成要素

1.2.2 CPUとは

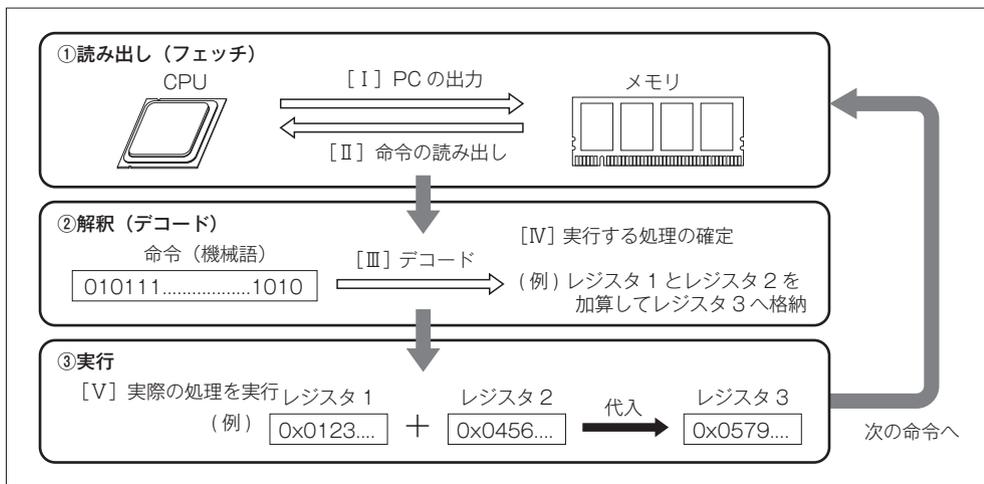
CPUとは、コンピュータにおける様々な演算やデータ処理を行う装置です。「中心 (Central) となる処理 (Processing) を行う装置 (Unit)」であることから、これらの頭文字をとってCPUと呼ばれています。近年、商用CPUのほとんどは集積回路として実装され、図1-4のようなパッケージで販売されています。



▲ 図 1-4 CPUの外見

CPUは命令に従って様々な処理を行う電子回路です。CPUの処理の流れを図1-5に示します。メモリ内には、CPUが実行可能な命令群がひとまとまりのプログラムとして格納されています。CPUはメモリ内にある命令を①読み出し (フェッチ)、それがどのような処理を行う命令なのかを②解釈 (デコード) し、処理を③実行します。

CPUは大きく分けてこの3つの状態を遷移しながら処理を行います。このような、メモリ内に格納されたプログラムを読み出して実行する方式のことを、プログラム内蔵方式と呼びます。



▲ 図 1-5 CPUの処理の流れ

■①読み出し（フェッチ）

はじめに、CPU は実行すべき命令を読み出します。CPU は **PC（Program Counter）** というレジスタを持っており、実行すべき命令のアドレスを保持しています。命令の読み出しでは、PC の値をメモリに出力し、該当アドレスの命令を読み出します。

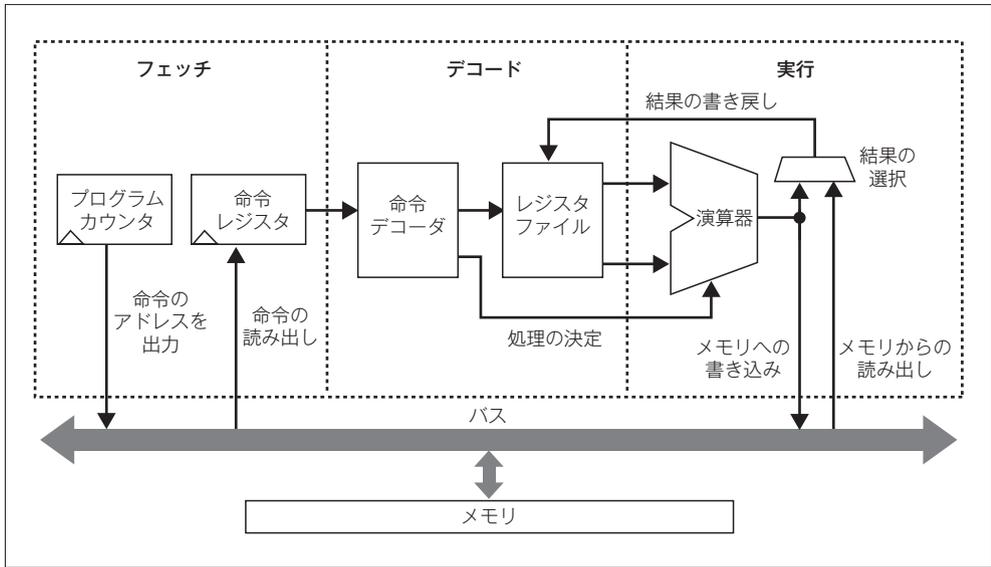
■②解釈（デコード）

次に、CPU は読み出した命令が、どのような処理を行うものなのかを解釈します。命令の種類には、様々な演算を行う命令、次に実行する命令を制御する命令、メモリや I/O への読み書きを行う命令、CPU の制御を行う命令などがあります。命令は CPU 内にある **命令デコーダ** と呼ばれるモジュールが解釈します。アドレスや演算結果の保存などに使用するレジスタを **汎用レジスタ（General Purpose Register）** と言います。

■③実行

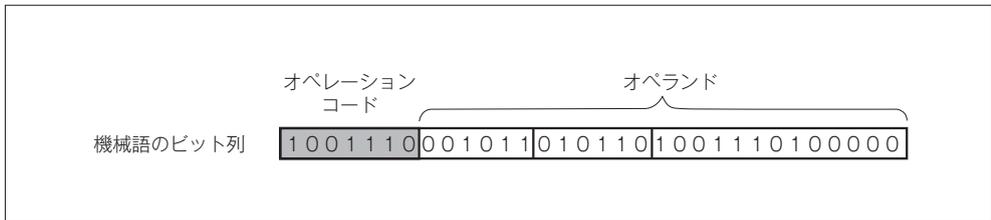
最後に、CPU はデコードによって決定された処理を行います。CPU は内部にある記憶装置であるレジスタや、外部にあるメモリからデータを取り出して処理を行い、結果をレジスタ、またはメモリへ書き戻します。

簡略化した CPU の内部構造を図 1-6 に示します。命令フェッチでは、CPU は PC の値をメモリに送り、メモリから命令を読み出します。読み出した命令は命令レジスタに保存されます。命令デコードでは命令レジスタに保存されている命令を解釈し、実行する処理を決定します。また多くの場合、処理の決定と同時に、演算に使用するデータを汎用レジスタから読み出します。命令の実行では、汎用レジスタから読み出した値を演算器によって処理し、結果を書き戻します。CPU が実行する処理には、演算した結果を汎用レジスタに書き戻す処理や、メモリへ書き込む処理、メモリから読み出す処理などがあります。



▲ 図 1-6 CPU の内部構造

CPU が実行する命令は、その命令が何の操作を実行するかを表すオペレーションコードと、何に対して操作を実行するかを表すオペランドという2つの部分で構成されています。図 1-7 に命令の構造を示します。命令は特定のビット列として表現され、これを機械語と呼びます。



▲ 図 1-7 命令の構造

オペランドには、レジスタアドレス、メモリアドレス、即値などを指定します。即値とは命令中に埋め込まれた定数のことです。オペランドの数やビット幅は CPU や命令によって様々で、指定できるオペランドの数によって、3 オペランド形式、2 オペランド形式、1 オペランド形式などに分類されます。

CPU が実行可能な命令の特徴に応じて RISC (Reduced Instruction Set Computer) と CISC (Complex Instruction Set Computer) という2つの分類があります。表 1-1 に RISC と CISC の特徴と代表的な製品の比較を示します。

▼ 表 1-1 RISC と CISC の比較

	命令の機能	命令数	ハードウェア	高速化	同じ処理を行う際のコードサイズ	代表的な製品
RISC	単純	少ない	簡単	向き	多い	IBM Power、Sun MicroSystems SPARC、MIPS、ARM、etc
CISC	複雑	多い	複雑	不向き	少ない	Intel i386、IBM System/360、DEC PDP、etc

RISC に分類される CPU の命令は、単純でかつ種類も少ないです。対して CISC に分類される CPU の命令は、複雑でかつ種類も多いです。RISC は命令が単純で少ない代わりに CPU の内部構造を簡略化することができ、高速化に向いています。しかし、同じ処理を実現する場合、命令一つ一つが単純なため、CISC よりも命令数が多くなってしまいます。対して、CISC は内部構造が複雑なので高速化には向きませんが、同じ処理を実現する際の命令数が RISC より少なくてすみます。

RISC アーキテクチャの大きな特徴の 1 つとして、メモリアクセスをロードストア命令に限定している点が挙げられます。このようなアーキテクチャをロードストアアーキテクチャと言います。メモリアクセスをロードストア命令に限定することで、命令セットやパイプラインを単純化することができます。ロードストアアーキテクチャでは、演算命令のオペランドには必ずレジスタを使用します。

RISC と CISC はそれぞれ一長一短あり、一概にどちら良いとは言えませんが、クロックの高速化が求められる CPU の世界では RISC の方が有利に思えます。近年の Intel 社製や AMD 社製の CPU は、命令セットこそ CISC ですが、複雑な命令を一度簡単な命令に分解し、内部的には RISC のように実行しています。

CPU のビット数

CPU のビット数とは、その CPU が扱うことのできるアドレス空間やデータサイズの大きさを表しています。たとえば 32 ビット CPU で扱うことのできるデータサイズは 32 ビット、アクセスできるアドレス空間は 4 ギガバイト (2 の 32 乗) となります。最近ではプログラムの規模やデータサイズ、メモリの容量が大きくなるにつれて、32 ビットでは足りず、64 ビット CPU が一般的になってきました。

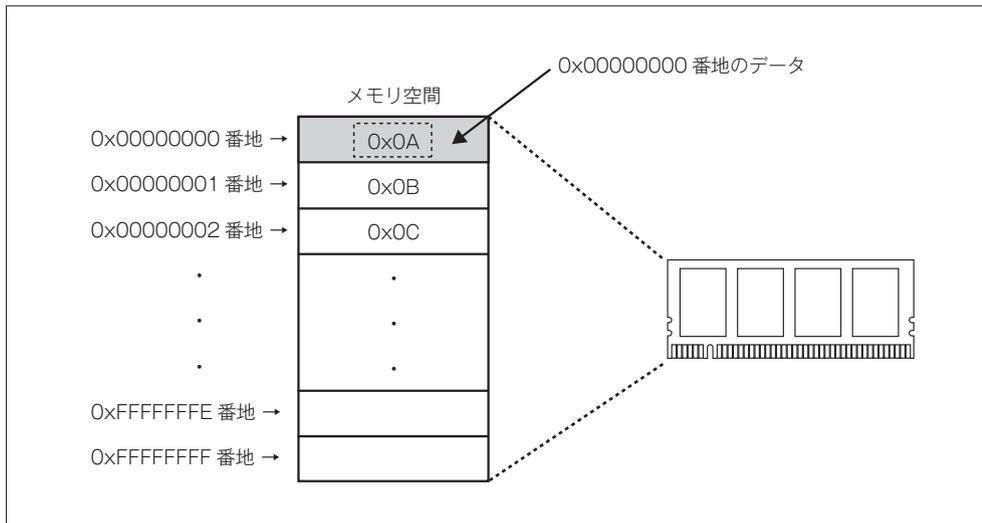
CPU のビット数には明確な定義があるわけではなく、レジスタ幅やアドレス幅、命令長やバス幅など、基準となるビット幅は様々です。大抵はその CPU が扱う整数型のデータ幅がビット幅と解釈されることが多いですが、実際は CPU メーカーの意思や主張によって異なります。また、ビット数とは別に、CPU が扱うアドレス空間やデータサイズをワードと言う単位で表します。一般的にワード長は CPU のビット数と同じになります。

1.2.3 メモリとは

メモリとは、命令（プログラム）やデータを格納し、保存しておくための記憶媒体です。コンピュータ内でデータやプログラムを記憶する記憶媒体のことを、単なるメモリ区別してメインメモリなどと呼びます。

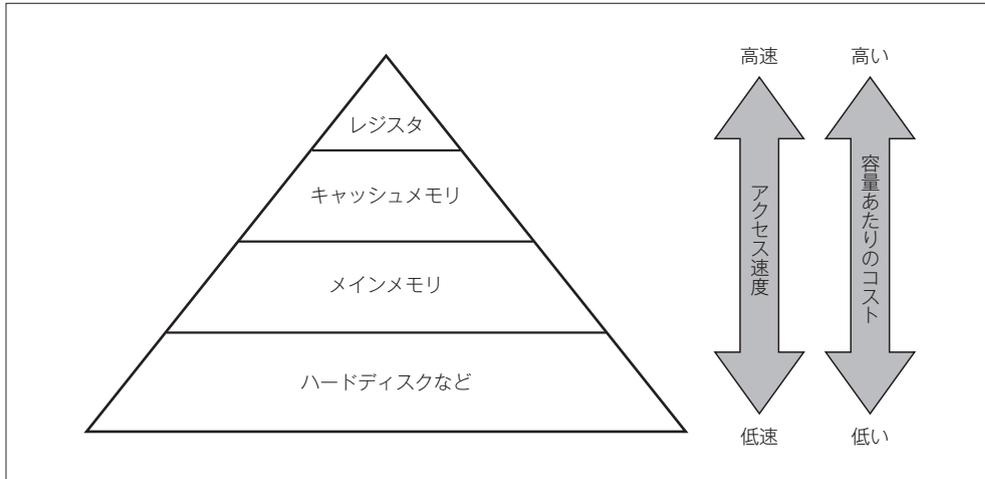
最近の一般的なコンピュータでは、メモリにDRAM（Dynamic Random Access Memory）が使用されています。DRAMとはコンデンサに電荷を溜めることで情報を保持するメモリです。コンデンサに電荷が溜まっている状態を1、溜まっていない状態を0とすることで、デジタル値を表現します。コンデンサに溜まっている電荷は時間と共に減少するため、一定周期ごとに再書き込みによる**記憶保持動作（リフレッシュ）**を行う必要があります。DRAMはアクセス方式や規格によって、SDRAM（Synchronous DRAM）やDDR SDRAM（Double Data Rate SDRAM）などの種類があります。

メモリは保存したデータを管理するために**アドレス**という概念を使用します。アドレスはデータを保存した場所を示すもので、データの住所のようなものです。単位データ毎に一意的なアドレスが付けられます。多くの場合、単位データとは1バイト（8ビット）単位です。このようなアドレスの付け方を**バイトアドレッシング**と言います。メモリとアドレスの関係を図1-8に示します。



▲ 図 1-8 メモリとアドレス

メモリを含む記憶装置は高速なものほどコストも高くなります。そのため、「高速で小容量」のものから、「中速で中容量」のもの、そして「低速で大容量」のものを組み合わせた記憶構造を使用します。この構造を**記憶階層**と言います。図 1-9 に記憶階層の例を示します。



▲ 図 1-9 記憶階層の例

記憶階層において、最も高速な記憶装置は、CPU 内にあるレジスタです。CPU はメモリに比べて非常に高速なので、CPU がメモリに直接アクセスするのは非効率です。メモリアクセスを高速化するために、CPU とメモリの間に**キャッシュメモリ**と言う高速で小容量のメモリを配置しています。

キャッシュメモリはメモリから読み出したデータを一時的に蓄えておきます。CPU がメモリアクセスを行う際、必要なデータがキャッシュ上に存在した場合はキャッシュがアクセスを代行し、高速なアクセスを実現します。キャッシュ自体も容量と速度に応じて記憶階層になっており、1次キャッシュ、2次キャッシュと言ったマルチレベルのキャッシュが用いられることが多いです。

1.2.4 I/O とは

I/O (Input/Output) とは、データの入出力を行う装置です。コンピュータはI/Oを通じて、外部とデータをやり取りします。コンピュータの処理は、外部からデータを入力し、内部でデータを処理し、外部に結果を出力するという手順で行われます。パソコンを例に挙げると、図 1-11 のようにマウスやキーボードからデータを入力し、プロセッサがプログラムに従いデータを処理し、ディスプレイなどを通して外部に結果を出力しています。

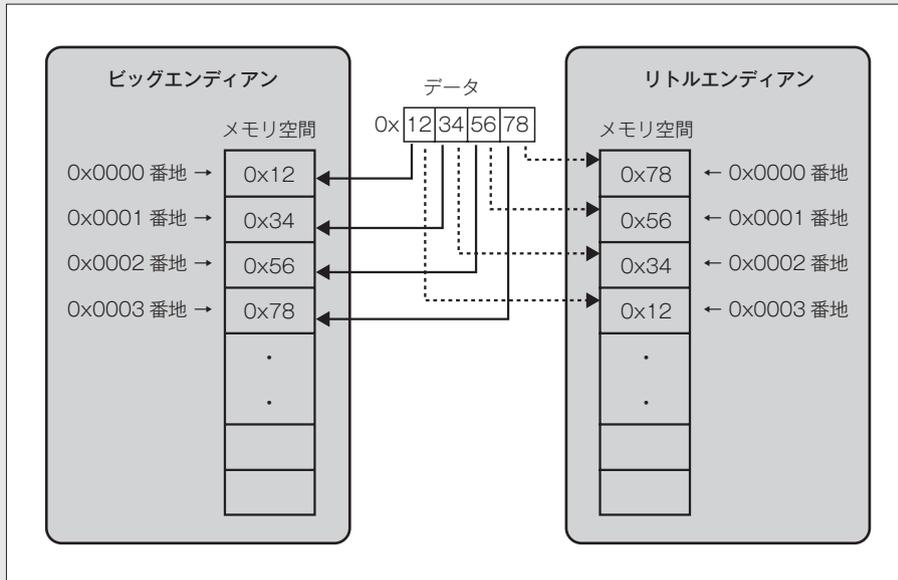
エンディアン

複数バイトのデータをメモリ上に配置する際、どの順番でメモリ上に格納するかをエンディアンと言います。例えば 0x12345678 という 4 バイトのデータがあり、これをメモリに格納する場合、0 番地に 0x12、1 番地に 0x34、2 番地に 0x56、3 番地に 0x78 と格納する方法をビッグエンディアンと言います。対して、0 番地に 0x78、1 番地に 0x56、2 番地に 0x34、3 番地に 0x12 と格納する方法をリトルエンディアンと言います。それぞれのデータ格納方法を図 1-10 に示します。

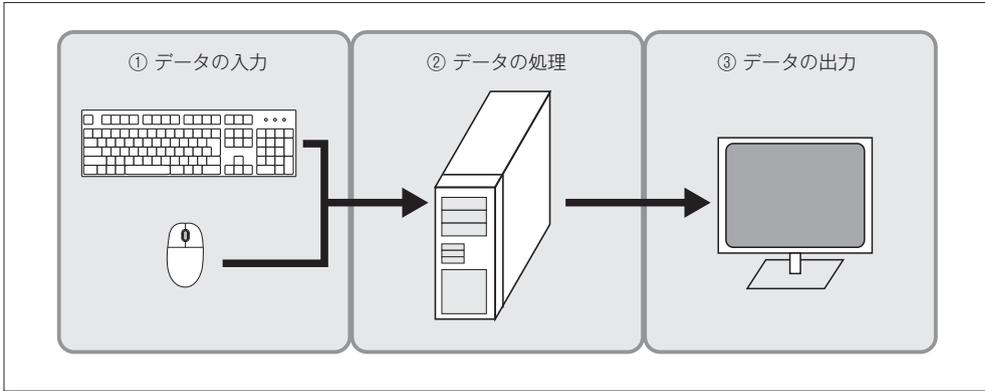
人間にとってはビッグエンディアンのほうがわかりやすいのですが、コンピュータにとってはデータ長が異なっても下位バイトの位置が同じであるリトルエンディアンのほうが扱いやすいと言われています。

CPU によって採用しているエンディアンは異なり、ソフトウェアの互換性や移植性で問題となることもしばしばあります。Intel 社の x86 アーキテクチャではリトルエンディアンが採用されています。対して、Sun Microsystems (現 Oracle) 社製の SPARC プロセッサや、MIPS Technologies 社製の MIPS プロセッサなどはビッグエンディアンを採用しています。

最近のプロセッサは、ソフトウェアの互換性や移植性という観点から両方のエンディアンをサポートし、プログラムに応じてエンディアンを切り替え可能なものも多いです。これをバイエンディアンと言います。



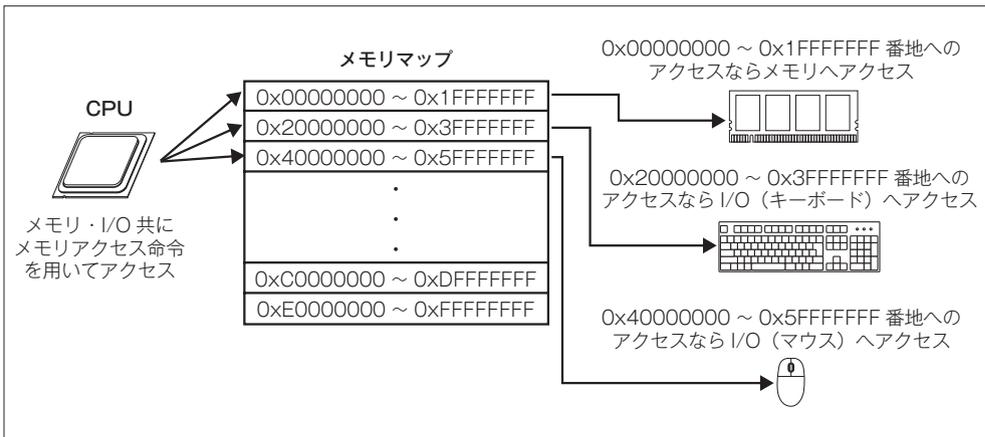
▲ 図 1-10 エンディアン



▲ 図 1-11 コンピュータの処理の流れ

I/O へアクセスする方法は、大きく分けてメモリマップド I/O とポートマップド I/O の 2 種類があります。

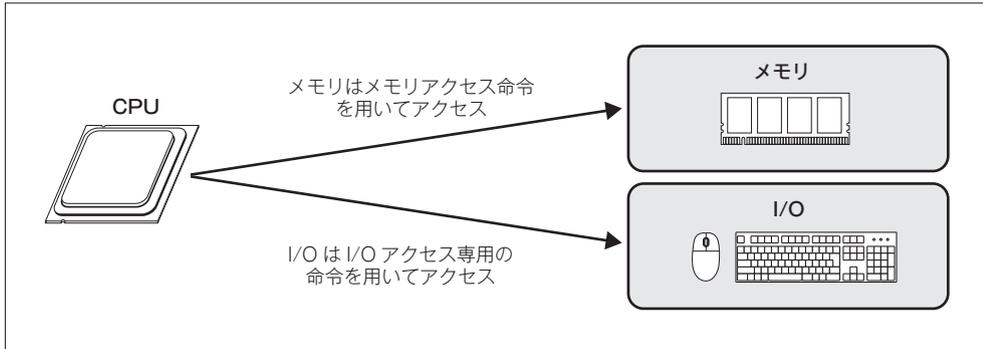
メモリマップド I/O とは、I/O もアドレスによって管理し、メモリと同様の方法でアクセスする方式です。メモリマップド I/O の概要を図 1-12 に示します。メモリマップド I/O では、メモリアクセス命令で I/O にもアクセスできるため、ハードウェアを簡略化できるという利点があります。しかし、アドレス空間が I/O に占有されてしまうのが欠点です。



▲ 図 1-12 メモリマップド I/O

ポートマップド I/O とは、I/O へアクセスするための専用命令を CPU がサポートする方法です。ポートマップド I/O の概要を図 1-13 に示します。ポートマップド I/O では、アドレス空間が全てメモリに割り当て可能であるということと、メモリアクセスと I/O へのアクセスを命令レベルで区別できるという利点があります。しかし、専用命令を必要

とするので、ハードウェアの設計が複雑になるという欠点があります。

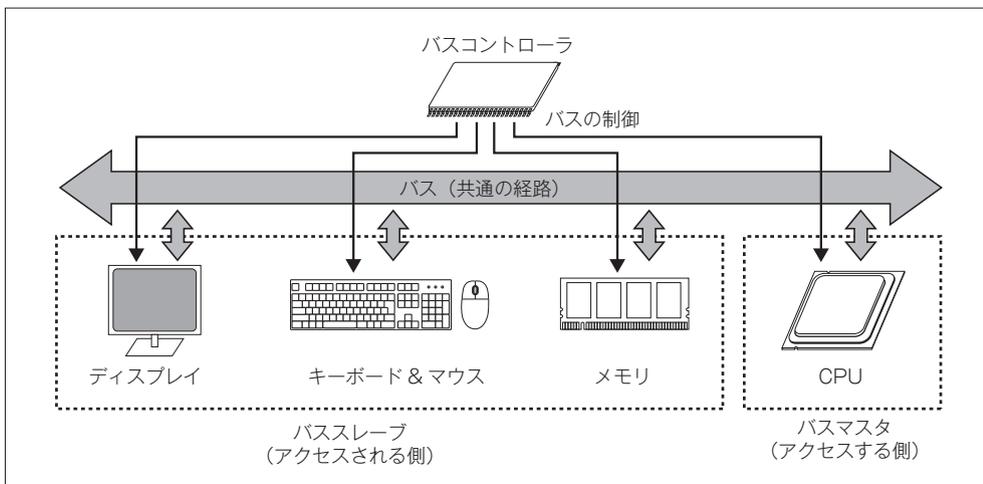


▲ 図 1-13 ポートマップド I/O

1.2.5 バスとは

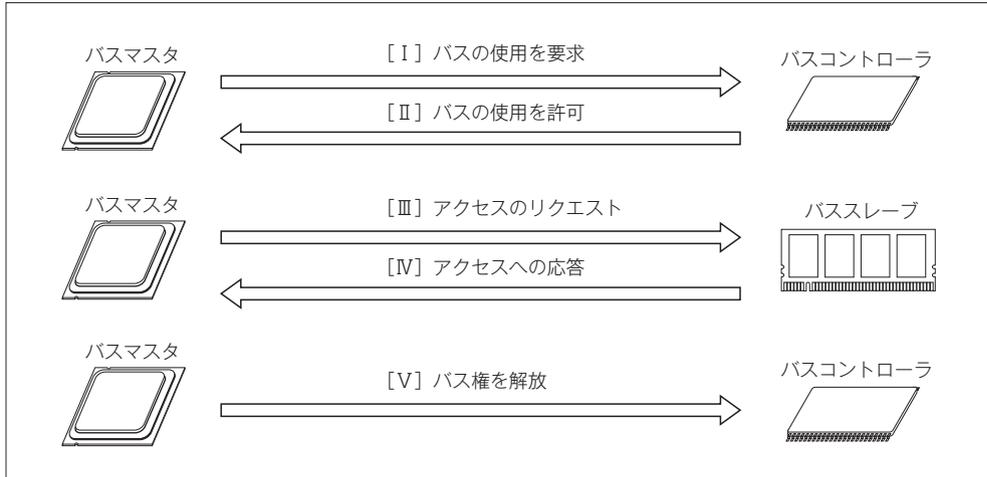
バスとは CPU やメモリ、I/O が互いにデータをやり取りするための共通の経路のことです。バスでは 1 つの信号線を複数のデバイスが共有し、通信を行います。図 1-14 にバスの例を示します。

バスを介してデータをやり取りする際、アクセスする側のことをバスマスタ、アクセスされる側のことをバススレーブなど呼びます。図 1-14 の例では、CPU がバスマスタ、メモリや I/O がバススレーブとなります。



▲ 図 1-14 バスの例

バスは一般的にデータ信号、アドレス信号、複数の制御信号で構成されます。データ信号はやり取りするデータの伝送、アドレス信号はアクセスするアドレスの指定、制御信号はバスアクセスの制御を行います。各信号のタイミングなど、やり取りを行ううえでの決まりをバスプロトコルと言います。バスを介してデータのやり取りを行う一連の動作をバストランザクションと言います。バストランザクションの例を図 1-15 に示します。



▲ 図 1-15 バストランザクションの例

[I] バスの使用を要求

多くの場合、バスには複数のバスマスタが接続されますが、バスは共通の経路なので、複数のバスマスタが同時に使用することはできません。そのため、複数のバスマスタからのアクセス要求を調停する必要があります。バスにアクセスする権利のことをバス権と言い、調停のことをバスアービトレーションと言います。バスアービトレーションはバスコントローラ内にあるバスアービタが行います。バスマスタはバスにアクセスする前にまずバスコントローラに対してバス権を要求します。

[II] バスの使用を許可

バスコントローラは複数のバスマスタからの要求を調停し、アービトレーションポリシーに従ってバスの使用を許可します。

[III] アクセスのリクエスト

バス権を得たバスマスタはバススレーブにアクセスのリクエストを送ります。リクエストには「何番地にアクセスするのか」「読み出しアクセスなのか書き込みアク

セスなのか」「書き込みアクセスの場合は書き込むデータ」などの情報が含まれます。

バスは共通の経路なので、バスマスタが出力した信号が全てのバススレーブに送られます。そこで、どのスレーブに対してのアクセスかを区別するために、チップセレクトなどと呼ばれる制御信号を使用します。チップセレクト信号はバススレーブ毎に個別に設けられています。チップセレクト信号を使ってアクセスするバススレーブを選択します。

一般的なバスでは、バススレーブ毎にアドレス空間が割り当てられており、アクセスするアドレスに基づいてバスコントローラ内にあるアドレスデコーダがチップセレクト信号を生成します。

[IV] アクセスへの応答

アクセスされたバススレーブは、リクエストに対する応答をバスマスタに返します。リクエストに対する応答はレディなどと呼ばれる制御信号を使用します。読み出しアクセスだった場合は、応答とともに読み出しデータを出力します。

[V] バス権を解放

バスの使用が終了したら、バスマスタはバスコントローラに通知し、バス権を解放します。

バスの利点・欠点

バスはバスプロトコルが共通であればどんなデバイスでも簡単に接続できるという利点があります。また、共通の経路を用いるため、ハードウェアのコストが低いという利点もあります。しかし、データ転送のスループットがあまり良くないという欠点もあります。

近年、1つのコンピュータ上に複数のCPUを搭載するマルチプロセッサが一般的になってきています。バスにアクセスするCPUの数が増えるごとに、バスが混雑することは容易に想像できます。そこで、1つの経路を全員で共有するバスに代わって、各ノードをネットワーク（相互結合網）で接続する技術も開発されています。

1.2.6 まとめ

この節ではコンピュータについて説明しました。多くのコンピュータは CPU、メモリ、I/O、そしてそれらを接続するバスによって構成されます。コンピュータでは CPU がメモリ上に格納されている命令を読み出して実行し、I/O からデータの入出力を行うことで処理を実現しています。

COLUMN

コンピュータに関する書籍

節末のコラムでは、その節の内容に関するより詳しい話や、体系的な知識を得る助けになる書籍をいくつか紹介していこうと思います。

●**コンピュータはなぜ動くのか (矢沢久雄著 / 日経 BP 社 / ISBN978-4822281656)**

この書籍では、コンピュータに関する初歩的な知識を幅広く紹介されています。ハードウェア、ソフトウェア、プログラミング、ネットワークなど様々な内容を扱っています。コンピュータとそれを取り巻く技術を理解するのに役立つでしょう。いわゆる専門書と言う類の書籍ではなく、コンピュータを専門にしていない方でも比較的読みやすい書籍です。

●**構造化コンピュータ構成 第4版 (Andrew S. Tanenbaum 著 / 長尾高弘訳 / ピアソンエデュケーション / ISBN978-4894712249)**

この書籍では、コンピュータに関する知識を体系的に学ぶことができます。この書籍はコンピュータサイエンスを専門にする高専生や大学生が教科書として使える内容です。本格的にコンピュータの勉強をしたいという方には大変お勧めです。原著の著者である Tanenbaum という方は、良い教科書を何冊も書いています。

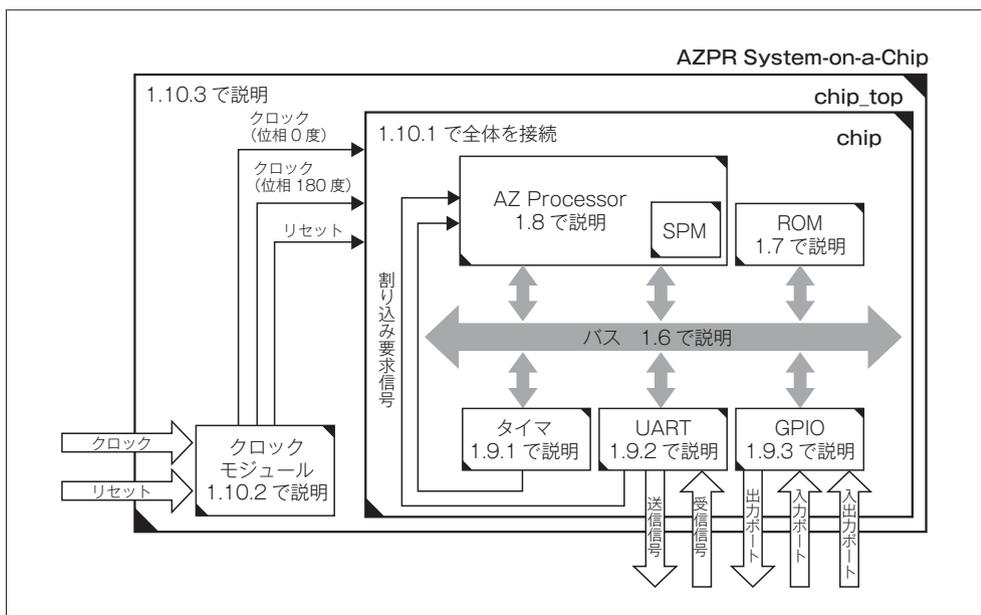
1.5 本章で作成するもの

この節では、この先本章で作成するものについて説明します。また、本章のソースコードの読み方や、全体に共通して使用されるマクロなどの説明をします。

1.5.1 本章で作成するものの全体像

AZPR SoC は、AZ Processor を中心に、プログラムを格納するための ROM (Read Only Memory)、時間を測るためのタイマ、シリアル通信規格の UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter)、LED やスイッチを制御するための GPIO (General Purpose Input Output)、それらを繋ぐバスで構成されています。

AZ Processor は専用の SPM (Scratch Pad Memory) を持っており、バスを介さずに高速にアクセス可能です。タイマと UART から出力される割り込み要求信号は、AZ Processor に接続されています。また、AZPR SoC は位相が 0 度と 180 度の 2 種類のクロックと、リセット信号を供給する必要があります。外部から入力される基底クロックとリセットをもとに、クロックモジュールが 2 種類のクロックとリセット信号を生成しています。図 1-74 に本章で作成する AZPR SoC のブロック図を示します。



▲ 図 1-74 本章で作成する AZPR SoC

まず 1.6 節で全体を接続するバスを作成します。次に 1.7 節で ROM を作成します。そして、1.8 節で本章のメインである CPU を作成します。1.9 節では I/O を作成します。最後に 1.10 節で全体を接続し、AZPR SoC が完成します。

1.5.2 本章のソースコードについて

■ ソースコードの読み方

本章では本文中にソースコードをリストとして貼り込み、説明します。本文中に掲載するソースコードは、何らかの制御を行っている個所を部分的に切り出して貼り込みます。基本的にモジュール宣言や信号線の定義などは省略した形で掲載します。その代り、各モジュールのポートや信号線、ヘッダで定義されているマクロなどは、表として本文中に掲載します。

実装する Verilog HDL のモジュールは、1 ファイルに 1 モジュールとし、ファイル名とモジュール名を同じものとします。表 1-9 にモジュール階層、表 1-10 にヘッダファイル一覧を示します。

▼ 表 1-9 モジュール階層

モジュール	モジュールの説明
chip_top	トップモジュール
├ clk_gen	クロック生成モジュール
├ └ x_s3e_dcm	ザイリンクス Digital Clock Manager
└ chip	SoC トップモジュール
├ cpu	CPU トップモジュール
├ └ if_stage	IF ステージ
├ └ └ bus_if	バスインタフェース
├ └ └ if_reg	IF/ID パイプラインレジスタ
├ └ id_stage	ID ステージ
├ └ └ decoder	命令デコーダ
├ └ └ id_reg	ID/EX パイプラインレジスタ
├ └ ex_stage	EX ステージ
├ └ └ alu	算術論理演算ユニット
├ └ └ ex_reg	EX/MEM パイプラインレジスタ
├ └ mem_stage	MEM ステージ
├ └ └ bus_if	バスインタフェース
├ └ └ mem_ctrl	メモリアクセス制御ユニット
├ └ └ mem_reg	MEM/WB パイプラインレジスタ

続<→

├ ctrl	CPU 制御ユニット
├ gpr	汎用レジスタ
├ spm	スクラッチパッドメモリ
└ x_s3e_dpram	ザイリンクスメモリマクロ デュアルポート RAM
rom	ROM
└ x_s3e_sprom	ザイリンクスメモリマクロ シングルポート ROM
timer	タイマ
uart	UART トップモジュール
├ uart_tx	UART 送信モジュール
├ uart_rx	UART 受信モジュール
└ uart_ctrl	UART 制御モジュール
gpio	GPIO
bus	バスストップモジュール
├ bus_addr_dec	アドレスデコーダ
├ bus_arbiter	バスアービタ
├ bus_master_mux	バスマスタマルチプレクサ
└ bus_slave_mux	バススレーブマルチプレクサ

▼表 1-10 ヘッダファイル一覧

ファイル名	説明	ファイル名	説明
nettype.h	デフォルトネットタイプ指定	bus.h	バスヘッダ
global_config.h	全体設定	gpio.h	GPIO ヘッダ
stddef.h	共通ヘッダ	rom.h	ROM ヘッダ
isa.h	ISA ヘッダ	timer.h	タイマヘッダ
cpu.h	CPU ヘッダ	uart.h	UART ヘッダ
spm.h	SPM ヘッダ		

■コーディングのポリシー

本書の Verilog HDL のソースコードは、可読性と理解のしやすさを第一に考えて記述しています。ソースコードは可能な限りコメントを記載し、理解の助けになるよう努めています。本書は日本語の書籍ですので、コメントも日本語にしています。

ソースコード内でのマジックナンバの使用は極力避け、マクロを使用しています。マジックナンバとはソースコードに埋め込まれた定数のことです。マジックナンバを避けることにより、ソースコードの可搬性が向上します。マクロに関しては全てヘッダファイル内で定義しています。

ソースコードは1行当たり80文字以内とし、インデントにはタブを使用しています。ソースコードは1行が端末の1行に収まるほうが読みやすいです。一般的な端末は1行が80文字なので、Verilog HDL に限らずソースコードは1行当たり80文字以内とすることが多いです。また、インデントなどに使用する文字は、タブを使用することをお勧めしま

す。タブはテキストエディタの設定によって幅を変更できるため、読む人が自由に変更できるという利点があります。筆者の環境ではタブをスペース4個分の幅で表示しています。

■ 識別子とマクロの命名規則

識別子は英小文字、数字、アンダースコア (`_`) で命名します。制御信号は極性を明確にするため、負論理の信号線には末尾にアンダースコア (`_`) を付けます。マクロは英大文字と英小文字、数字、アンダースコア (`_`) で命名します。定数は大文字とアンダースコア (`_`) で命名します。ビットの位置やバスなどを定義する場合は、単語の先頭を大文字にするアップーキャメルケースで記述します。

マクロの定義はヘッダファイルに記述します。ヘッダファイルにはインクルードガードを付けて再定義を防止します。インクルードガードとは、同じファイルが2回インクルードされることを防ぐテクニックです。インクルードファイル全体を「`ifndef`」で囲って、インクルードガード用のマクロをファイル内で定義することで、再度同じファイルがインクルードされた場合は「`ifndef`」によって無効にされるようにします。マクロの命名規則について図1-75に示します。

```

`ifndef __INC_GUARD__ // インクルードガード
  `define __INC_GUARD__ // インクルードガード用のマクロ

  `define DataBus 31:0 // ビットの位置やバスはアップーキャメルケース
  `define DATA_W 32 // 定数は大文字とアンダースコア

`endif // インクルードガード

```

▲ 図 1-75 マクロの命名規則

■ 全体で共通に使用するマクロ

本章のソースコード全体で共通に使用するヘッダファイルを表1-11に示します。

▼ 表 1-11 共通のヘッダファイル

ファイル名	役割
nettype.h	デフォルトネットタイプの定義
global_config.h	変更する可能性のあるパラメータの定義
stddef.h	共通に使用するマクロの定義

「nettype.h」では Verilog HDL のデフォルトネットタイプを定義しています。ミスを防止するために基本的にデフォルトネットタイプは無効にしています。リスト1-4に「nettype.h」を示します。

▼ リスト 1-4 デフォルトネットタイプの定義 (nettype.h)

```

11 `ifndef __NETTYPE_HEADER__ // インクルードガード
12     `define __NETTYPE_HEADER__
13
14     /****** デフォルトネットタイプ : いずれか1つを選択 *****/
15     `default_nettype none // none (推奨)
16 // `default_nettype wire // wire (Verilog標準)
17
18 `endif

```

「global_config.h」では変更の可能性があるパラメータを定義しています。使用するボードが変わった際に変更されるであろうリセット信号の極性や、FPGA が変わった際に変更されるであろうメモリの制御信号の極性、実装する I/O の選択等を定義しています。

表 1-12 に「global_config.h」のマクロ一覧を示します。

▼ 表 1-12 マクロ一覧 (global_config.h)

マクロ名	値	意味
POSITIVE_RESET	NaN	【リセット信号の極性を選択】 Active High でリセットする場合は POSITIVE_RESET を定義 Active Low でリセットする場合は NEGATIVE_RESET を定義
NEGATIVE_RESET	NaN	
POSITIVE_MEMORY	NaN	【メモリの制御信号の極性を選択】 Active High の場合は POSITIVE_MEMORY を定義 Active Low の場合は NEGATIVE_MEMORY を定義
NEGATIVE_MEMORY	NaN	
IMPLEMENT_TIMER	NaN	【実装する I/O を選択】 タイマを実装する場合は IMPLEMENT_TIMER を定義 UART を実装する場合は IMPLEMENT_UART を定義 General Purpose I/O を実装する場合は IMPLEMENT_GPIO を定義
IMPLEMENT_UART	NaN	
IMPLEMENT_GPIO	NaN	
RESET_EDGE	posedge	リセットエッジ (POSITIVE_RESET が定義された場合)
	negedge	リセットエッジ (NEGATIVE_RESET が定義された場合)
RESET_ENABLE	1'b1	リセット有効 (POSITIVE_RESET が定義された場合)
	1'b0	リセット有効 (NEGATIVE_RESET が定義された場合)
RESET_DISABLE	1'b0	リセット無効 (POSITIVE_RESET が定義された場合)
	1'b1	リセット無効 (NEGATIVE_RESET が定義された場合)
MEM_ENABLE	1'b1	メモリ有効 (POSITIVE_MEMORY が定義された場合)
	1'b0	メモリ有効 (NEGATIVE_MEMORY が定義された場合)
MEM_DISABLE	1'b0	メモリ無効 (POSITIVE_MEMORY が定義された場合)
	1'b1	メモリ無効 (NEGATIVE_MEMORY が定義された場合)

「stddef.h」は共通に使用するマクロを定義しています。信号レベルの H や L、制御信号の有効や無効など、共通で使用されるマクロを定義しています。表 1-13 に「stddef.h」のマクロ一覧を示します。

▼表 1-13 マクロ一覧 (stdint.h)

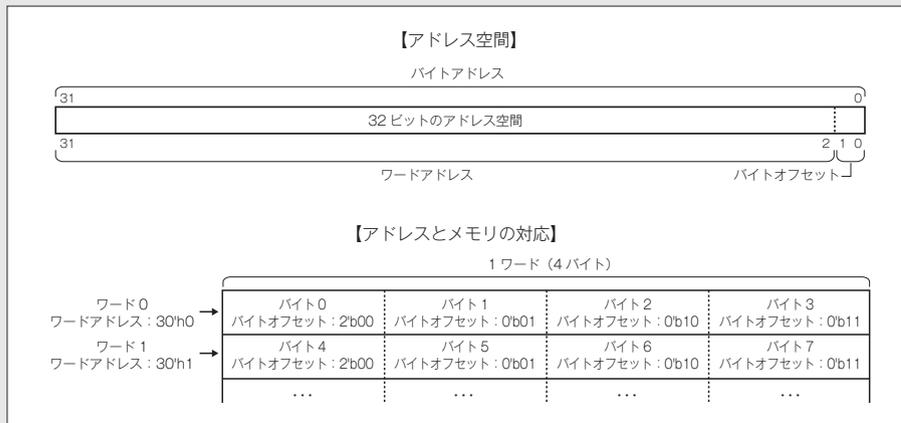
マクロ名	値	意味	マクロ名	値	意味
HIGH	1'b1	High レベル	WORD_DATA_W	32	データ幅 (ワード)
LOW	1'b0	Low レベル	WORD_MSB	31	最上位ビット (ワード)
DISABLE	1'b0	無効 (正論理)	WordDataBus	31:0	データバス (ワード)
ENABLE	1'b1	有効 (正論理)	WORD_ADDR_W	30	アドレス幅
DISABLE_	1'b1	無効 (負論理)	WORD_ADDR_MSB	29	最上位ビット
ENABLE_	1'b0	有効 (負論理)	WordAddrBus	29:0	アドレスバス
READ	1'b1	読み出し	BYTE_OFFSET_W	2	オフセット幅
WRITE	1'b0	書き込み	ByteOffsetBus	1:0	オフセットバス
LSB	0	最下位ビット	WordAddrLoc	31:2	ワードアドレスの位置
BYTE_DATA_W	8	データ幅 (バイト)	ByteOffsetLoc	1:0	バイトオフセットの位置
BYTE_MSB	7	最上位ビット (バイト)	BYTE_OFFSET_WORD	2'b00	ワード境界
ByteDataBus	7:0	データバス (バイト)			

COLUMN

ワードアドレスとバイトオフセット

CPU は 1 バイトよりも大きい単位のデータを一度に扱う場合があります。たとえば 32 ビット CPU であれば 32 ビット (4 バイト) のデータ、64 ビット CPU であれば 64 ビット (8 バイト) のデータを扱います。CPU が扱うデータサイズのことをワードと言い、1 ワードごとにアドレスを付ける方式をワードアドレッシングと言います。CPU 内部ではワード単位でデータを扱うため、アドレスもワードアドレスで扱ったほうが便利な場合があります。

AZ Processor は 32 ビット CPU で、1 ワードが 32 ビット (4 バイト) です。そこで、4 バイトごとにワードアドレスを割り当てます。AZ Processor のアドレス空間は 32 ビットです。この 32 ビットのアドレスはバイトアドレスですが、CPU 内では上位 30 ビットをワードアドレス、下位 2 ビット (4 バイト分のアドレス空間) をバイトオフセットとして扱います。図 1-76 にワードアドレスとバイトオフセットの関係を示します。



▲ 図 1-76 ワードアドレスとバイトオフセットの関係

1.12 おわりに

本章では、CPU、メモリ、I/O、さらにそれらを接続するバスを設計し、簡単なコンピュータシステムを SoC として実装しました。本章では、「どうやってつくるのか」に焦点を絞って解説してきました。

本章で扱ったコンピュータシステムの背景は非常に広く、説明が一足飛びになっている部分も多々あると思います。しかし、学術的な知識の本質を理解するためにも、実際に「ものをつくる」ことが非常に重要だと思っています。本章の内容がコンピュータシステムを理解する上での一助になれば幸いです。またそれと同時に、「ものをつくる」ことの面白さを少しでも伝えられれば嬉しく思います。

第2章

基板設計と製作

本章では、第1章で作成した AZPR SoC を動作させる基板の設計と製作を行います。AZPR SoC の実装には FPGA を使用します。基板の構成は FPGA の他に、スイッチや LED などの入出力に使用する周辺回路、各デバイスに必要な電圧を供給する電源回路からなります。

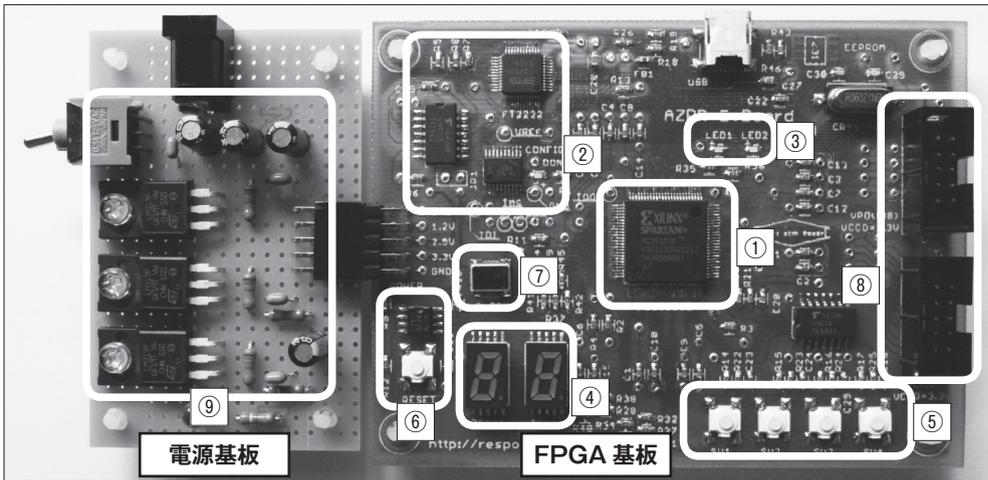
本章の前半では FPGA をはじめ、実装する部品を選定し、回路図・レイアウトを作成します。後半では基板を実際に製作する手順について説明します。感光基板による製作と、基板製造会社に製造を依頼する方法を選択できます。基板に部品を実装し、動作確認を取る過程について説明します。

2.1	はじめに	242
2.2	仕様策定	244
2.3	部品選定	251
2.4	回路設計	262
2.5	レイアウト設計	291
2.6	部品ライブラリの作成	306
2.7	基板の 3D 表示	314
2.8	感光基板による製作	326
2.9	基板製造サービスへの注文	352
2.10	部品実装	372
2.11	動作確認	375
2.12	おわりに	378

2.1 はじめに

第2章では、第1章で作成した AZPR SoC を動作させる基板を設計・製作します。最初に第2章で製作する基板の製作例を写真 2-1 に示します。基板は FPGA 基板と電源基板から構成されます。FPGA 基板の中央には、AZPR SoC の論理回路を構成する① FPGA を搭載します。周辺回路として、② FPGA のコンフィギュレーション回路、③ LED、④ 7セグメント LED、⑤ プッシュスイッチ、⑥ リセット回路、⑦ 水晶発振器、そして⑧ BOX ヘッダによる汎用入出力回路を搭載します。電源基板は、各デバイスに必要な電圧を供給する⑨電源回路を搭載します。この基板について、設計と製作の順に説明します。

なお、基板の製作を行わない場合はリファレンスボードを購入してください。本書のサポートページに案内があります。



▲ 写真 2-1 本書で製作する基板

製作のフローを図 2-1 に示します。

まず基板の設計について説明します。①仕様策定では、どのような基板を設計するのか仕様を決めます。この段階で基板の製作に必要な部品表を作成します。

②部品調達について説明します。電子部品はなるべく入手性の高いものを選定したので、秋葉原の店頭でほとんどの部品を揃えることができます。一部の部品はインターネット通信販売で入手する必要があるため、ウェブサイトからの購入についても説明します。

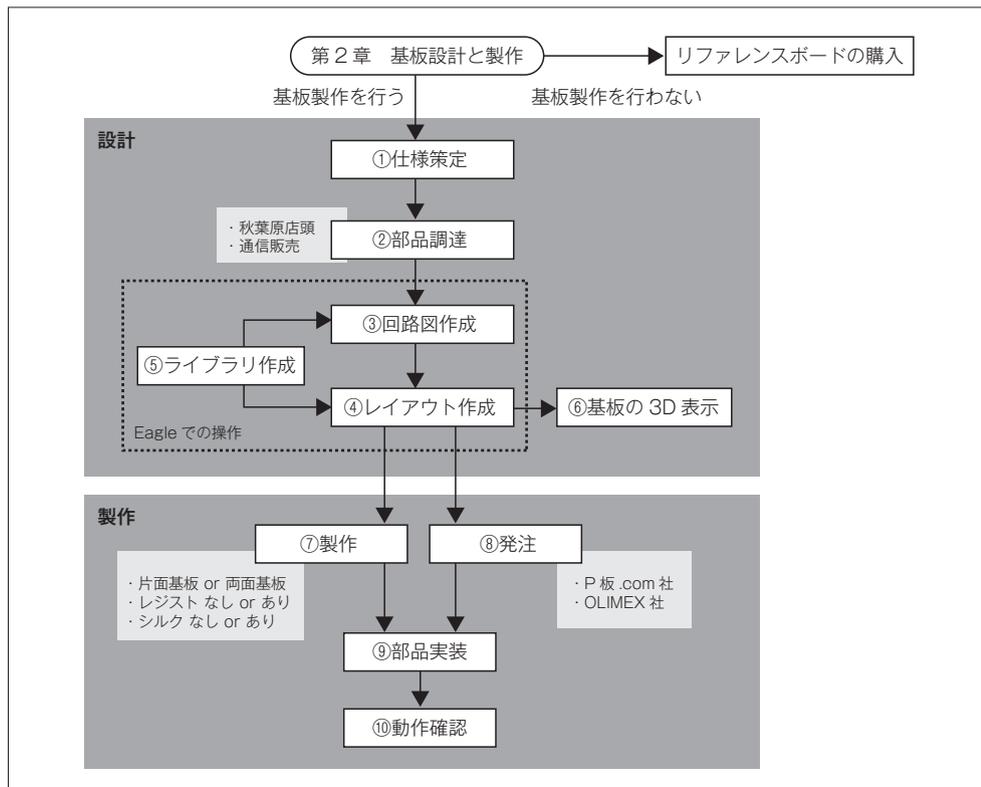
その後、Eagle という基板 CAD を用いて基板を設計します。③回路図作成を行い、続いて実際の配線パターンである④レイアウト作成を行います。さらに、回路図とレイアウト

トの作成に必要である⑤ライブラリ作成について説明します。また、必須ではありませんが⑥基板の3D表示についても説明します。

続いて基板の製作について説明します。⑦感光基板を用いて製作する方法と、⑧基板製造サービスへの発注を選ぶことができます。感光基板を用いた製作では、感光基板を使用してパターンのエッチングやレジスト処理、穴加工などを行います。必要となる道具が多いので、なるべくコストをかけず、片面基板で製作する方法と、コストをかけても仕上がりが良くなる両面基板での製作を選択可能です。基板製造サービスに関してはP板.com社とOLIMEX社という2社について注文方法を記載します。

基板の製造後、⑨部品実装を行います。部品実装は第2章で最も製作難易度が高い箇所です。本書で製作する基板では中級者以上のはんだ付けのスキルが必要になります。

部品実装後は、⑩正しく基板が動作することを確認します。AZPR SoCを使用した動作確認用のダイアグプログラムにて動作を確認します。全ての機能が正しく動作すれば基板の完成です。



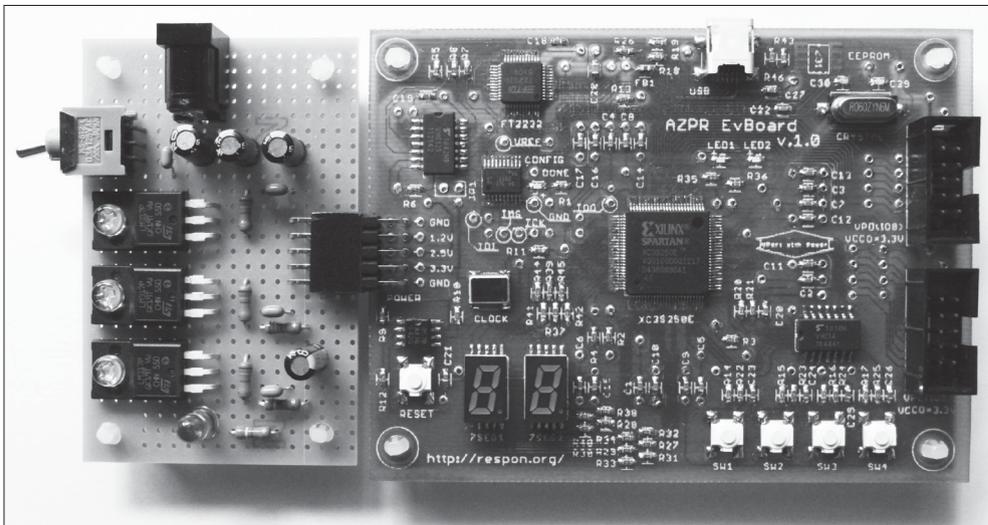
▲ 図 2-1 第2章の読み方

2.12 おわりに

本章では、FPGA 基板の設計と製作について説明しました。前半では基板の設計を行いました。必要な部品を選定し、回路設計・レイアウト設計を行いました。後半は基板の製作手順を説明しました。基板の製作は、感光基板を用いる方法と、基板製造サービスに依頼する方法について説明しました。

基板設計を行う際には、レイアウトのパターン設計の段階で部品の実装のしやすさを考慮すると、設計と製作のバランスが取れた基板が作れます。

最後に、完成した AZPR EvBoard は写真 2-41 のようになります。



▲ 写真 2-41 完成した AZPR EvBoard

第3章

プログラミング

本章では、AZ Processor 用のプログラムを作成し、AZPR EvBoard でプログラムを動作させます。まず、AZPR EvBoard の開発環境について説明します。その後、AZ Processor のプログラミングについて説明します。プログラミングの説明では、AZ Processor や AZPR SoC の機能にアクセスするサンプルプログラムを説明し、AZPR EvBoard でプログラムが動作するまでを解説します。

3.1	はじめに	380
3.2	開発環境	381
3.3	シリアル通信	442
3.4	プログラムローダ	454
3.5	割り込みと例外	471
3.6	7セグメント LED	487
3.7	応用プログラムの作成	498
3.8	おわりに	520

3.1 はじめに

本章では、AZ Processor 用のプログラムを作成し、AZPR EvBoard でプログラムを動作させます。まず、AZPR EvBoard の開発環境について説明します。開発に必要なツールを紹介し、各ツールのインストール方法と使い方を説明します。次に、AZ Processor のプログラミングについて説明します。サンプルプログラムを用いて AZ Processor や AZPR SoC に搭載されている I/O の使い方を説明し、AZPR EvBoard を使ってプログラムを動かします。最終的な応用プログラムとして、キッチンタイマーを作成します。

3.2 節で、開発環境を説明します。節の最後に、AZPR EvBoard の LED を制御するプログラムを作成し、動作を確認します。3.3 節から 3.7 節は AZ Processor のプログラミングの解説をします。3.3 節では、UART を使用したシリアル通信のプログラムによってパソコン上に文字を表示させます。3.4 節では、XMODEM を使用したプログラムローダを作成します。3.5 節では、割り込みと例外について説明します。3.6 節では、7セグメント LED の制御について説明します。最後に 3.7 節で応用プログラムの説明をします。

3.2 開発環境

本節では、AZ Processor のクロス開発環境について解説します。そして、AZPR EvBoard に実装した LED の制御を行うプログラムについて解説します。

パソコン上で動作するアプリケーションの開発のように、実行環境と同じシステムでプログラムを開発することをセルフ開発と言います。これに対して、実行環境とは異なるシステムでプログラムを開発することをクロス開発と言います。携帯電話や家電のような組込み機器では一般にクロス開発が行われています。AZ Processor のプログラム開発もクロス開発を行います。従って、パソコンでプログラムを作成し、実行ファイルを AZ Processor に転送して実行するという開発手順になります。

3.2.1 用意するもの

AZ Processor のプログラム開発には、AZPR EvBoard、AC アダプタ、パソコン、USB ケーブルが必要となります。

■AZPR EvBoard

AZPR EvBoard は、第 2 章で解説している FPGA 評価基板です。

■AC アダプタ

AC アダプタは AZPR EvBoard に給電するために使います。2.3.2 項に記載されているように、出力電圧が 5[V]、出力電流が 1[A] 以上のものを使用してください。

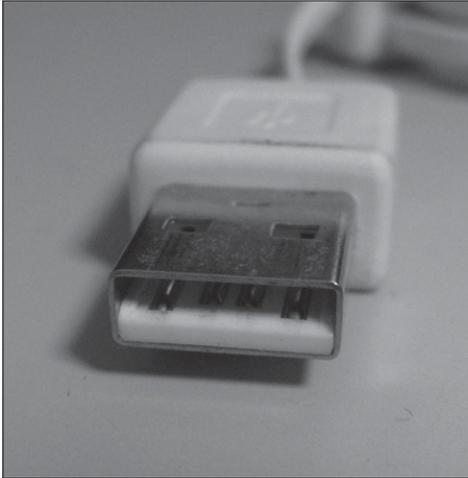
■パソコン

開発に使用するパソコンの OS は、Windows 7 を対象としています。AZPR EvBoard との接続は USB ポートを介して行うため、パソコンに USB ポートが搭載されている必要があります。

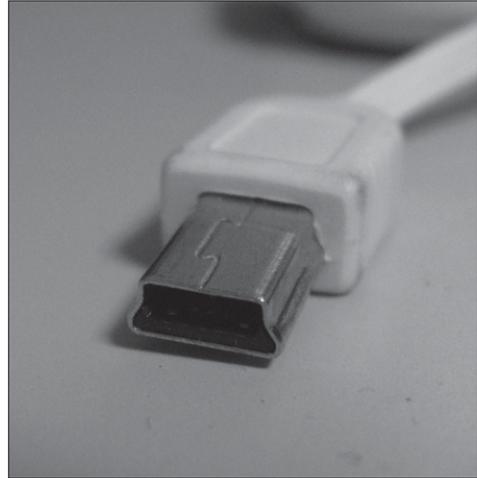
■USB ケーブル

USB ケーブルは、パソコンと AZPR EvBoard を接続するために使います。パソコンの USB コネクタは一般に A コネクタです。一方、AZPR EvBoard の USB コネクタはミニ B コネクタとなっています。従って、使用する USB ケーブルは片方のコネクタが A コネ

クタ、もう片方のコネクタがミニBコネクタとなっている必要があります。写真3-1にAコネクタ、写真3-2にミニBコネクタを示します。



▲写真3-1 USB A コネクタ



▲写真3-2 USB ミニ B コネクタ

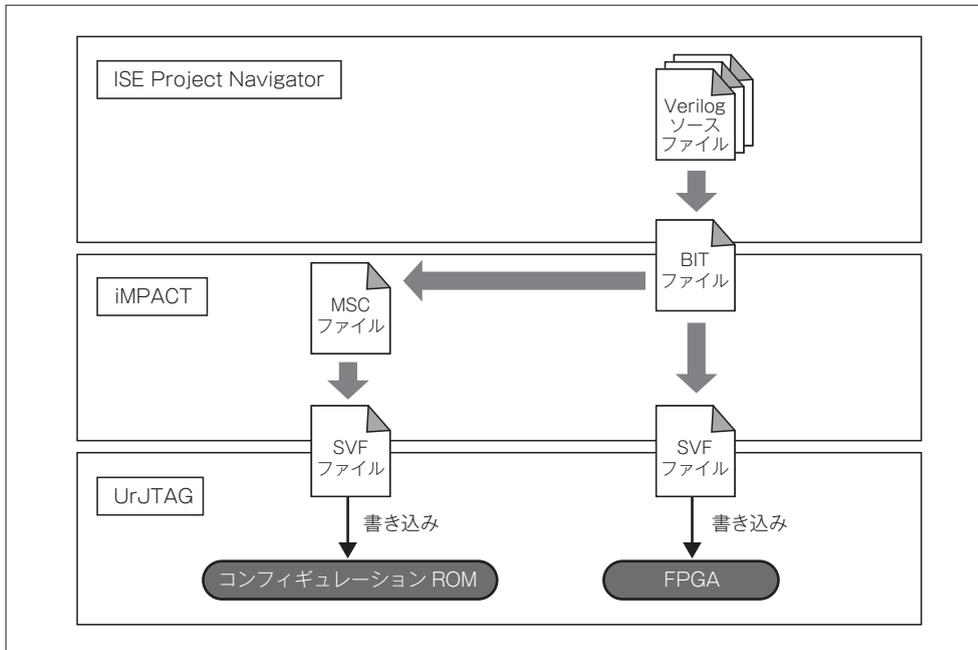
3.2.2 FPGA 開発環境について

FPGA を開発するにあたり、ISE WebPACK と UrJTAG という 2 種類のツールをインストールします。

ISE WebPACK は、サイリンクス社から提供されている FPGA のための統合開発環境です。論理合成、配置配線、コンフィギュレーションなどの FPGA の開発に必要な複数のツールが含まれています。論理合成とは、ハードウェア記述言語によるソースコードを、ゲートレベルのネットリストに変換することを言います。このネットリストに従い、ゲートやネットを FPGA の論理ブロックと I/O ピンに割り当てる作業を配置配線と言います。

UrJTAG は、デバイスにアクセスし、JTAG 操作を実行するためのツールです。AZPR EvBoard に搭載されている USB のコンフィギュレーション回路を利用して FPGA やコンフィギュレーション ROM への書き込みを行うため、USB をサポートしている UrJTAG を使用します。

これらのツールを使って、第1章で作成したソースコードを変換し、書き込みを行います。ファイル変換と使用するツールの対応を図3-1に示します。



▲ 図 3-1 ファイル変換と使用するツールの対応

■ ISE Project Navigator

ISE Project Navigator は ISE WebPACK に含まれるツールです。ISE Project Navigator を使用して、第 1 章で作成した Verilog で記述されたソースファイルから、FPGA のコンフィギュレーション情報を格納したファイルである BIT ファイルを作成します。

■ iMPACT

iMPACT は、ISE WebPACK に含まれるツールです。iMPACT というツールを使い、BIT ファイルから JTAG 操作を記述したファイルである SVF ファイルを作成します。

多くの FPGA は、プログラム素子に SRAM を使用しています。SRAM は揮発性メモリのため、電源を一度 OFF にしてしまうとコンフィギュレーション情報が消えてしまいます。電源を OFF にしてもコンフィギュレーション情報が消えないように、FPGA に接続されている不揮発性メモリのコンフィギュレーション ROM に対してプログラミングを行うと、電源 ON 時にコンフィギュレーション ROM から FPGA にコンフィギュレーションが行われます。コンフィギュレーション ROM にコンフィギュレーション情報を書き込むには MCS ファイルを作成する必要があります。BIT ファイルから iMPACT を使い、

MCS ファイルを作成します。そして、BIT ファイルと同様に、iMPACT を使って、MCS ファイルから SVF ファイルを作成します。

SVF ファイルは JTAG 操作を記述したファイルです。コンフィギュレーション情報を SVF 形式でファイルに出力し、次に説明する UrJTAG で使用します。

■UrJTAG

UrJTAG を使って SVF ファイルに記述されている JTAG 操作を実行し、FPGA やコンフィギュレーション ROM への書き込みを行います。

3.2.3 ISE WebPACK

ここでは、ISE WebPACK のインストール手順と、使い方を説明します。

■インストール

ISE WebPACK はザイリンクス社の以下のウェブサイトからダウンロードできます。

ザイリンクス社ウェブサイト

<http://japan.xilinx.com/>

ダウンロードのリンクから、**図 3-2** に示す ISE Design Suite の「Windows 用フルインストーラ」をクリックします。

ダウンロード時に、ログイン画面が表示されます。ISE WebPACK を使うためには、ザイリンクス社のアカウントが必要なので、アカウント作成を行います。アカウント作成画面を**図 3-3** に示します。必須入力のフォームに入力し、[Create Account] ボタンをクリックしてアカウントを作成してください。

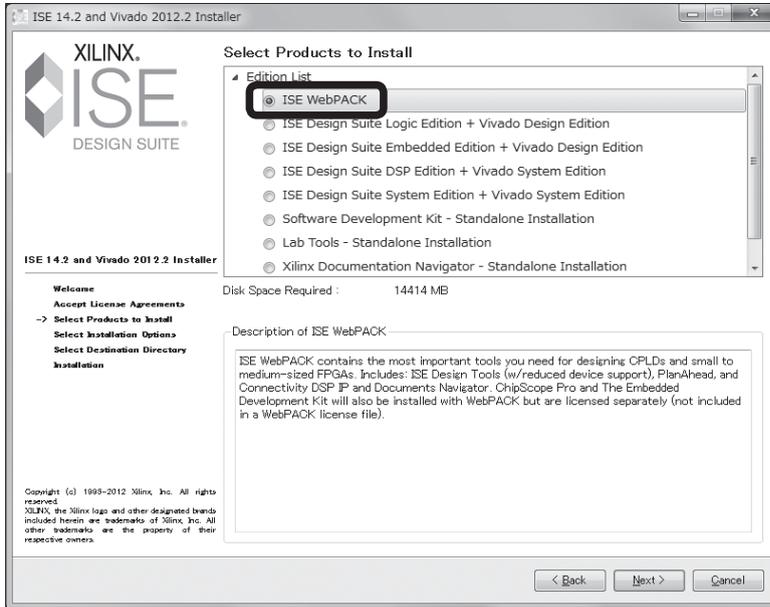
アカウント作成が終了すると、登録したメールアドレスにメールが送られてきます。メールに記載された URL にアクセスすると、登録したユーザ名とパスワードを使ってログインできるようになります。ログインすると ISE Design Suite のインストーラをダウンロードできます。ダウンロードしたファイルを解凍して、解凍したファイルの中にある「xsetup.exe」をダブルクリックすると、インストーラが起動します。[次へ] ボタンをクリックして、インストールを進めます。**図 3-4** に示す「インストールするエディションの選択」の画面では、[エディションのリスト] から「ISE WebPACK」を選択します。



▲ 図 3-2 ISE Design Suite インストーラのダウンロード画面

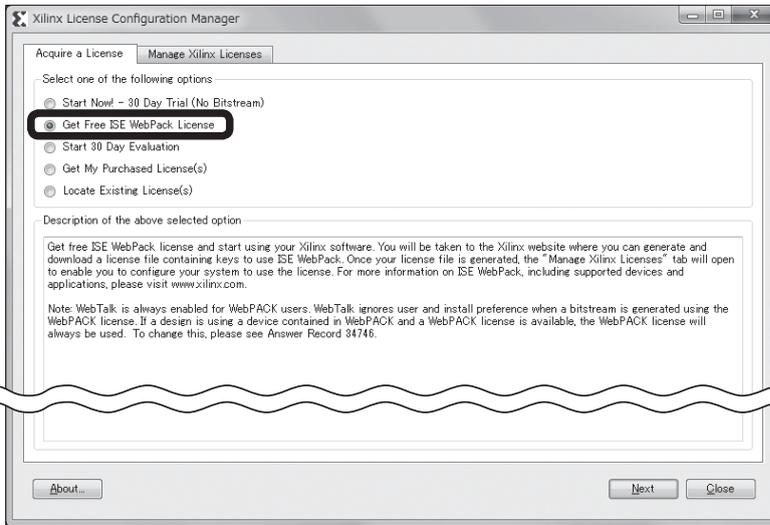


▲ 図 3-3 アカウント作成の画面



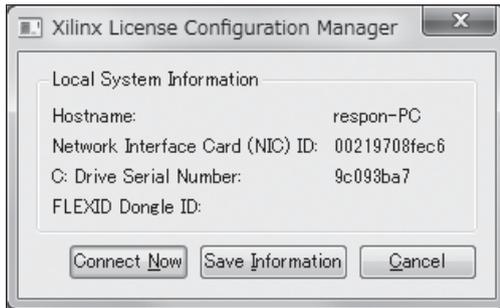
▲ 図 3-4 インストールするエディションの選択

インストールが進むと、図 3-5 の「Xilinx License Configuration Manager」ダイアログが表示されます。ここで「Get Free ISE WebPack License」を選択し、[Next] ボタンをクリックします。



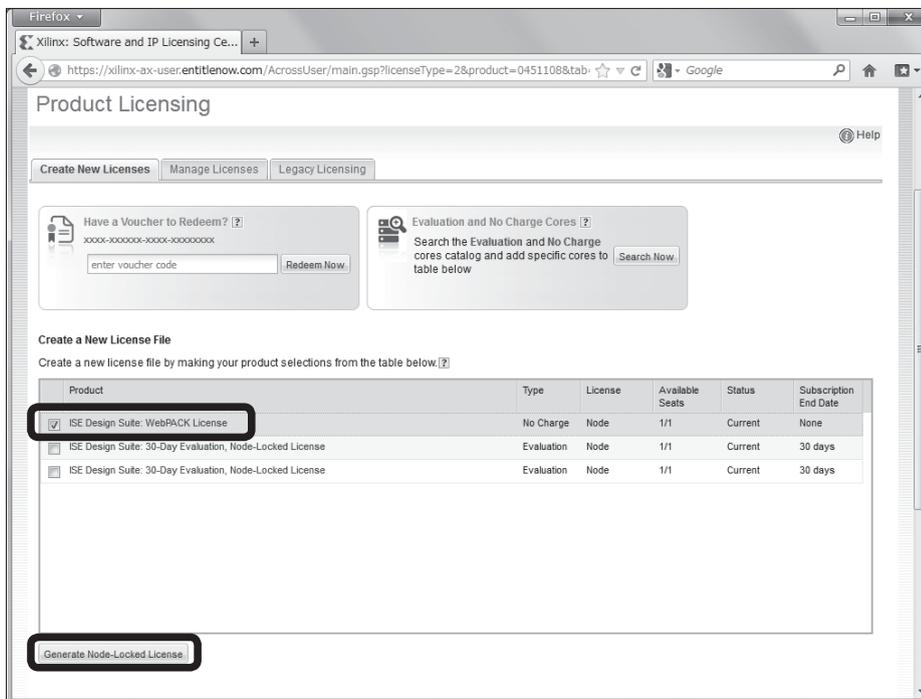
▲ 図 3-5 Xilinx License Configuration Manager (1 / 2)

続いて、図 3-6 のダイアログが表示されるので、[Connect Now] ボタンを選択します。



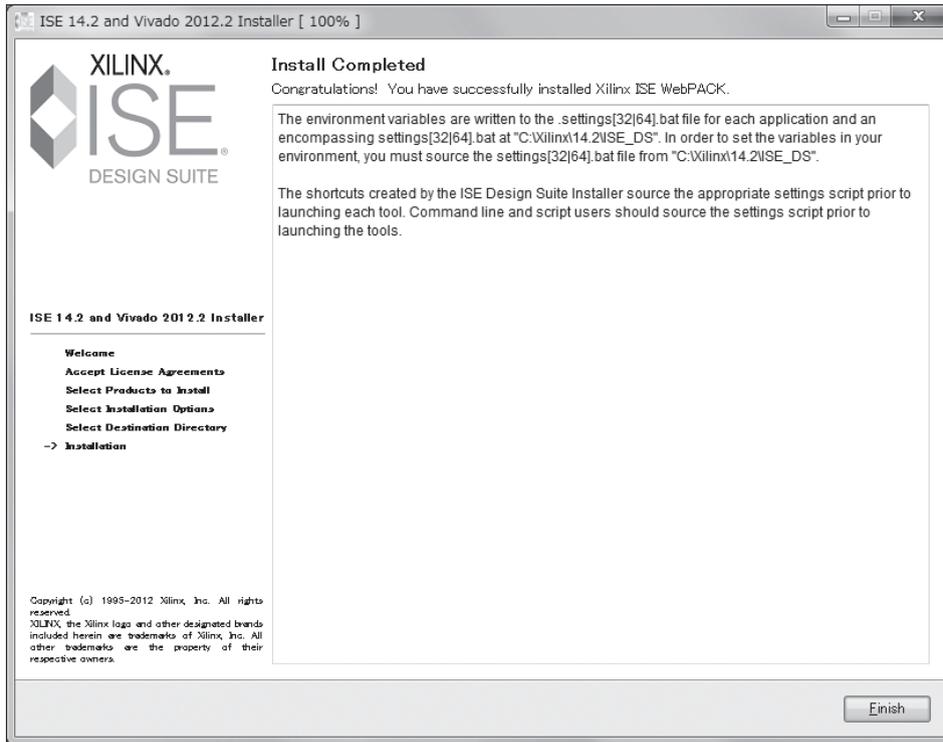
▲ 図 3-6 Xilinx License Configuration Manager (2 / 2)

ウェブブラウザにザイリンクス社のウェブサイトのログイン画面が表示されるので、先程取得したユーザ名とパスワードを入力してログインします。ログイン後の図 3-7 の画面で、[ISE Design Suite: WebPACK License] を選択して、[Generate Node-Locked License] ボタンをクリックします。



▲ 図 3-7 ライセンスを取得する画面

以上でインストールが完了し、図 3-8 に示す「インストール完了」の画面が表示されます。



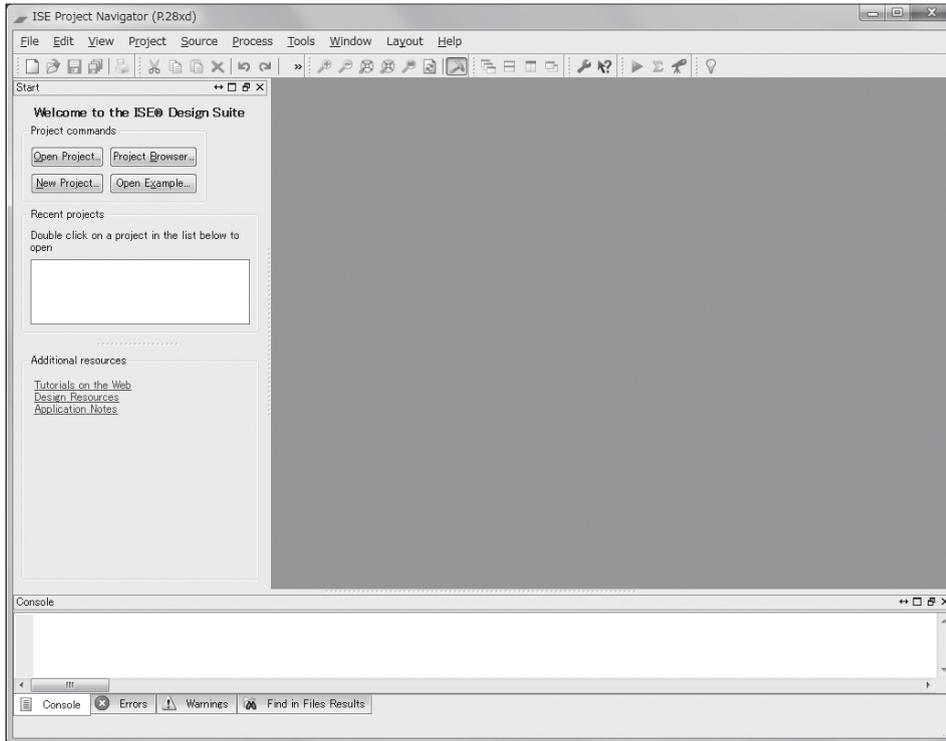
▲ 図 3-8 インストール完了

■BIT ファイルの作成

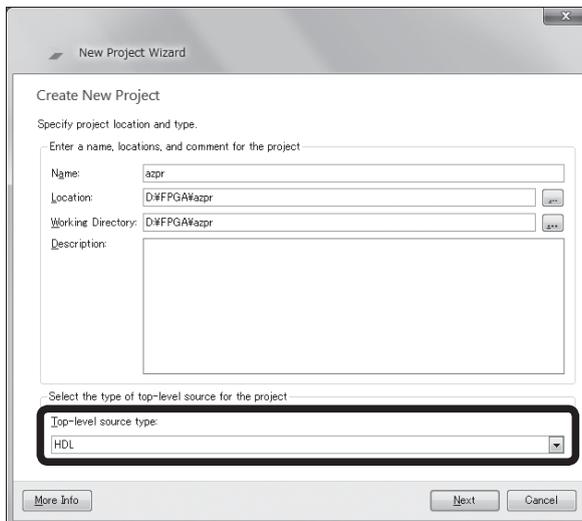
BIT ファイルは、FPGA のコンフィギュレーション情報を格納したファイルです。ISE Project Navigator を使って作成します。ISE Project Navigator は、ソースファイルを管理し、論理合成、配置配線などを行うためのツールです。ここでは、ISE Project Navigator を使い、BIT ファイルを作成する方法を説明します。

まず、ISE Project Navigator を起動し、メニューバーから [File] → [New Project] を選択して、新しいプロジェクトを作成します。ISE 起動時の ISE Project Navigator ウィンドウを図 3-9 に示します。

「New Project Wizard」ダイアログが起動するので、「Create New Project」の画面では、プロジェクトのファイルパスとソースのタイプを入力します。図 3-10 で示すように [Top-level source type] は「HDL」を選択します。

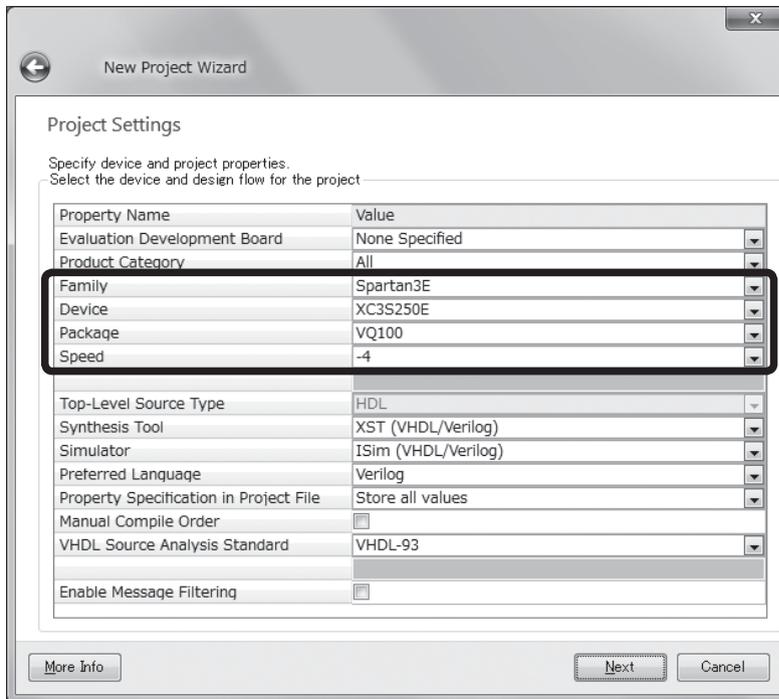


▲ 図 3-9 ISE 起動時の ISE Project Navigator ウィンドウ



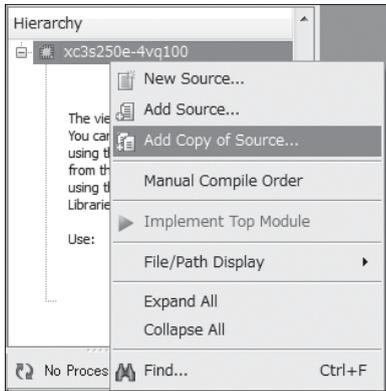
▲ 図 3-10 New Project Wizard (1 / 2)

次に表示される「Project Settings」の画面では、ターゲットデバイスの選択を行います。AZPR EvBaord のFPGA は Spartan 3E の XC3S250E、パッケージが VQ100、スピードグレードが -4 なので、[Family] の Value に「Spartan3E」、[Device] の Value に「XC3S250」、[Speed] の Value に「-4」を入力します。入力した画面を図 3-11 に示します。



▲ 図 3-11 New Project Wizard (2 / 2)

[Next] ボタンを押して「New Project Wizard」ダイアログを進めます。「New Project Wizard」ダイアログの完了後、プロジェクトにソースコードを追加します。図 3-12 で示すように、「xc3s250e-4vq100」と表示されている部分を右クリックし「Add Copy of Source」を選択します。



▲ 図 3-12 Add Copy of Source の選択

「Add Copy of Source」ダイアログでは、第 1 章で解説した AZPR SoC のソースコードをすべて指定します。ここで指定するヘッダファイルの一覧を表 3-1 に、ソースファイルの一覧を表 3-2 に示します。

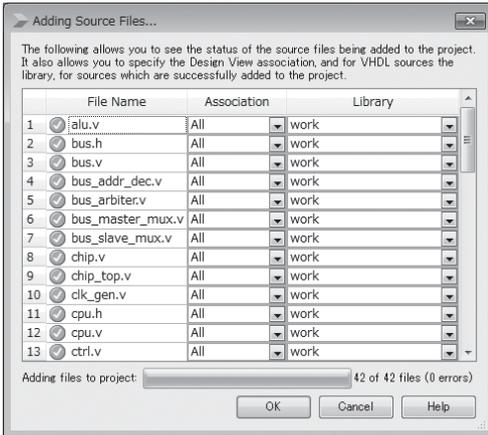
▼ 表 3-1 ヘッダファイル一覧

ファイル名	説明
nettype.h	デフォルトネットタイプ指定
global_config.h	全体設定
stddef.h	共通ヘッダ
isa.h	ISA ヘッダ
cpu.h	CPU ヘッダ
spm.h	SPM ヘッダ
bus.h	バスヘッダ
gpio.h	GPIO ヘッダ
rom.h	ROM ヘッダ
timer.h	タイマヘッダ
uart.h	UART ヘッダ

▼表 3-2 ソースファイルの一覧

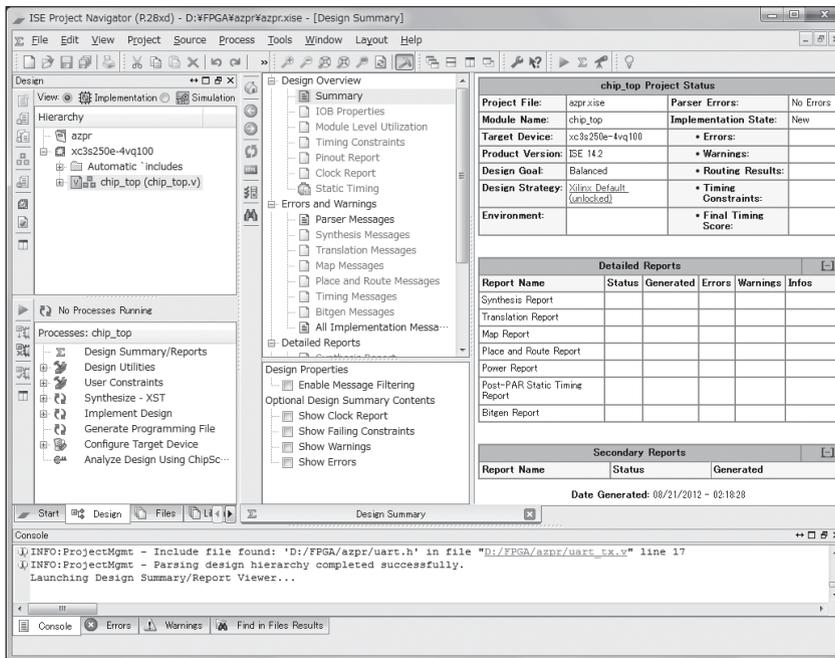
ファイル名	モジュールの説明
chip_top.v	トップモジュール
├ clk_gen.v	クロック生成モジュール
└ chip.v	SoC トップモジュール
├─┬ cpu.v	CPU トップモジュール
│ │├ if_stage.v	IF ステージ
│ │ │├ bus_if.v	バスインタフェース
│ │ │└ if_reg.v	IF/ID パイプラインレジスタ
│ │├ id_stage.v	ID ステージ
│ │ │├ decoder.v	命令デコーダ
│ │ │└ id_reg.v	ID/EX パイプラインレジスタ
│ │├ ex_stage.v	EX ステージ
│ │ │├ alu.v	算術論理演算ユニット
│ │ │└ ex_reg.v	EX/MEM パイプラインレジスタ
│ │├ mem_stage.v	MEM ステージ
│ │ │├ mem_ctrl.v	メモリアクセス制御ユニット
│ │ │└ mem_reg.v	MEM/WB パイプラインレジスタ
│ │├ ctrl.v	CPU 制御ユニット
│ │├ gpr.v	汎用レジスタ
│ │└ spm.v	スクラッチパッドメモリ
├ rom.v	ROM
├ timer.v	タイマ
├ uart.v	UART トップモジュール
│ │├ uart_tx.v	UART 送信モジュール
│ │├ uart_rx.v	UART 受信モジュール
│ │└ uart_ctrl.v	UART 制御モジュール
├ gpio.v	GPIO
└ bus.v	バストップモジュール
├─┬ bus_addr_dec.v	アドレスデコーダ
│ │├ bus_arbiter.v	バスアービタ
│ │├ bus_master_mux.v	バスマスタマルチプレクサ
│ │└ bus_slave_mux.v	バススレーブマルチプレクサ

指定したファイルはプロジェクトを作成したフォルダにコピーされます。図 3-13 のように「Adding Source Files」ダイアログが表示されるので、[OK] をクリックします。



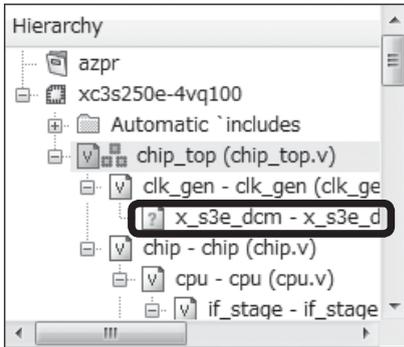
▲ 図 3-13 Adding Source Files

ソースコードが追加された後の ISE Project Navigator ウィンドウを図 3-14 に示します。



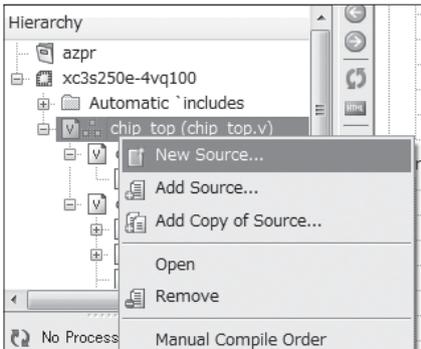
▲ 図 3-14 ソースコード追加後の ISE Project Navigator ウィンドウ

ここで、ソースコードで宣言のみ行っているモジュールを作成します。図 3-15 の枠で囲まれている部分のように、宣言のみ行っているモジュールは「？」マークのアイコンが表示されます。



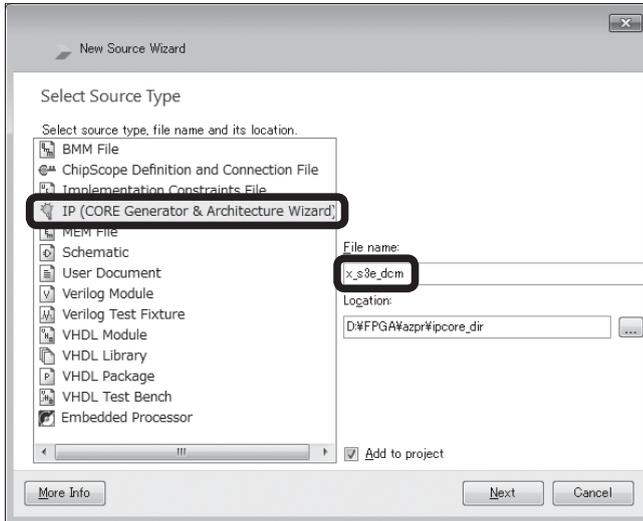
▲ 図 3-15 宣言のみ行っているモジュール

AZPR SoC では、「x_s3e_dcm」と「x_s3e_sprom」と「x_s3e_dpram」が「？」マークのアイコンになっています。まずは、「x_s3e_dcm」を作成します。「chip_top (chip_top.v)」を右クリックして、「New Source」を選択します。図 3-16 に「New Source」を選択している画面を示します。



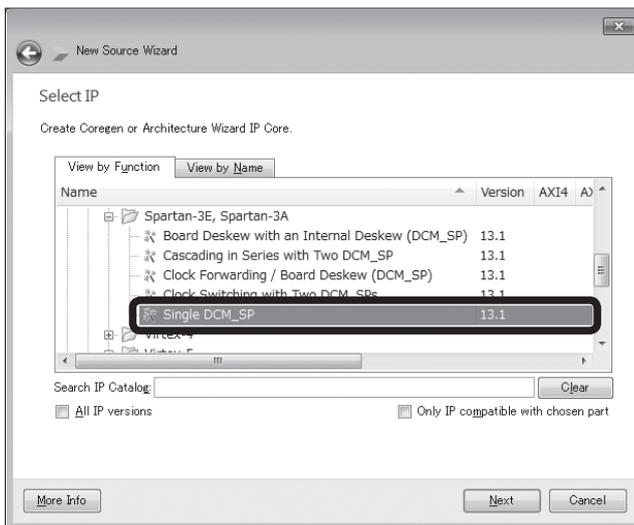
▲ 図 3-16 New Source の選択

「New Source」をクリックすると図 3-17 に示す「New Source Wizard」ダイアログが起動します。「Select Source Type」の画面では、左側は「IP (CORE Generator & Architecture Wizard)」を選択し、[File name] にはモジュール名である「x_s3e_dcm」を入力します。



▲ 図 3-17 New Source Wizard (1 / 2)

[Next] をクリックすると図 3-18 に示す「Select IP」の画面になるので、ここで、[FPGA Features and Design] → [Spartan-3E, Spartan-3A] → [Single DCM _SP] を選択します。



▲ 図 3-18 New Source Wizard (2 / 2)

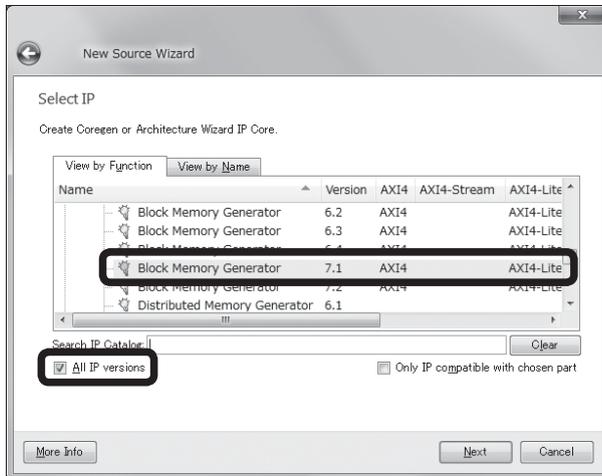
[Next] ボタンをクリックして次に進むと、図 3-19 に示す「Xilinx Clocking Wizard」ダイアログが表示されます。AZPR SoC では、オシレータから入力される 10[MHz] のクロックと、180 度位相の異なる反転クロックが必要です。反転クロックを生成するために、このダ

イアログでは、「CLK180」のチェックボックスにチェックを入れます。また、「Input Clock Frequency」に「10」を入力し、「MHz」を選択します。他の項目は、変更する必要ありません。



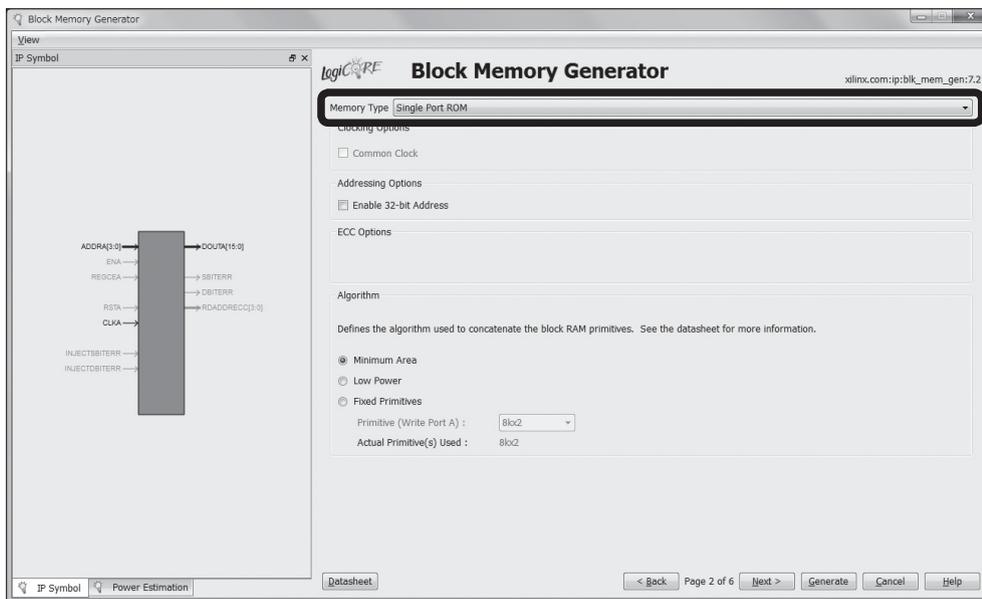
▲ 図 3-19 Xilinx Clocking Wizard

次は、「x_s3e_sprom」を作成します。「x_s3e_dcm」を作成したときと同様に、「chip_top」を右クリックして「New Source」を選択します。「New Source Wizard」ダイアログの「Select Source Type」の画面では、「IP (CORE Generator & Architecture Wizard)」を選択し、[File name]にはモジュール名である「x_s3e_sprom」を入力します。「Select IP」の画面では、図 3-20 のように「All IP versions」にチェックを入れ、[Memories & Storage Elements] → [RAMs&ROMs] → [Block Memory Generator] を選択します。筆者の環境で Block Memory Generator の Version 7.2 を使用したところ、この後で説明する Synthesize でエラーが発生することが確認されました。ザイリックス社へ問い合わせ、2012年8月28日現在バグが含まれているとの回答を得ましたので、[Block Memory Generator] は図 3-20 のように「Version 7.2」以外を選択してください。



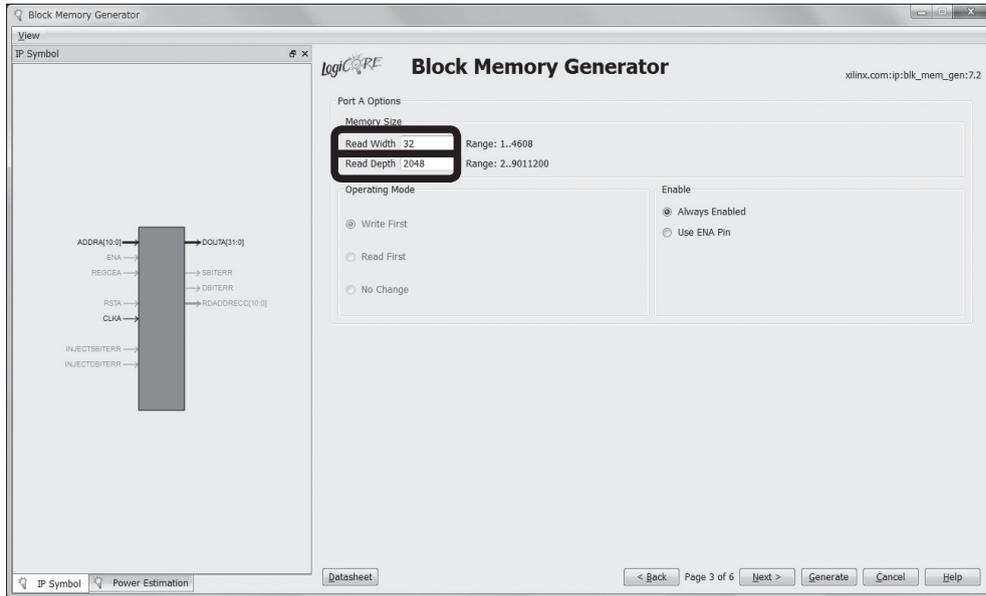
▲ 図 3-20 New Source Wizard

「New Source Wizard」ダイアログが完了すると、図 3-21 で示すように「Block Memory Generator」ダイアログが起動します。ここで、「Memory Type」を指定します。「x_s3e_sprom」を作成するときは「Single Port ROM」を選択します。



▲ 図 3-21 Block Memory Generator (1 / 4)

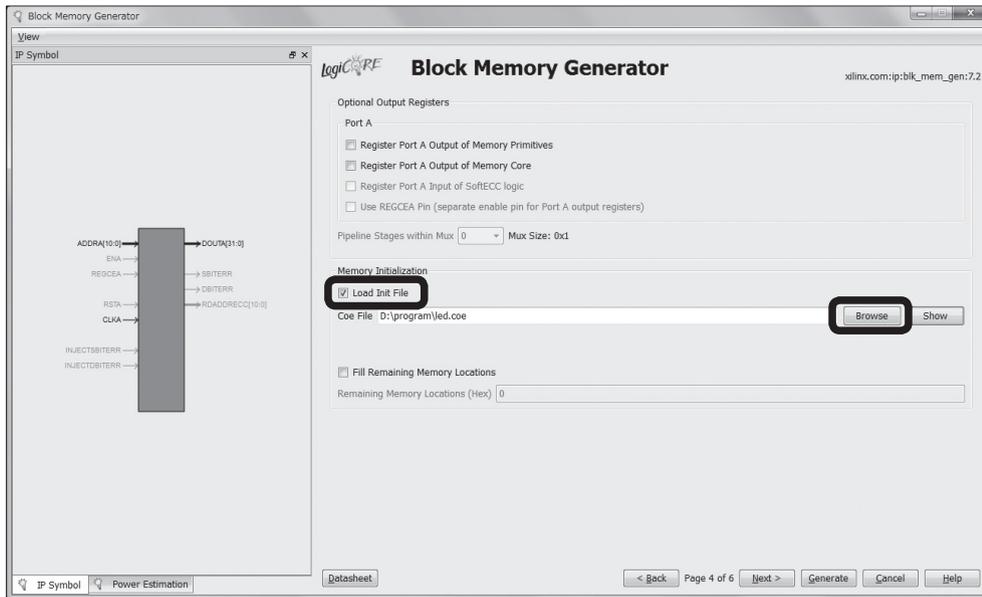
[Next]ボタンをクリックして次に進むと、**図 3-22**に示す画面になります。この画面では、「Memory Size」の「Read Width」と「Read Depth」を入力します。「Read Width」は「32」、
「Read Depth」は「2048」に設定します。他の項目は、変更する必要ありません。



▲ **図 3-22** Block Memory Generator (2 / 4)

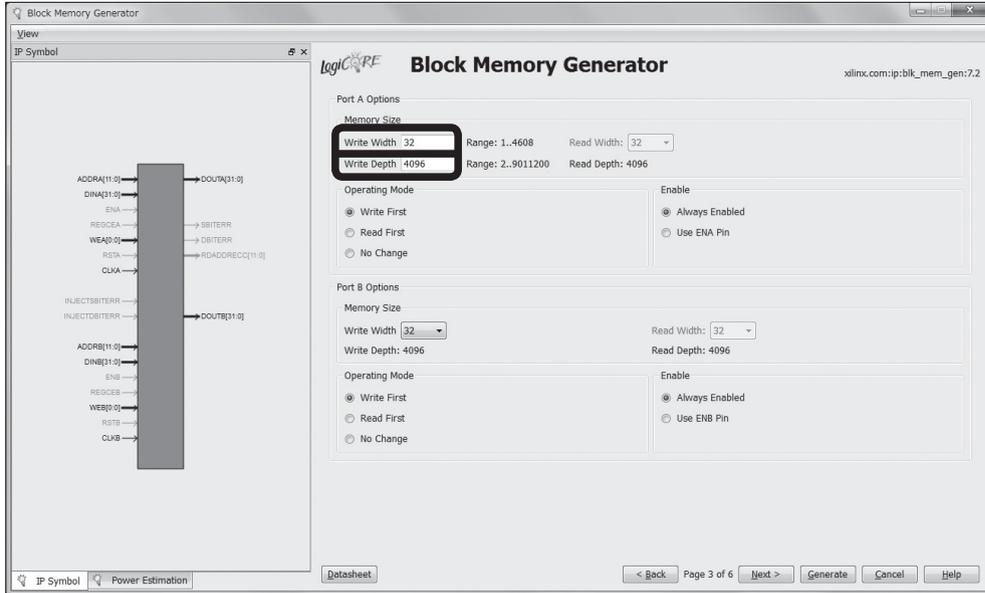
[Next]ボタンをクリックすると、**図 3-23**に示す画面になります。この画面で、「Memory Initialization」の「Load Init File」にチェックを入れ、「Browse」ボタンを押して、初期化ファイルを指定します。初期化ファイルには、ブロック RAM の初期値を指定する形式である COE ファイルを指定します。COE ファイルの作成方法は、3.2.5 項で説明します。ここで COE ファイルを指定することにより、ROM に初期値が設定されます。AZPR EvBoard に電源が入ったときや、リセットが行われたときには、AZ Processor は ROM からプログラムが読み出され、ここで指定した COE ファイルに記述されたプログラムが実行されます。

「Memory Initialization」の設定が完了したら、最後に「Generate」ボタンをクリックして設定を完了します。



▲ 図 3-23 Block Memory Generator (3 / 4)

最後に「x_s3e_dpram」を作成します。途中までは「x_s3e_sprom」と同様の手順で進めます。「chip_top」を右クリックして「New Source」を選択します。「New Source Wizard」ダイアログの「Select Source Type」の画面では、「IP (CORE Generator & Architecture Wizard)」を選択し、「File name」にはモジュール名である「x_s3e_dpram」を入力します。「Select IP」の画面では、「Memories & Storage Elements」→「RAMs&ROMs」→「Block Memory Generator」を選択します。「Block Memory Generator」ダイアログの「Memory Type」では「True Dual Port RAM」を選択します。図 3-24 で示す画面では、「Memory Size」の「Write Width」と「Write Depth」を指定します。「Write Width」は「32」、「Write Depth」は「4096」に設定します。



▲ 図 3-24 Block Memory Generator (4/4)

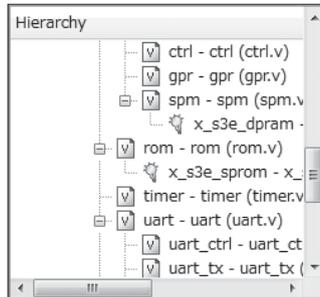
「x_s3e_sprom」と「x_s3e_dpram」を作成する際に、「Block Memory Generator」ダイアログで設定変更を行う項目を表 3-3 にまとめました。

▼ 表 3-3 Block Memory Generator で設定変更する項目

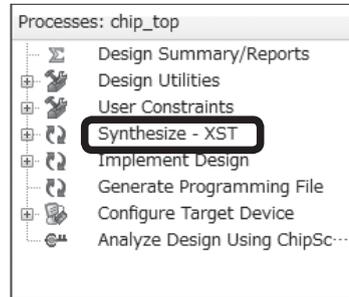
	x_s3e_sprom の変更内容	x_s3e_dpram の変更内容
Memory Type	Single Port ROM	True Dual Port RAM
Read Width	32	
Read Depth	2048	
Write Width		32
Write Depth		4096
Load Init File	チェックボックスにチェックを入れ、COE ファイルを指定する。	

これで宣言のみとなっていたモジュールの作成は完了です。プロジェクトを確認すると、図 3-15 のように「？」マークとなっていたアイコンが図 3-25 のようになっています。

次に、論理合成を実行します。「chip_top」を選択し、「ISE Project Navigator」ウィンドウの左下にある「Synthesize-XST」をダブルクリックします。「Synthesize-XST」を選択する画面を図 3-26 に示します。



▲ 図 3-25 モジュールの作成後



▲ 図 3-26 Synthesize-XST の選択

論理合成が完了したら、次は、配置配線を行います。ここでもう1つファイルを作成します。配置配線には、様々な制約を記述したファイルが必要です。制約というのは、モジュールの入出力の信号線と FPGA のピンの対応や、タイミング、面積などがあります。これらの制約を記述したファイルが、制約ファイルになります。

制約ファイルは、「AZPR_EvBoard.ucf」というファイルを作成し、テキスト形式で記述します。制約に関するより詳しい話は、ザイリックス社のウェブサイトよりダウンロードできる以下の「制約ガイド」を参照してください。

制約ガイド

http://japan.xilinx.com/support/documentation/dt_ise.htm

制約ファイルには最低限2種類の情報を記述します。1つは入力クロックのタイミング制約、もう1つはFPGAのピンに対する制約です。入力クロックのタイミング制約は、以下のように記述します。

```
NET "clk_ref" TNM_NET = "CLK" ;
TIMESPEC "TS_CLK" = PERIOD "CLK" 100 ns HIGH 50%;
```

1行目は、「clk_ref」という信号線をクロック信号として認識させ、「CLK」という名前を付けるための記述です。2行目で「CLK」に対してタイミング情報を記述しています。10[MHz]の周波数を周期に変換した100[ns]と、Hである期間が50%であるという記述です。

また、FPGAのピンに対する制約は以下のように記述します。

```
NET clk_ref LOC = P83;
```

これは、RTLのトップモジュールの「clk_ref」という信号線をFPGAの「P83」というピンに対応させるという意味です。制約は基板上の配線に合わせて決める必要があります。AZ Processorの信号線とAZPR EvBoardのピンの対応を表3-4に示します。

▼表 3-4 AZ Processorの信号線とXC3S250Eのピンの対応

信号線	ピン	信号線	ピン	信号線	ピン
clk_ref	83	gpio_out<4>	16	gpio_io<2>	62
reset_sw	85	gpio_out<5>	90	gpio_io<3>	63
uart_rx	70	gpio_out<6>	86	gpio_io<4>	65
uart_tx	71	gpio_out<7>	11	gpio_io<5>	66
gpio_out<16>	54	gpio_out<8>	3	gpio_io<6>	67
gpio_out<17>	53	gpio_out<9>	2	gpio_io<7>	68
gpio_in<0>	22	gpio_out<10>	5	gpio_io<8>	33
gpio_in<1>	23	gpio_out<11>	9	gpio_io<9>	34
gpio_in<2>	24	gpio_out<12>	10	gpio_io<10>	35
gpio_in<3>	26	gpio_out<13>	95	gpio_io<11>	36
gpio_out<0>	91	gpio_out<14>	94	gpio_io<12>	40
gpio_out<1>	92	gpio_out<15>	4	gpio_io<13>	41
gpio_out<2>	12	gpio_io<0>	60	gpio_io<14>	57
gpio_out<3>	15	gpio_io<1>	61	gpio_io<15>	58

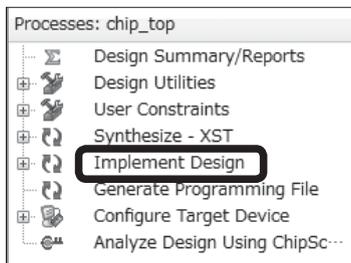
gpio_io 信号には「PULLDOWN」という記述を追加します。

```
NET "gpio_io<0>" LOC = "P60" | PULLDOWN;
```

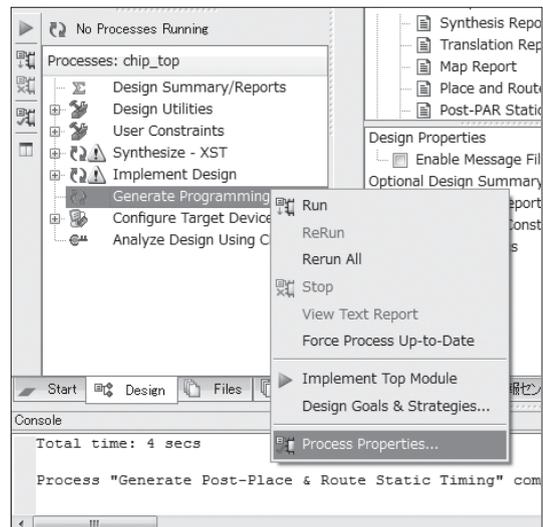
「PULLDOWN」という記述により、FPGA の「P60」を FPGA の内部抵抗で GND と接続することができます。AZPR EvBoard では、gpio_io は BOX ヘッドに接続されており、BOX ヘッドに外部デバイスを接続していない場合、FPGA のピンはどこにも接続されていない状態になります。この状態では FPGA に対して H が入力されているか L が入力されているかわからなくなってしまうため、抵抗を介して GND に接続する必要があります。

作成した「AZPR_EvBoard.ucf」をプロジェクトに追加して配置配線を行う準備が完了です。「ISE Project Navigator」ウィンドウの左下にある「Implement Design」をダブルクリックすると、配置配線が実行されます。「Implement Design」を選択する画面を図 3-27 に示します。

次に BIT ファイルを作成します。まず、図 3-28 で示す画面で「Generate Programming File」を右クリックして「Process Properties」を選択します。

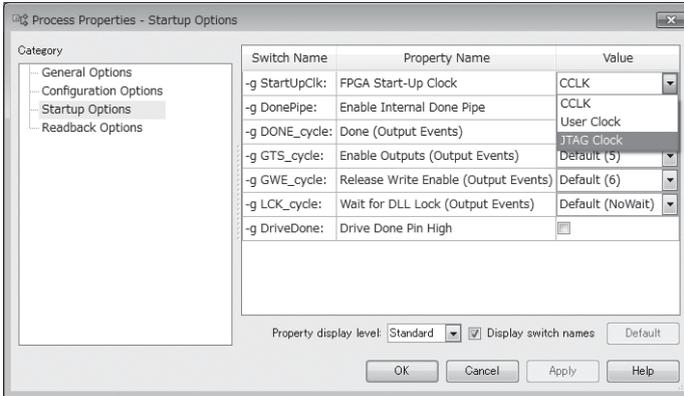


▲ 図 3-27 Implement Design の選択



▲ 図 3-28 Process Properties の選択

「Process Properties」ダイアログが開いたら、左側「Category」より「Startup Options」を選択します。ここでは、「FPGA Start-Up Clock」を設定します。FPGA を直接コンフィギュレーションする場合には Value を「JTAG Clock」、コンフィギュレーション情報をコンフィギュレーション ROM に書き込む場合には Value を「CCLK」に設定します。「Process Properties」ダイアログを図 3-29 に示します。



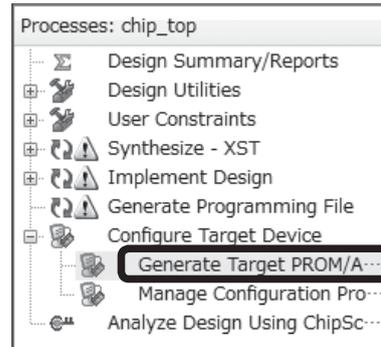
▲ 図 3-29 Process Properties

「Generate Programming File」をダブルクリックすると、プロジェクトのフォルダに BIT ファイルが生成されます。トップモジュールの名前が「chip_top」なので、「chip_top.bit」というファイル名となります。

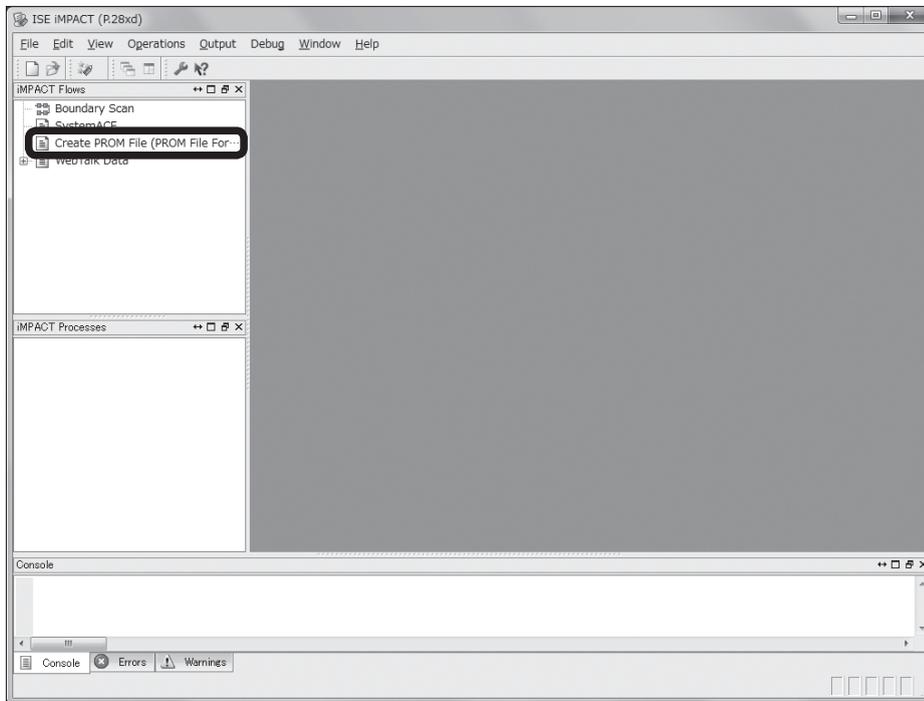
■ MCS ファイル作成

ここでは BIT ファイルから MCS ファイルを作成する方法を説明します。まず、「ISE Project Navigator」ウィンドウの左下にある「Generate Target PROM/ACE File」をダブルクリックします。「Generate Target PROM/ACE File」が表示されている画面を図 3-30 で示します。

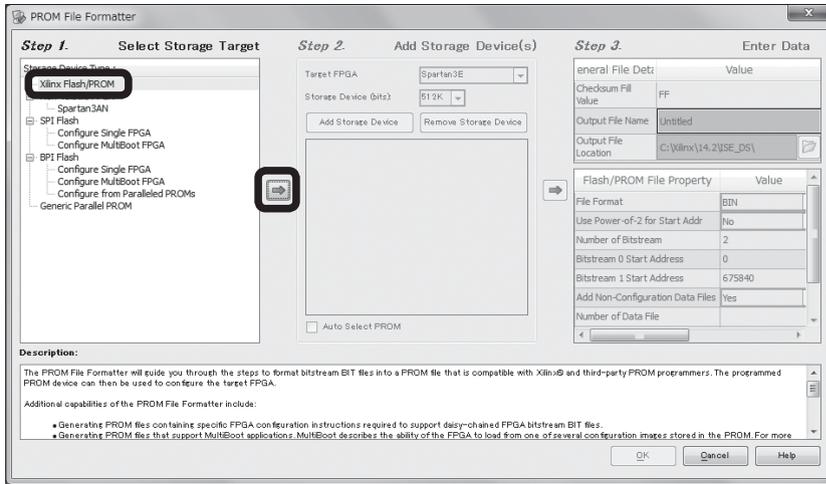
「Generate Target PROM/ACE File」をダブルクリックすると、「ISE iMPACT」ウィンドウが起動します。「ISE iMPACT」ウィンドウでは、図 3-31 で示すように左上の領域の「iMPACT Flows」から「Create PROM File(PROM File Formatter)」をダブルクリックして、PROM File Formatter ダイアログを起動します。PROM File Formatter ダイアログを図 3-32 に示します。



▲ 図 3-30 Generate Target PROM/ACE File の選択

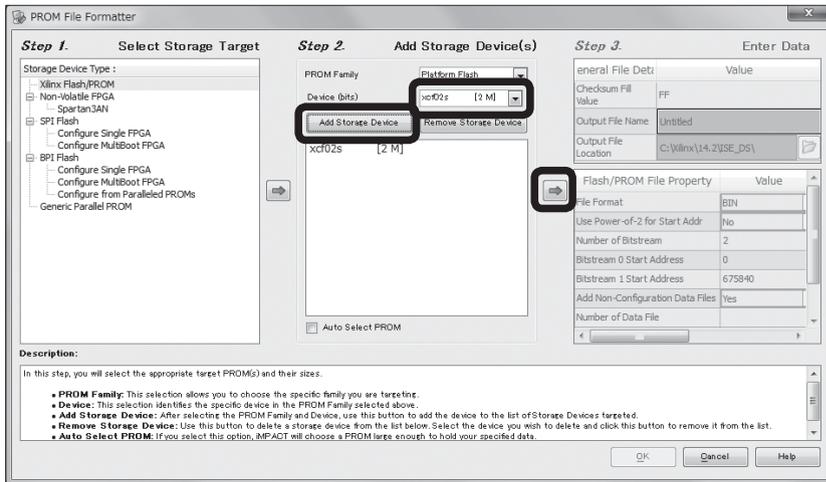


▲ 図 3-31 Create PROM File (PROM File Formatter) の選択



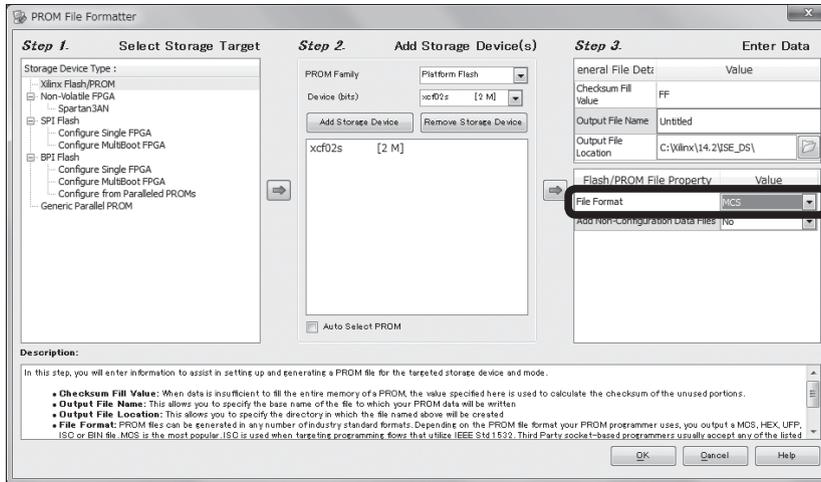
▲ 図 3-32 PROM File Formatter (1 / 3)

PROM File Formatter ダイアログでは、最初に Step 1. の入力を行います。Step 1. では、「Xilinx Flash/PROM」を選択して矢印ボタンを押します。矢印ボタンを押すと、Step 2. の入力に移ります。図 3-33 に Step 2. の入力画面を示します。



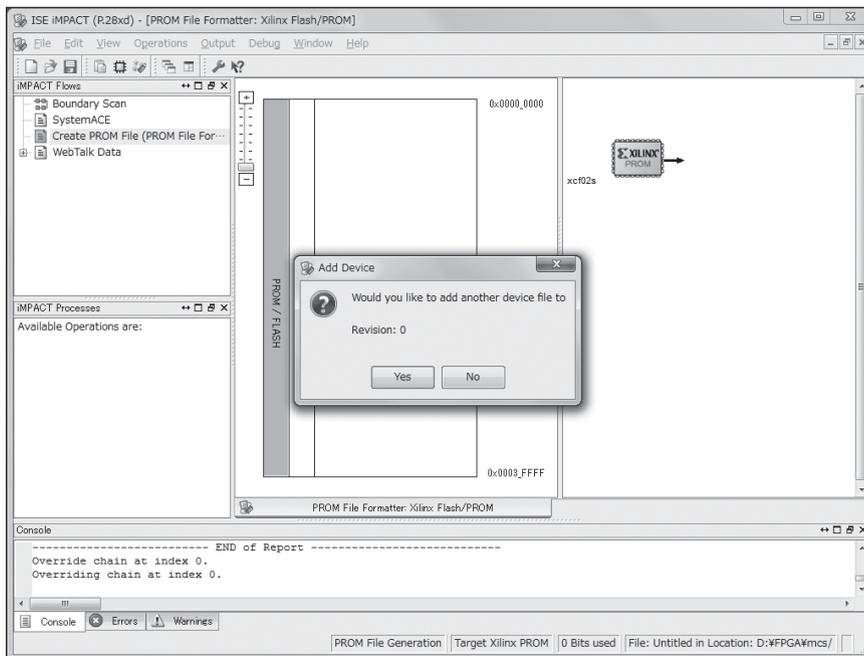
▲ 図 3-33 PROM File Formatter (2 / 3)

Step 2. では、「Device」にコンフィギュレーション ROM の型番である「xcf02s」を選択し、「Add Storage Device」ボタンを押した後、矢印ボタンを押します。矢印ボタンを押すと、Step 3. の入力に移ります。図 3-34 に Step 3. の入力画面を示します。



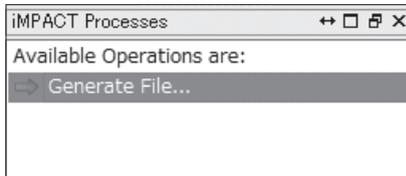
▲ 図 3-34 PROM File Formatter (3 / 3)

[File Format]に「MCS」を選択します。[OK]をクリックすると、図 3-35 のように「Add Device」ダイアログが表示されるので、[Yes] ボタンをクリックし、「chip_top.bit」を選択します。

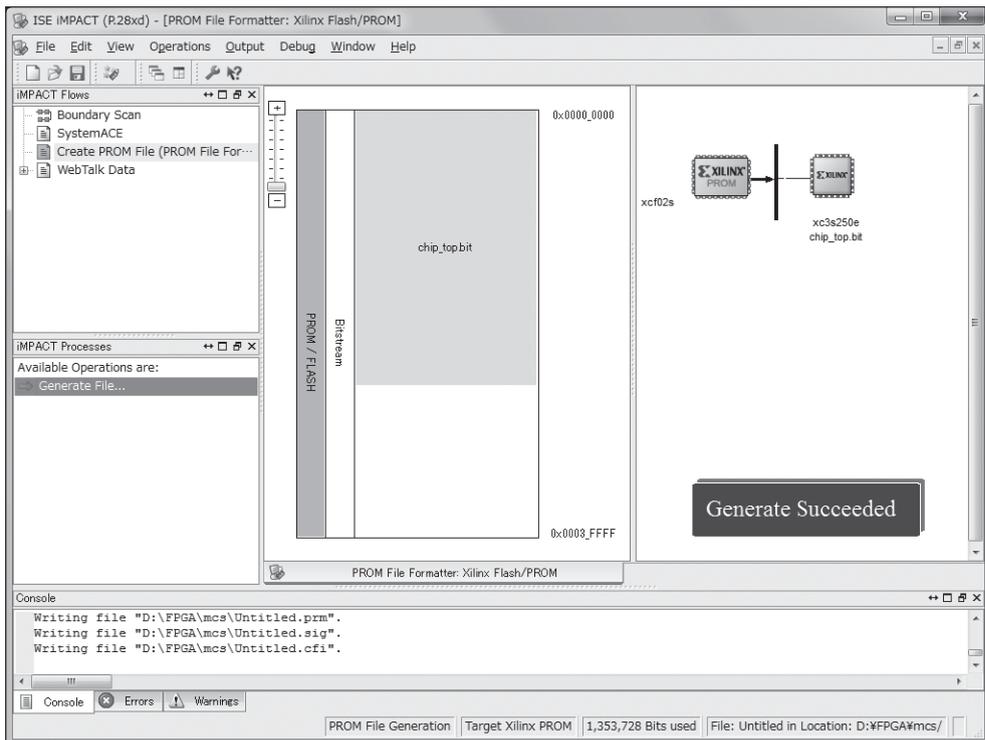


▲ 図 3-35 Add Device ダイアログの表示

AZPR EvBoard に搭載されている FPGA は 1 つなので、コンフィギュレーション用の BIT ファイルも 1 つだけ選択します。「chip_top.bit」選択後の「Add Device」ダイアログでは [No] ボタンをクリックします。「ISE iMPACT」ウィンドウの左下の領域の **図 3-36** に示す「Generate File」をダブルクリックすると MCS ファイルが作成されます。MCS ファイル作成完了の画面を **図 3-37** に示します。



▲ **図 3-36** Generate File の選択

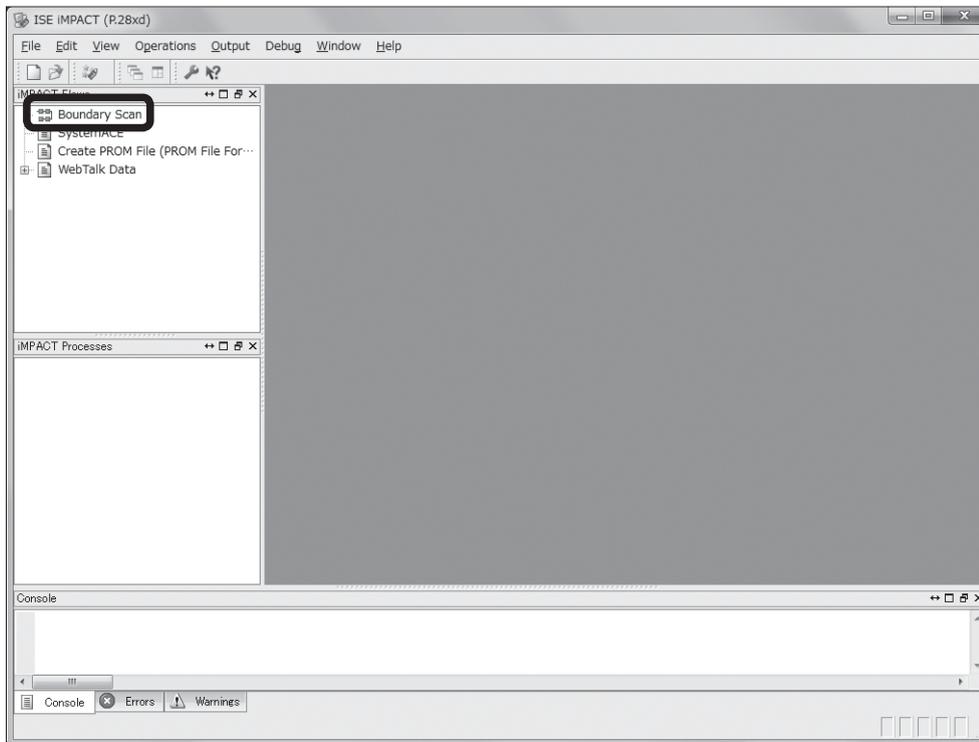


▲ **図 3-37** MCS ファイル作成完了の画面

■SVF ファイル作成

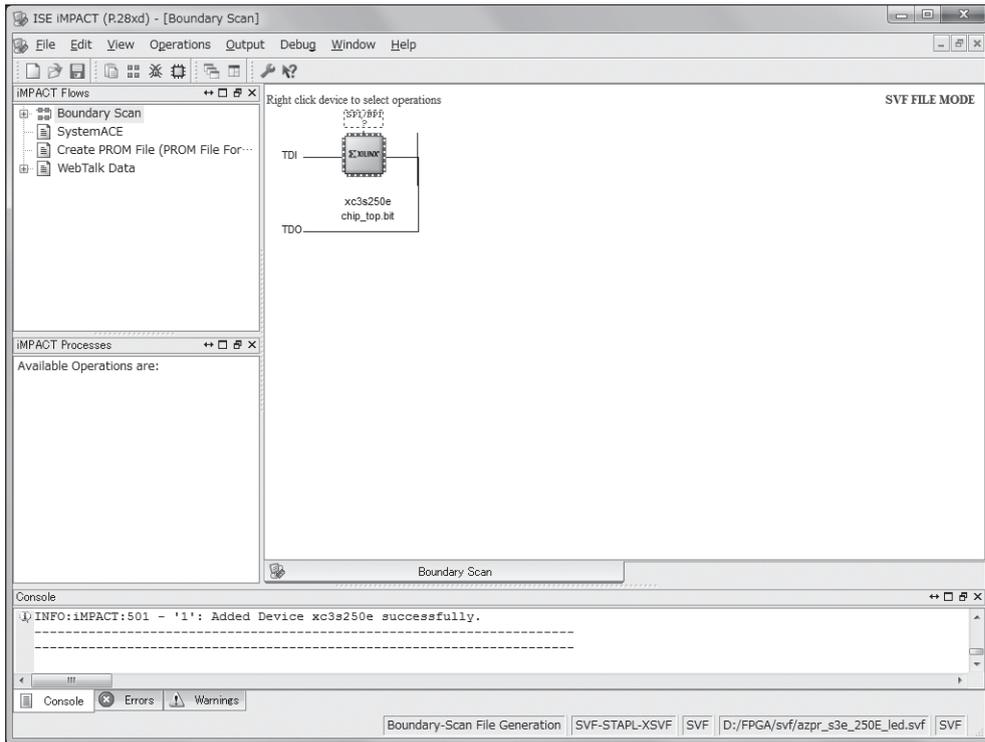
SVF は Serial Vector Format の略で、JTAG 操作を記述したファイルです。コンフィギュレーションデータを SVF 形式でファイルに出力し、3.2.4 項で説明する UrJTAG というツールで使します。UrJTAG で SVF ファイルを再生し、デバイスに対して JTAG 操作を行います。ここでは、SVF ファイル作成の手順を説明します。

まず、Windows 7 のスタートメニューから iMPACT を起動します。図 3-38 に「ISE iMPACT」ウィンドウを示します。「ISE iMPACT」ウィンドウの左上の領域の「iMPACT Flows」から「Boundary Scan」をダブルクリックします。



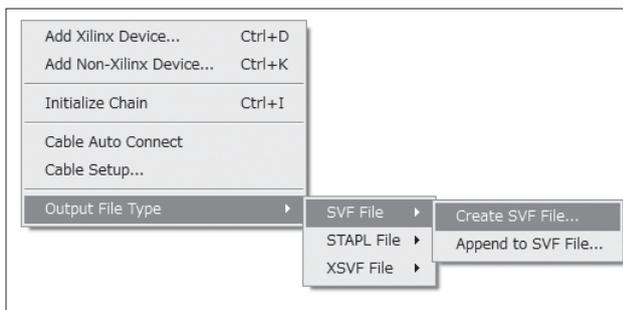
▲ 図 3-38 Boundary Scan の選択

Boundary Scan 実行後の画面を図 3-39 に示します。



▲ 図 3-39 Boundary Scan 後の画面

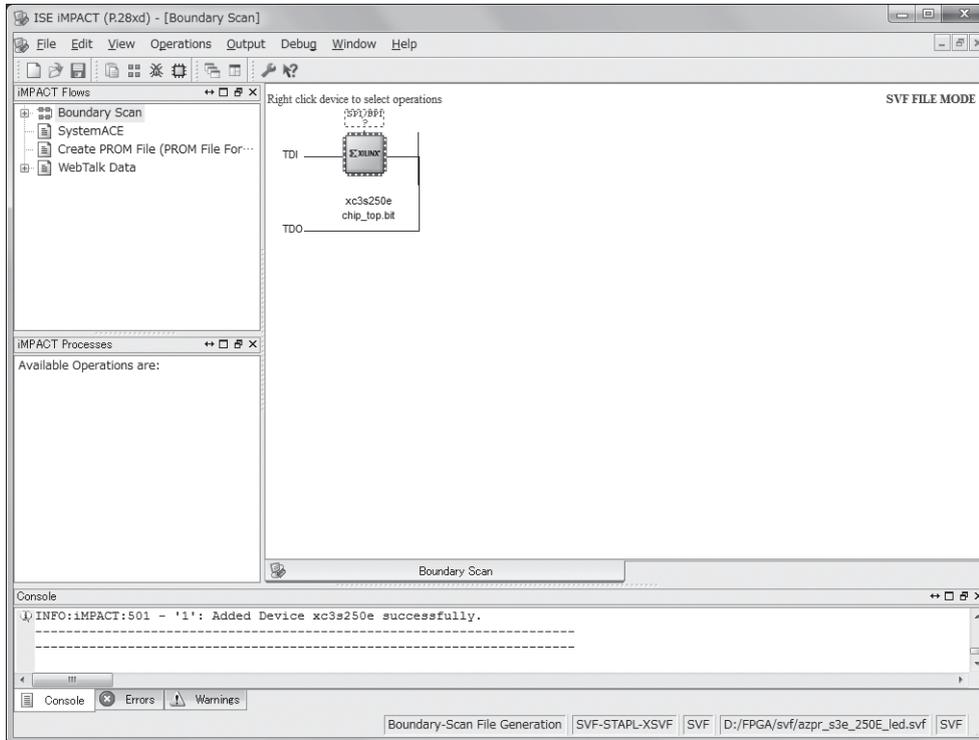
図 3-39 の「Right click device to select operations」と表示された領域を右クリックし、図 3-40 に示す [Output File Type] → [SVF File] → [Create SVF File] を選択し、SVF ファイル作成を開始します。



▲ 図 3-40 Create SVF File の選択

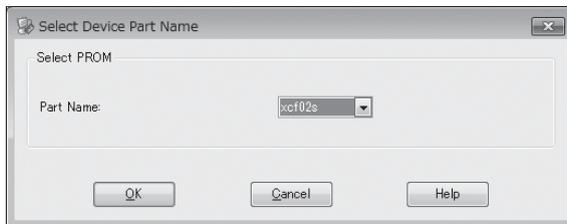
「Add Device」ダイアログで書き込むファイルを選択します。ここでBIT ファイルを選択する場合と MCS ファイルを選択する場合で手順が別れます。

BIT ファイルを選択すると、図 3-41 のように「xc3s250e」が追加されます。

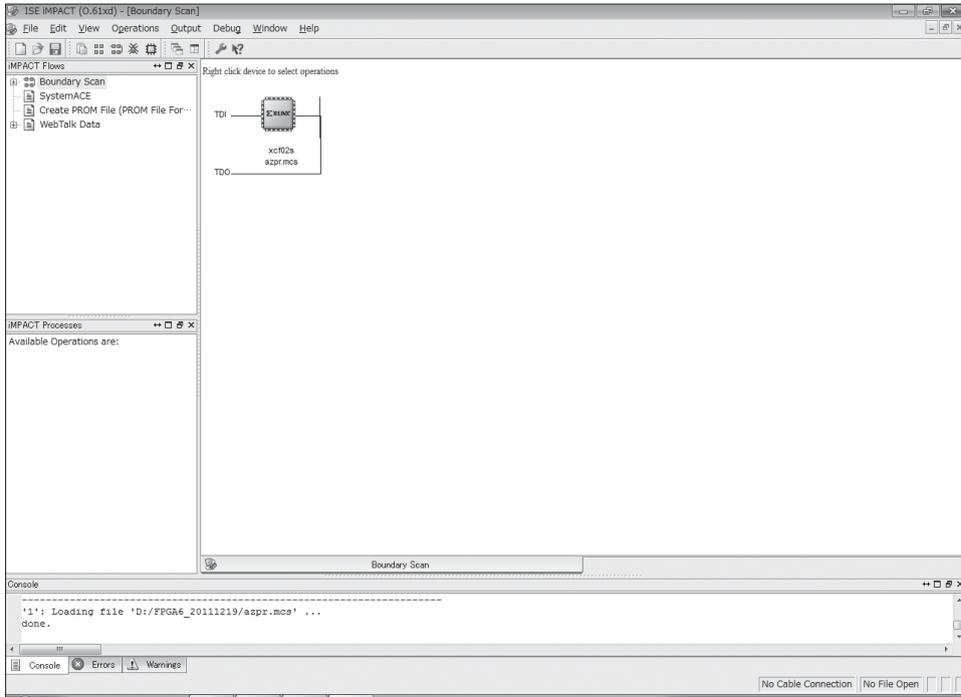


▲ 図 3-41 BIT ファイル追加後の画面

MCS ファイルを選択すると、図 3-42 のように「Select Device Part Name」ダイアログが表示されます。ここで、PROM デバイスとして、「xcf02s」を選択します。[OK] ボタンをクリックすると、図 3-43 のように「xcf02s」が追加されます。

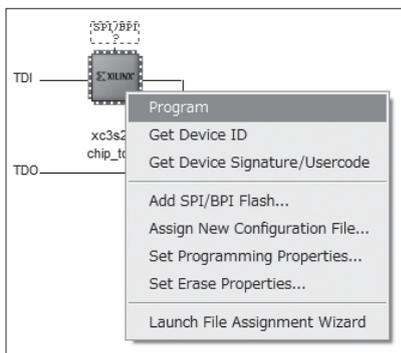


▲ 図 3-42 Select Device Part Name



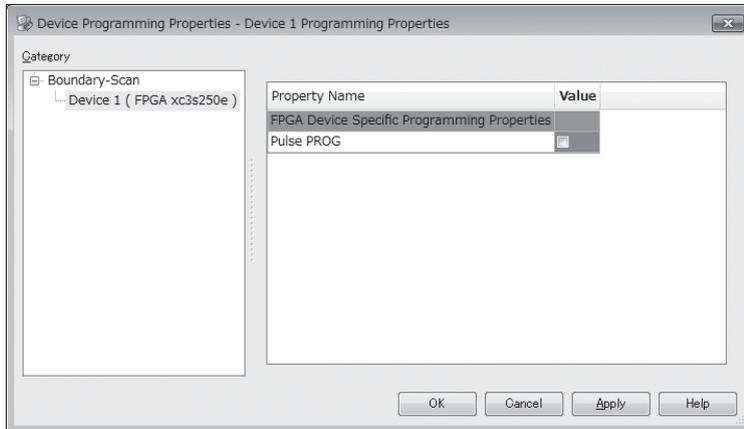
▲ 図 3-43 MCS ファイル追加後の画面

書き込むファイルを選択した後、追加されたデバイス上で右クリックを行った画面を図 3-44 に示します。ここで、「Program」を選択します。



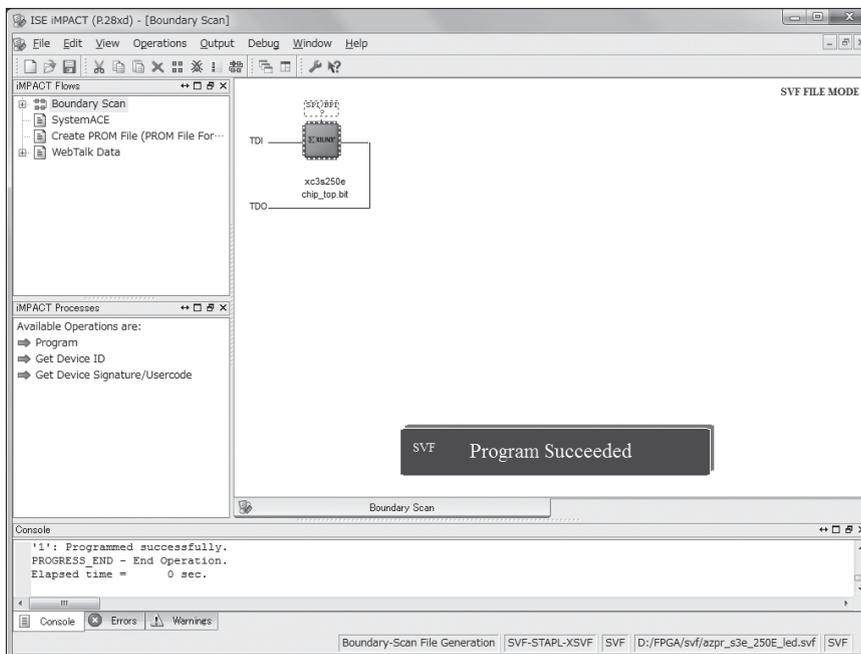
▲ 図 3-44 Program の選択

図 3-45 で示す「Device Programming Properties」ダイアログが開くので、そのまま[OK] ボタンを押します。



▲ 図 3-45 Device Programming Properties

最後に、図 3-46 のように「Program Succeeded」と表示されたのを確認後、メニューバーから [Output] → [SVF File] → [Stop Writing to File] を選択し、SVF ファイルの作成を終了します。



▲ 図 3-46 SVF ファイル作成完了

以上の手順で SVF ファイルが生成されます。

3.2.4 UrJTAG

ここでは、UrJTAG のインストールと使用方法について説明します。

■インストール

UrJTAG、FT2232 ドライバ、libusb-win32 のインストールを行います。

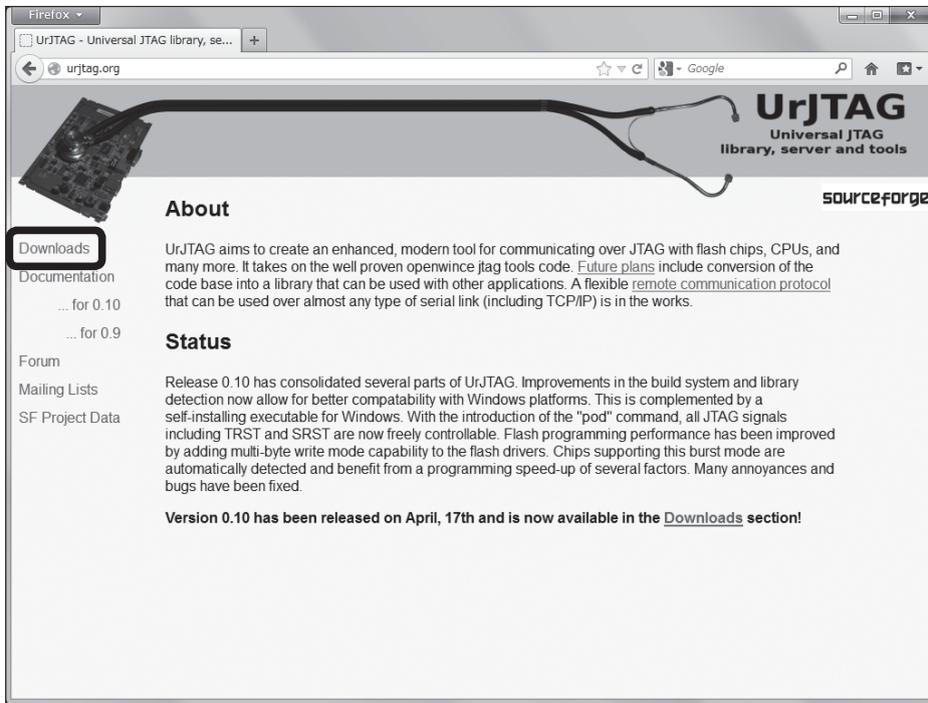
■UrJTAG

UrJTAG は SVF ファイルに記述された JTAG 操作を実行し、コンフィギュレーションするために使います。UrJTAG は以下のウェブサイトからダウンロードできます。

UrJTAG

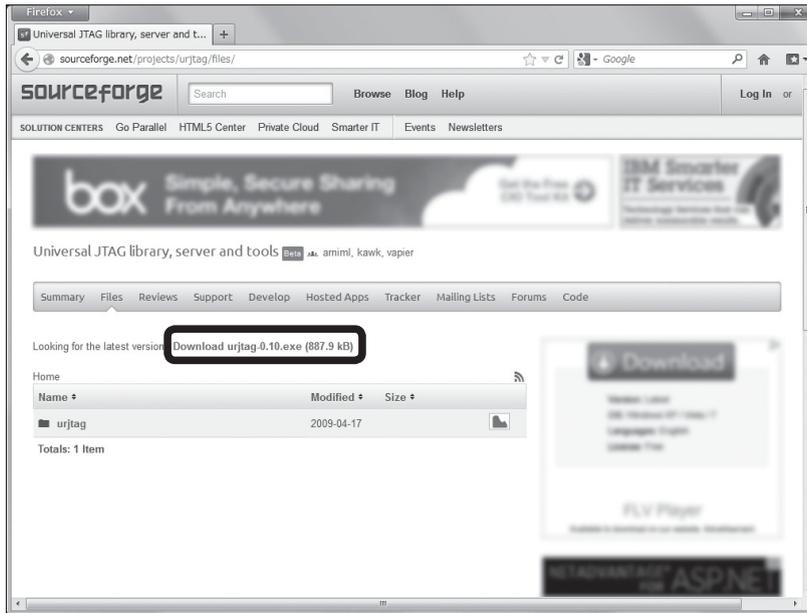
<http://urjtag.org/>

ウェブブラウザで上記 URL にアクセスし、**図 3-47** で示す「Download」をクリックしてください。



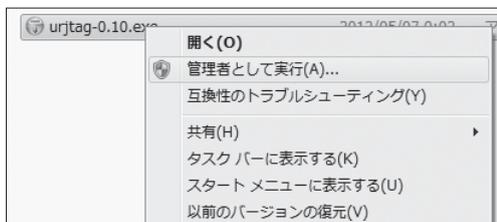
▲ **図 3-47** UrJTAG のウェブサイト

図 3-48 で示すページに移動するので、最新版のインストーラをダウンロードします。



▲ 図 3-48 UrJTAG インストーラのダウンロードページ

図 3-49 で示すように、ダウンロードしたファイルを右クリックして、「管理者として実行」を選択します。インストーラに従って進めていけばインストールすることができます。



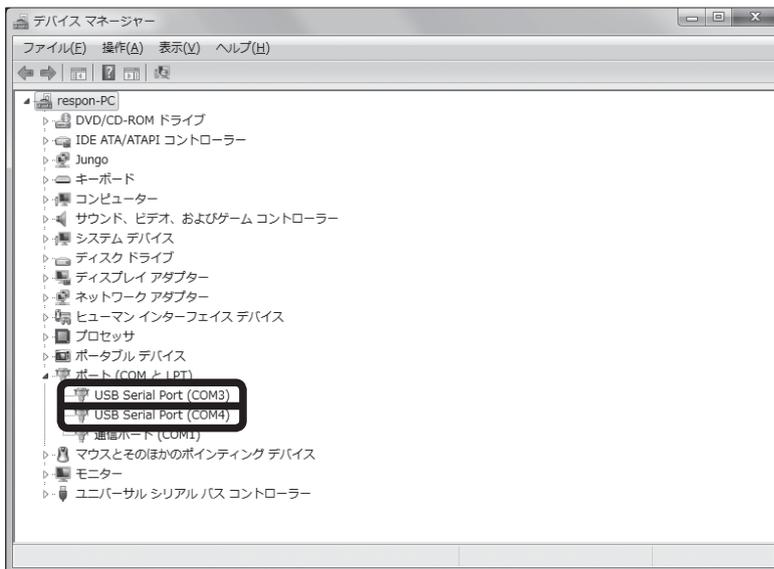
▲ 図 3-49 管理者として実行の表示

■ FT2232 ドライバ

FPGA のコンフィギュレーションは、AZPR EvBoard に搭載されている FT2232 というデバイスを通して行うため、ドライバのインストールが必要になります。Windows 7 では、FT2232 を接続すると、ドライバは自動でインストールされます。USB ケーブルでパソコンと AZPR EvBoard を接続し、電源を ON にするとドライバのインストールが始

まります。ドライバのインストールが完了すると、FT2232 が認識されます。

Windows 7 が FT2232 を認識できているかどうかの確認は、デバイスマネージャーから行います。スタートメニューからコンピューターを右クリックして「プロパティ」を選びます。デバイスマネージャーを選択し、デバイスマネージャーウィンドウを表示させます。「ポート (COM と LPT)」を展開して、通信ポートを確認します。FT2232 は 2 チャンネルの USB シリアル変換 IC なので、正しく認識されていれば USB Serial Port が 2 つ表示されます。図 3-50 では、「USB Serial Port (COM3)」と「USB Serial Port (COM4)」と表示されています。



▲ 図 3-50 デバイスマネージャー

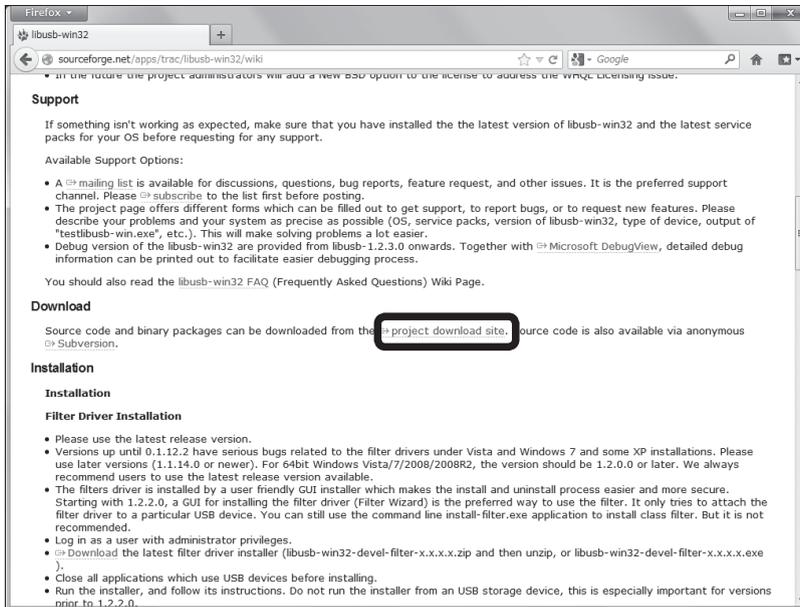
■ libusb-win32

libusb-win32 は、USB デバイスを扱うためのドライバです。以下のウェブページからダウンロードできます。

libusb-win32

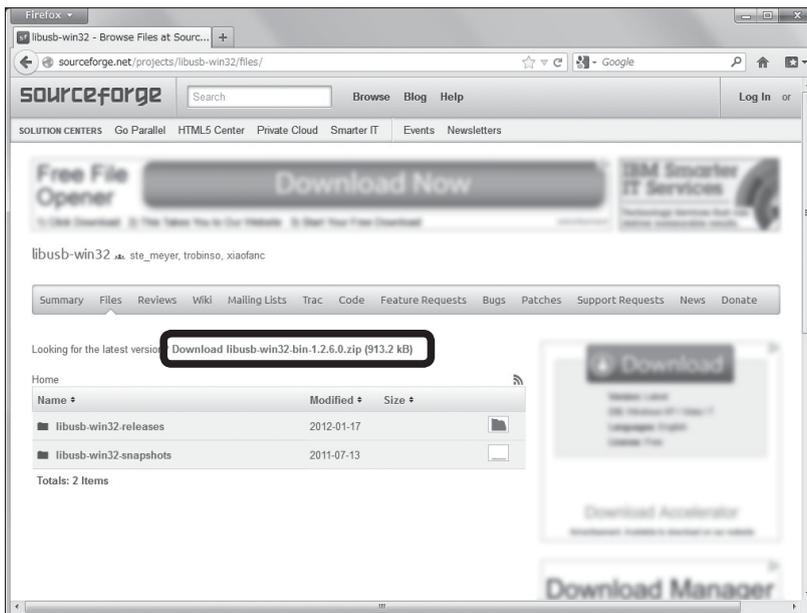
<http://sourceforge.net/apps/trac/libusb-win32/wiki/>

ウェブブラウザで上記 URL にアクセスし、図 3-51 で示す「Download」の項目から「project download site」をクリックしてください。



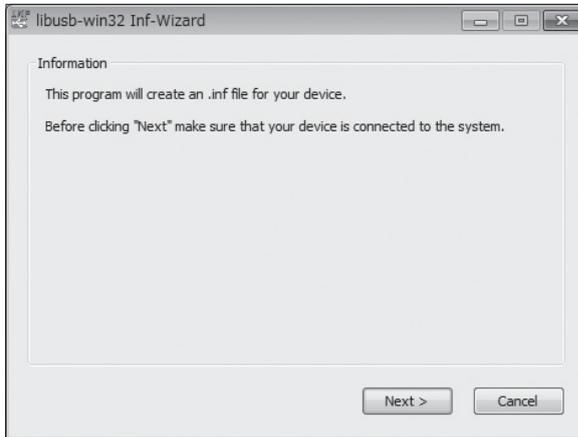
▲ 図 3-51 libusb-win32 のウェブサイト

図 3-52 で示すページに移動するので、最新版のファイルをダウンロードします。



▲ 図 3-52 libusb-win32 のダウンロードページ

パソコンと AZPR EvBoard を接続したまま、ダウンロードしたファイルを解凍し、「bin」フォルダ内の「inf-wizard.exe」を実行します。図 3-53 で示す「libusb-win32 Inf-Wizard」ダイアログが表示されます。



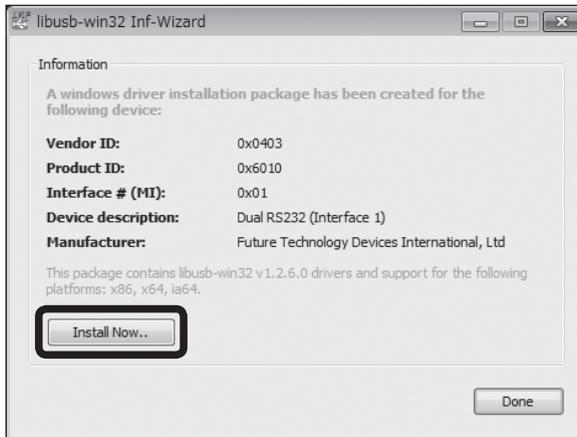
▲ 図 3-53 libusb-win32 Inf-Wizard (1 / 3)

[Next] ボタンをクリックすると、図 3-54 で示す画面が表示されます。



▲ 図 3-54 libusb-win32 Inf-Wizard (2 / 3)

ここで、どれか1つデバイスを選択し、[Next] ボタンを押します。図 3-54 では、「Description」が「Dual RS232 (Interface 1)」のデバイスを選択しています。ダイアログを進めると、図 3-55 で示す画面が表示されます。

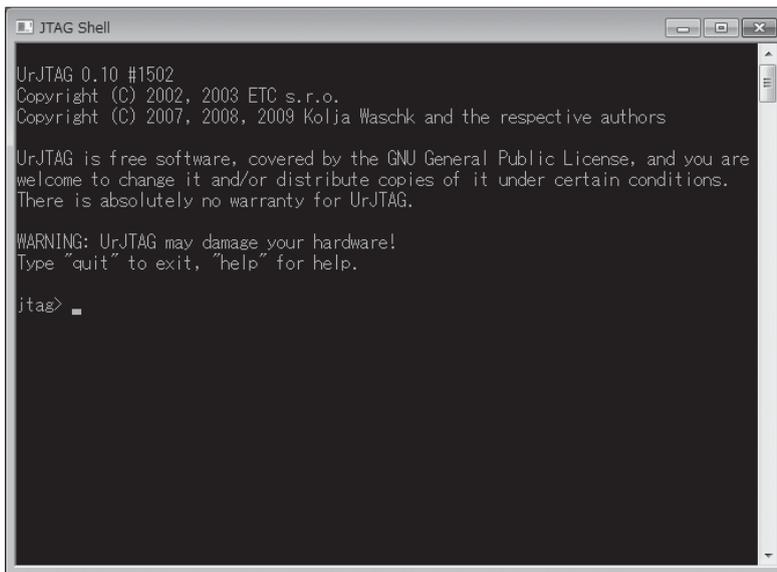


▲ 図 3-55 libusb-win32 Inf-Wizard (3 / 3)

ここで [Install Now] ボタンを押し、ドライバをインストールします。

■ UrJTAG の起動方法

Windows 7 のスタートメニューから JTAG Shell を実行すると、図 3-56 で示す画面が表示されます。「jtag>」というプロンプトに続けて、コマンドが入力可能になります。



▲ 図 3-56 JTAG Shell

■UrJTAG の設定

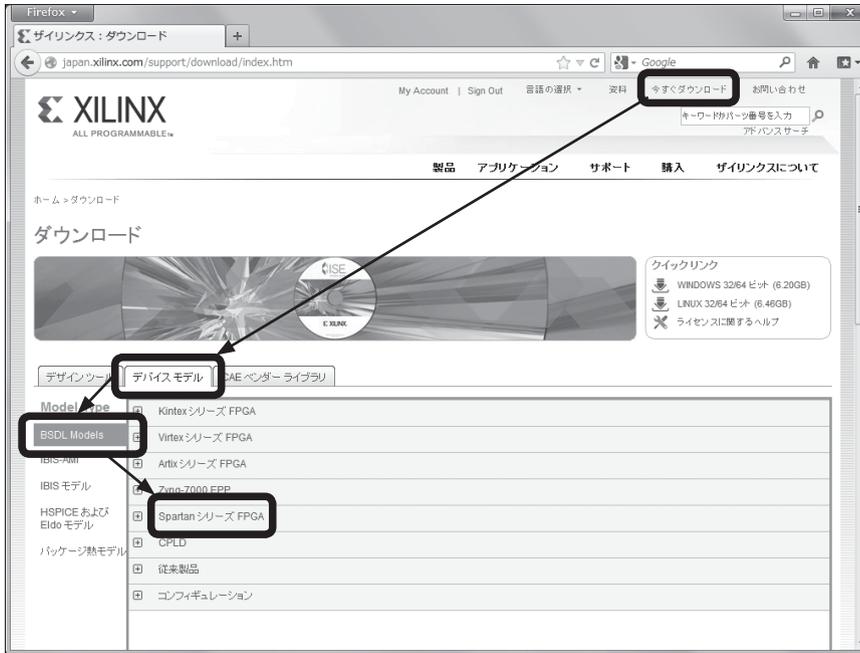
AZPR EvBoard で使用している xc3s250e と xcf02s を UrJTAG で使うために、設定ファイルとパーツリストを追加する必要があります。変更が必要なファイルは本書のサポートページで公開していますが、ここではどのような変更を行うかを説明します。UrJTAG が「C:\Program Files (x86)\UrJTAG\」にインストールされている前提で説明します。別のフォルダにインストールした人は、適宜読み替えてください。

まず、「C:\Program Files (x86)\UrJTAG\data\xilinx\」に「xc3s250e」というフォルダを作成します。この中に「STEPPINGS」と「xc3s250e」という2つのテキストファイルを作ります。なお、このテキストファイルに「.txt」などの拡張子は付けません。「STEPPINGS」には以下の内容を入力します。

```
0000 xc3s250e 0
0001 xc3s250e 1
0010 xc3s250e 2
0011 xc3s250e 3
0100 xc3s250e 4
0101 xc3s250e 5
0110 xc3s250e 6
0111 xc3s250e 7
1000 xc3s250e 8
1001 xc3s250e 9
1010 xc3s250e 10
1011 xc3s250e 11
1100 xc3s250e 12
1101 xc3s250e 13
1110 xc3s250e 14
1111 xc3s250e 15
```

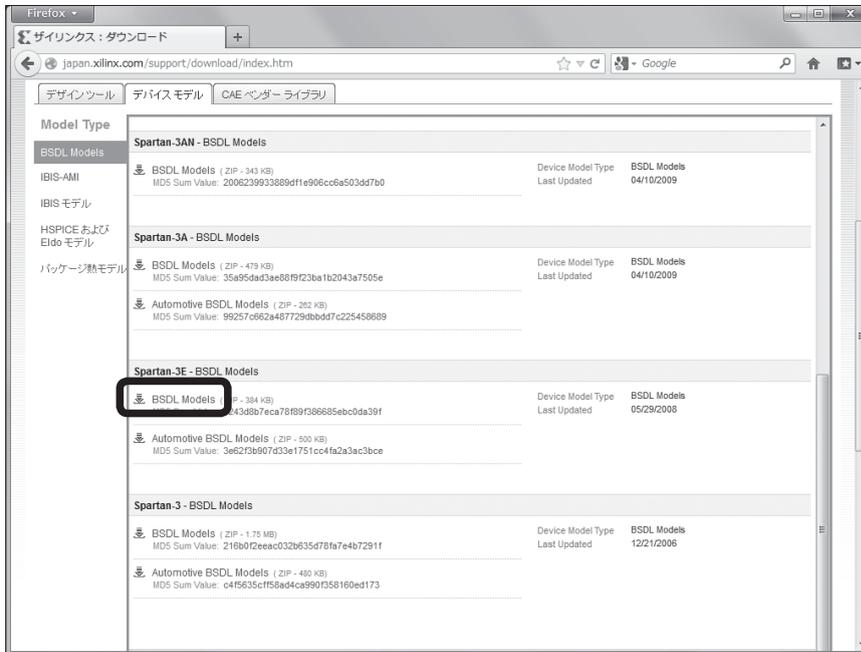
もう1つのファイルの内容を入力するために、BSDL ファイルを使います。BSDL ファイルはザイリンクス社のウェブサイトで公開されているため、次の手順でダウンロードします。

ウェブブラウザを起動し、ザイリンクス社のウェブサイトを表示します。「今すぐダウンロード」を選択し、「デバイスモデル」を選択します。次に、「BSDL Modules」から「Spartan シリーズ FPGA」を選択します。このときに表示されている画面を図 3-57 に示します。



▲ 図 3-57 BSDL ファイルのダウンロード (1 / 3)

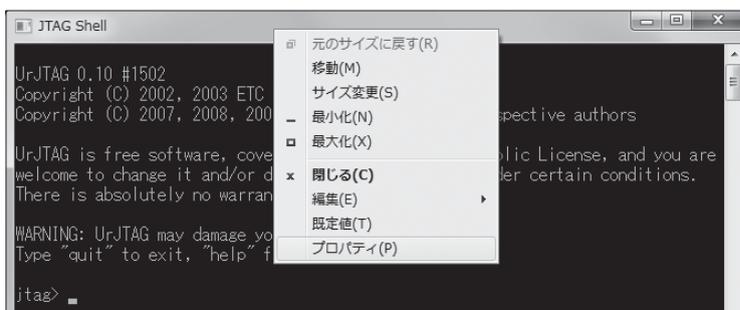
「Spartan シリーズ FPGA」を選択した後に表示される画面から、「Spartan-3E - BSDL Modules」の「BSDL Models」を選択します。このときに表示されている画面を図 3-58 に示します。



▲ 図 3-58 BSDL ファイルのダウンロード (2 / 3)

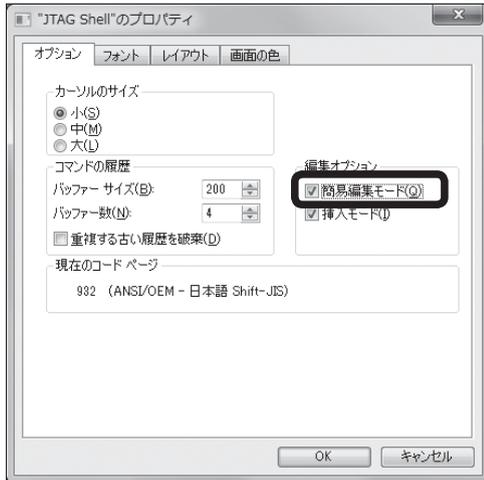
「BSD Models」の選択後、ダウンロードが開始します。ダウンロードには、ISE WebPACK をダウンロードしたときと同様にログインが必要になります。ここでダウンロードしたファイルを解凍し、解凍したファイル内にある xc3s250e.bsd を「C:\Program Files (x86)\UrJTAG\data」にコピーします。

次に、JTAG Shell のプロパティの設定をします。JTAG Shell を起動し、タイトルバーを右クリックします。右クリックメニューからプロパティを選択します。JTAG Shell のプロパティを選択している画面を図 3-59 に示します。

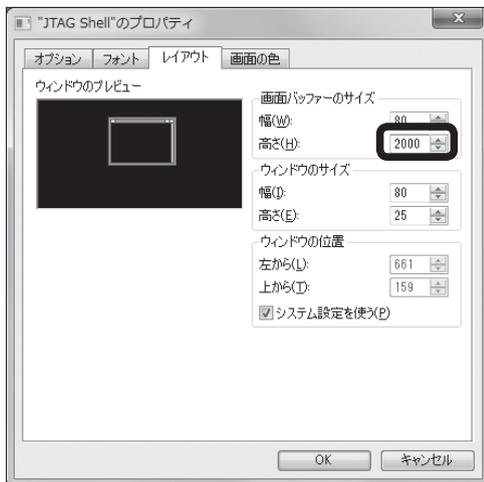


▲ 図 3-59 JTAG Shell のプロパティ選択

JTAG Shell のプロパティでは、図 3-60 で示す画面で簡易編集モードにチェックを入れ、
図 3-61 で示す画面で「画面バッファサイズ」の「高さ」を「2000」とします。



▲ 図 3-60 JTAG Shell のプロパティ (1 / 2)



▲ 図 3-61 JTAG Shell のプロパティ (2 / 2)

その後、JTAG Shell から、以下のコマンドを実行します。

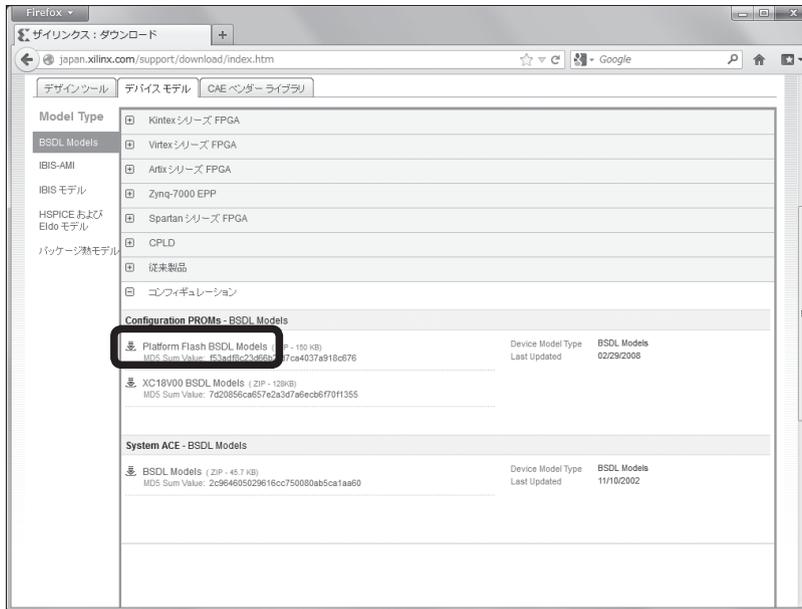
```
jtag> bsd1 dump xc3s250e.bsd
```

ここで表示された内容コピーして「xc3s250e」に貼り付けます。JTAG Shell ウィンドウでは、マウスの左ボタンを押しながら表示された内容を選択し、右ボタンを押すことでコピーできます。

xcf02s の設定ファイルの追加も xc3s250e と同じ要領で行います。「C:\Program Files (x86)\UrJTAG\data\xilinx\」に「xcf02s」というフォルダを作成します。この中に、「STEPPINGS」と「xcf02s」という2つのテキストファイルを作り、「STEPPINGS」には以下の内容を入力します。

```
0000 xcf02s 0
0001 xcf02s 1
0010 xcf02s 2
0011 xcf02s 3
0100 xcf02s 4
0101 xcf02s 5
0110 xcf02s 6
0111 xcf02s 7
1000 xcf02s 8
1001 xcf02s 9
1010 xcf02s 10
1011 xcf02s 11
1100 xcf02s 12
1101 xcf02s 13
1110 xcf02s 14
1111 xcf02s 15
```

「xcf02s」には、同様に JTAG Shell での出力結果を入力します。xcf02s の BSDL ファイルは、「BSDL Models」から「コンフィギュレーション」を選択し、「Platform Flash BSDL Models」からダウンロードすることができます。このときに表示される画面を図 3-62 に示します。



▲ 図 3-62 BSDL ファイルのダウンロード (3 / 3)

ダウンロードしたファイルを解凍し、解凍したファイル内にある xcf02s.bsd を「C:\Program Files (x86)\JTAG\data」にコピーします。その後、JTAG Shell から、以下のコマンドを実行し、表示された内容コピーして「xcf02s」に貼り付けます。

```
jtag> bsd dump xcf02s.bsd
```

最後に、「C:\Program Files (x86)\JTAG\data\xilinx\PARTS」に以下の記述を書き足すことで、パーツリストに xc3s250e の追加を行います。

```
0001110000011010      xc3s250e      xc3s250e
```

xcf02s はすでにパーツリストに記述されているので追加の必要はありません。

■FPGAのコンフィギュレーション方法

FPGAのコンフィギュレーション方法を説明します。パソコンとAZPR EvBoardをUSBケーブルで繋いで、JTAG Shellを起動します。以下のコマンドをJTAG Shellに入力して実行すると、FPGAを認識します。

```
jtag> cable jtagkey
jtag> detect
```

detectコマンドを実行したとき、以下のように表示されます。

```
IR length: 14
Chain length: 2
Device Id: 00010001110000011010000010010011 (0x0000000011C1A093)
  Manufacturer: Xilinx
  Part(0):      xc3s250e
  Stepping:    1
  Filename:    c:¥program files (x86)¥urjtag¥data/xilinx/xc3s250e/xc3s250e
Device Id: 11110101000001000101000010010011 (0x00000000F5045093)
  Manufacturer: Xilinx
  Part(1):      xcf02s
  Stepping:    15
  Filename:    c:¥program files (x86)¥urjtag¥data/xilinx/xcf02s/xcf02s
```

ここで表示されているように、xc3s250eがpart0、xcf02sがpart1になります。

BITファイルを選択してSVFファイルを作成したときは、以下のコマンドを実行して、xc3s250eを選択します。

```
jtag> part 0
```

MCSファイルを選択してSVFファイルを作成したときは、以下のコマンドを実行して、xcf02sを選択します。

```
jtag> part 1
```

SVFファイル作成で作成したSVFファイルが「D:¥sample.svf」にある場合は、以下のようにファイルパスを指定してコマンドを実行することでFPGAのコンフィギュレー

ションが開始します。

```
jtag> svf D:%sample.svf
```

以下のように progress オプションをつけると、コンフィギュレーションの進捗が表示されます。

```
jtag> svf D:%sample.svf progress
```

COLUMN

cbldvr-0.1_ft2232

AZPR EvBoard の FPGA のコンフィギュレーション方法として、fenrir 氏によって作成された「cbldvr-0.1_ft2232」というツールを使うこともできます。

`cbldvr-0.1_ft2232`

<http://fenrir.naruoka.org/archives/000644.html>

このツールは、ザイリンクス社のコンフィギュレーションツールである「iMPACT」と組み合わせて、AZPR EvBoard に搭載されている FT2232 経由でコンフィギュレーションを行うことができます。この方法は、BIT ファイルや MCS ファイルを使うため、SVF ファイルを作る必要はありません。使い方は上記 URL を参照してください。

ただし、fenrir 氏に確認をしましたが、cbldvr-0.1_ft2232 は ISE 11 までしか動作確認できていません。最新版の ISE では動作しない可能性があります。また Windows 7 は ISE 12 からの対応のため、ISE 11 以前のバージョンを使う場合は、Windows XP のパソコンを用意する必要があります。

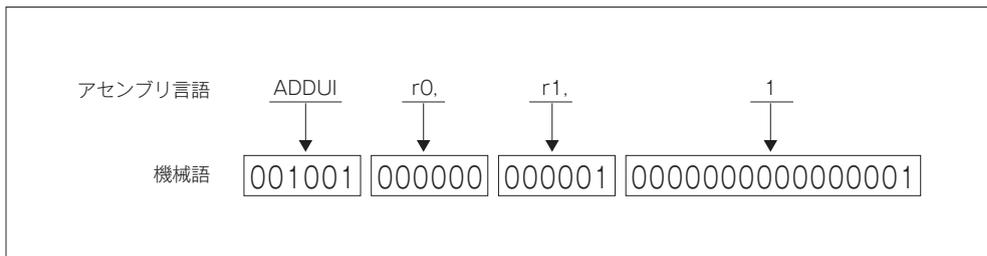
3

プログラミング

3.2.5 クロスアセンブラ

アセンブラはアセンブリ言語で書かれているプログラムを、機械語に変換するソフトウェアです。CPU が実行できる機械語は数字の列で表現されるため、人間にとっては非常にわかりにくくなっています。そのため、機械語の命令に1対1に対応し、人間が理解しやすいように記号化されたニーモニックと呼ばれる命令語を使います。

アセンブリ言語でプログラムを作成し、アセンブラを使って機械語に変換をするという手順で開発を進めます。アセンブリ言語と機械語の対応を図 3-63 に示します。

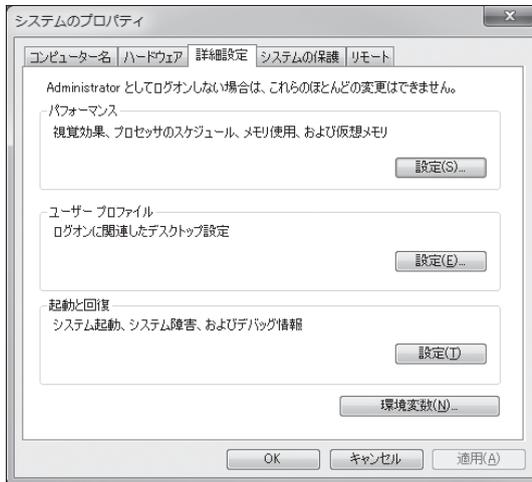


▲ 図 3-63 アセンブリ言語と機械語

■インストール

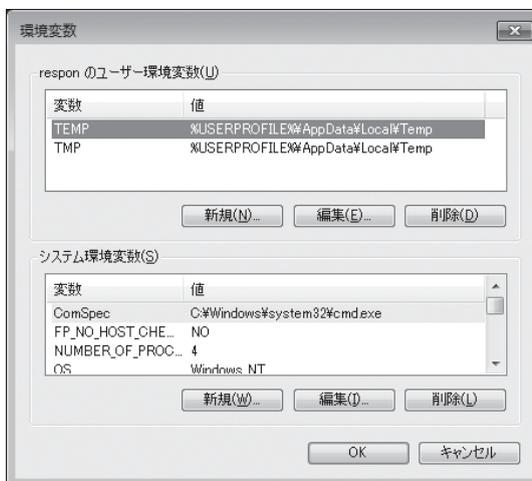
アセンブリ言語は機械語と1対1対応なので、CPU のアーキテクチャに依存します。AZ Processor は独自の命令セットのため、対応したアセンブラを用意しました。AZ Processor のアセンブラなので AZPR ASM という名前にしました。本書のサポートページからダウンロードしてください。

ダウンロードしたら、「C:\azpr\azprasm」というフォルダを作成して、アセンブラ本体である「azprasm.exe」というファイルをその作成したフォルダの中に置いてください。次に Windows 7 のスタートメニューを表示させて、「コンピューター」を右クリックし「プロパティ」を選択します。左側の「システムの詳細設定」を選択して、図 3-64 に示す「システムのプロパティ」ダイアログを表示します。



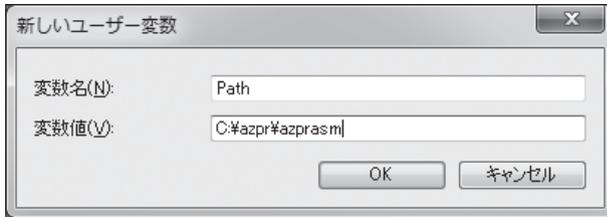
▲ 図 3-64 システムのプロパティ

「システムのプロパティ」ダイアログの「詳細設定」タブから、「環境変数」ボタンをクリックします。「環境変数」ダイアログを図 3-65 に示します。



▲ 図 3-65 環境変数

「環境変数」ダイアログが表示されたら、ユーザ環境変数の「新規」ボタンをクリックします。図 3-66 に示す「新しいユーザ変数」ダイアログが表示されるので、「変数名」に「Path」と入力し、「変数値」に「azprasm.exe」を置いたファイルパスを入力します。



▲ 図 3-66 新しいユーザ変数

本書のとおりに進めている場合は、以下の文字列を入力します。

```
C:%azpr%azprasm
```

「ユーザ環境変数」に「Path」という変数名がすでに存在する場合は、「編集」ボタンをクリックし、「;」で区切ってから「azprasm.exe」を置いたファイルパスを付け加えます。たとえば、「Path」の変数値が「C:%hoge」となっていた場合は、変数値を以下のように書き加えます。

```
C:%hoge;C:%azpr%azprasm
```

Path の設定が終わると、アセンブラのインストールは完了です。コマンドプロンプトを起動します。「azprasm」と入力して実行してください。以下のように Usage が表示されていれば、正しくインストールできています。

```
C:%Users%respon>azprasm
Usage: azprasm [ -o outfile ] infile
```

もし、以下のように表示される場合は設定が間違っているため、アセンブラがインストールできていません。

```
C:%Users%respon>azprasm
'azprasm' は、内部コマンドまたは外部コマンド、
操作可能なプログラムまたはバッチ ファイルとして認識されていません。
```

「azprasm.exe」が置いてあるフォルダ名や、環境変数の設定が正しく行われているか確認してください。

■使い方

コマンドプロンプトを起動し、ソースコードを指定して「azprasm」コマンドを実行すると、機械語に変換されたファイルを出力します。「azprasm」コマンドのオプションを表 3-5 に示します。

▼表 3-5 azprasm コマンドのオプション

オプション	説明
-o outfile	outfile に出力するバイナリファイルの名前を指定します。
-p prgfile	prgfile で指定した名前で PRG ファイルを作成します。
--coe coefile	coefile で指定した名前で COE ファイルを作成します。ハイフンが 2 つ必要なことに注意してください。

「-o」オプションは、出力するバイナリファイルの名前を指定します。指定しない場合は、出力ファイルの名前は「outfile」となります。「-p」オプションは、指定した名前で「PRG ファイル」を作成します。「PRG ファイル」は第 1 章で紹介された iverilog でシミュレーションを行うときに使用するメモリの初期値を指定するファイルです。詳細は 1.4.3 項の「メモリーイメージの読み込み」を参照してください。「-p」オプションを指定しない場合は、「PRG ファイル」は作成されません。「--coe」オプションは、指定した名前で「COE ファイル」を作成します。「COE ファイル」はブロック RAM の初期値を指定するテキスト形式のファイルです。ISE Project Navigator から呼び出される「Block RAM Generator」ダイアログで使用します。詳細は 3.2.3 項の「BIT ファイルの作成」を参照してください。「--coe」オプションを指定しない場合は、「COE ファイル」は作成されません。

以下にコマンドプロンプトへの入力例を示します。このコマンドは、ソースコードに「sample.asm」をソースコードとして AZPR ASM で機械語に変換し、「sample.bin」という名前の出力ファイルを生成します。

```
C:¥Users¥respon>azprasm -o sample.bin sample.asm
```

■プログラムの書式

■ニーモニック

AZPR ASM のニーモニック一覧を表 3-6 に示します。各命令の詳細は、本書のサポートページからダウンロードできる「AZ Processor Specification Sheet」を参照してください。

▼表 3-6 ニーモニック一覧

種類	命令
論理演算命令	ANDR, ANDI, ORR, ORI, XORR, XORI
算術演算命令	ADDSR, ADDSI, ADDUR, ADDUI, SUBSR, SUBUR
シフト命令	SHRLR, SHRLI, SHLLR, SHLLI
分岐命令	BE, BNE, BSGT, BUGT, JMP, CALL
メモリ命令	LDW, STW
特殊命令	TRAP
特権命令	RDCR, WRCR, EXRT

■ディレクティブ

ディレクティブとは、アセンブラに対する指示を行うための記述です。AZPRASM のディレクティブ一覧を表 3-7 に示します。

▼表 3-7 ディレクティブ一覧

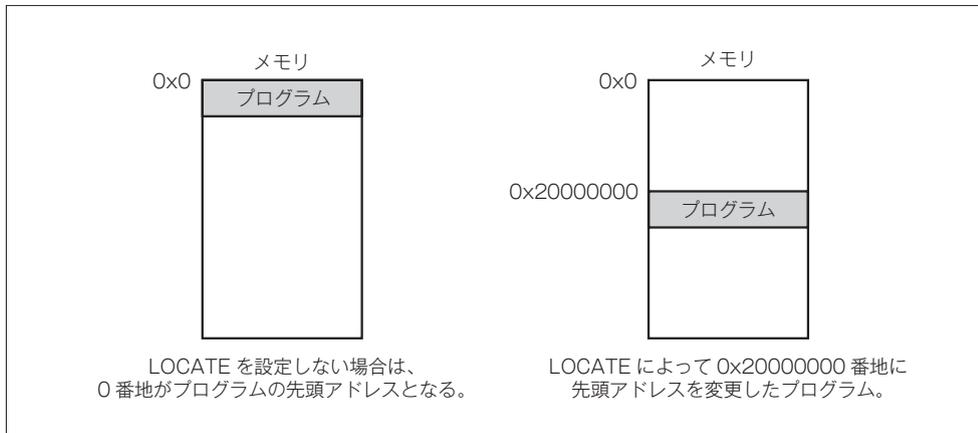
ディレクティブ	機能
LOCATE	プログラムの先頭番地の変更
EQU	シンボルの設定
high	アドレスの 16 ビット目から 31 ビット目までの値を 16 ビットの整数に変換します。
low	アドレスの 0 ビット目から 15 ビット目までの値を 16 ビットの整数に変換します。

●LOCATE

LOCATE は、プログラムの先頭アドレスの変更を行います。たとえば、プログラムに以下の設定することで、プログラムの先頭アドレスを 0x20000000 番地に変更します。

```
LOCATE 0x20000000
```

プログラムの先頭アドレスを変更した様子を図 3-67 に示します。



▲ 図 3-67 プログラムの先頭番地を変更した様子

● EQU

EQU は、シンボルの設定を行います。シンボルとは、プログラム中に出てくる値を文字列に置き換えたものです。シンボルを使うことで、プログラムを読むときに、命令を実行している対象がわかりやすくなります。以下に EQU の記述例を示します。

```
SYMBOL EQU 100
```

このように記述することによって、プログラム中の SYMBOL という文字列が 100 という値と同じ意味を持ちます。シンボルを使った記述の例を以下に示します。

```
ADDUI r0,r1,SYMBOL
```

上記の命令は、以下の命令と同じ意味になります。

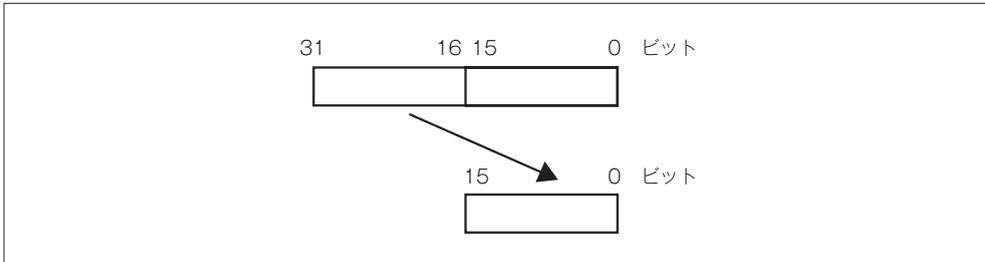
```
ADDUI r0,r1,100
```

● high

high は、アドレスの 16 ビット目から 31 ビット目までの値を 16 ビットの数値に変換します。ラベルに対しても使うことができます。以下に high の記述例を示します。

high(LABEL)

high による値の変換の様子を図 3-68 に示します。



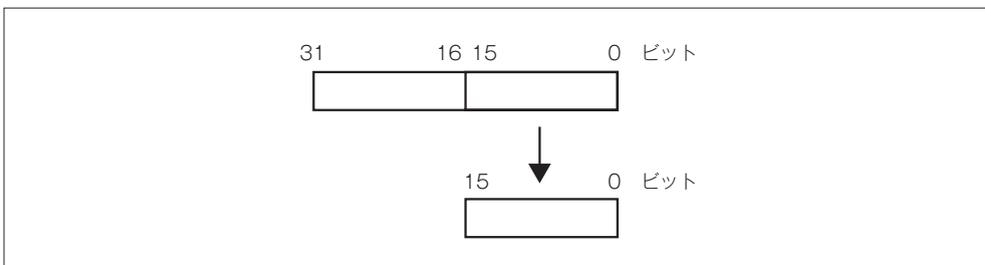
▲ 図 3-68 high による値の変換

● low

low は、アドレスの 0 ビット目から 15 ビット目までの値を 16 ビットの数値に変換します。ラベルに対しても使うことができます。以下に low の記述例を示します。

low(LABEL)

low による値の変換の様子を図 3-69 に示します。



▲ 図 3-69 low による値の変換

■ ラベルの形式

命令の存在するメモリアドレスにラベルを付けることができます。ラベルの文字列に続いて「:」を記述します。以下にラベルの記述例を示します。「XORR r0,r0,r0」という命令が格納されているアドレスに対して、LABEL というラベルを指定しています。

```

LABEL:
    XORR    r0, r0, r0

```

ラベルはディレクティブの high や low の引数や、分岐命令で指定する分岐先のアドレスの代わりに指定することができます。

■ 命令の形式

命令は、ニーモニックとオペランドで構成されます。ニーモニックとオペランドの間には1文字以上の半角スペースかタブが必要になります。

● ニーモニック

ニーモニックとして指定できる命令は、表 3-6 を参照してください。

● オペランド

オペランドには、命令の操作対象となるデータを記述します。オペランドとして、ラベル、汎用レジスタ、CPU 制御レジスタ、定数を指定することができます。

ラベルには、プログラム内で使用した文字列を記述します。ラベルが16ビット以上の値をとるときは、ディレクティブの high や、low を使って記述します。汎用レジスタは r0 ~ r31 で指定します。r の後に汎用レジスタの番号を記述します。CPU 制御レジスタは c0 ~ c7 で指定します。c の後に CPU 制御レジスタの Register Address を記述します。定数には、整数定数と文字定数があります。整数定数は、8進数と10進数と16進数で記述することができます。接頭語に0をつけると8進数になります。接頭語に0xをつけると16進数になります。文字定数は「」で括って記述します。整数定数の表記を表 3-8 に示します。

▼ 表 3-8 整数定数の表記

進数	例
8	0173
10	123
16	0x7B

以下に命令の記述例を示します。

ット 15 は 7 セグメント LED に割り当てられています。7 セグメント LED は、3.6 節で解説するので、ここでの解説は省略します。ビット 18 からビット 31 までは、どのデバイスにも割り当てられていません。

GPIO Output Port は負論理なので、値を 0 にすると LED が点灯し、1 にすると LED が消灯します。LED1 を点灯し、その他の LED を消灯するプログラムをリスト 3-1 に示します。

▼ リスト 3-1 LED 制御プログラム (led.asm)

```

1  ;; シンボルの定義
2  GPIO_BASE_ADDR_H    EQU 0x8000    ;GPIO Base Address High
3  GPIO_OUT_OFFSET     EQU 0x4      ;GPIO Output Port Register Offset
4
5  ;; LED点灯
6  XORR    r0,r0,r0
7  ORI     r0,r1,GPIO_BASE_ADDR_H  ;GPIO Base Address上位16ビットをr1にセット
8  SHLLI   r1,r1,16                ;16ビット左シフト
9  ORI     r0,r2,0x2               ;出力データを上位16ビットをr2にセット
10 SHLLI   r2,r2,16                ;16ビット左シフト
11 ORI     r2,r2,0xFFFF            ;出力データを下位16ビットをr2にセット
12 STW     r1,r2,GPIO_OUT_OFFSET   ;GPIO Output Portに出力データを書き込む
13
14 ;; 無限ループ
15 LOOP:
16 BE      r0,r0,LOOP              ;LOOPに戻る
17 ANDR    r0,r0,r0                ;NOP

```

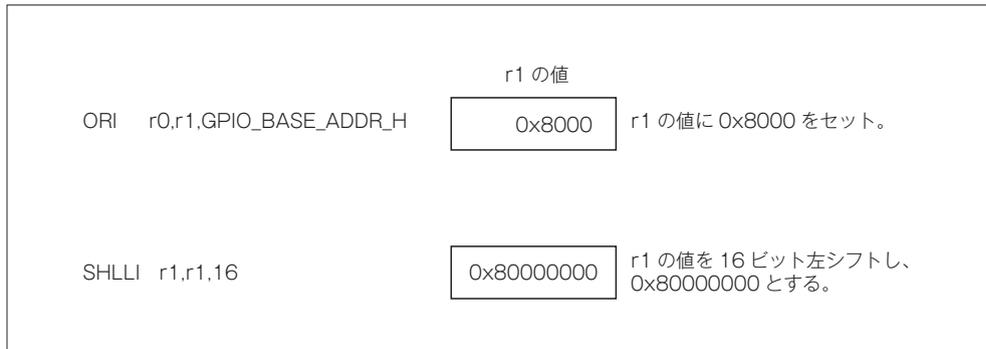
■ シンボルの定義

プログラムの最初にシンボルの定義を行っています。プログラム中で GPIO Output Port レジスタにアクセスするために、GPIO 制御レジスタのベースアドレスと、GPIO Output Port レジスタのオフセットを定義しています。

■ LED 制御

まず、r0 に 0 をセットしています。r0 は常に 0 が格納されているレジスタとして使います。今後もプログラムの先頭で記述するので覚えておいてください。7 行目から 8 行目で、r1 に GPIO 制御レジスタのベースアドレスである 0x80000000 を格納しています。AZ Processor では即値として指定できる値は 16 ビットなので、図 3-71 で示すように GPIO 制御レジスタのベースアドレス上位 16 ビットである 0x8000 を r1 に格納して、SHLLI 命

令で16ビット左シフトを行っています。



▲ 図 3-71 ベースアドレスをセットする命令と r1 の値

9 行目から 11 行目で、GPIO に出力するデータとして r2 に 0x2FFFF を格納しています。LED1 に割り当てられているビット 16 が 0、LED2 と 7 セグメント LED に割り当てられているビット 0 から 15 までとビット 17 は 1 となっています。12 行目で、STW 命令によって GPIO Output Port レジスタである 0x80000004 番地に r2 の値を書き込んでいます。

■無限ループ

GPIO へのアクセスが完了すると、これ以上命令を実行する必要はありません。しかし、AZ Processor はクロックごとに次の命令を読み込もうとします。この以上命令を実行しないように、BE 命令でラベル LOOP となっているところに戻る無限ループを行っています。このような終了処理をダイナミックエンドと言います。AZ Processor では、BE 命令を含む分岐命令の直後は遅延スロットとなっています。遅延スロットの命令は、直前の分岐命令による分岐が行われるかどうかに関わらず、必ず実行されます。本書では、分岐命令の次は NOP として ANDR r0,r0,r0 を明示的に書いています。

NOP というのは、No Operation の略で何もしない命令ということです。命令の意味を考えてもらえばわかると思いますが、r0 と r0 の論理積を計算して r0 に格納しています。結果として r0 は ANDR 命令実行前と変わらない値になります。

AZPR EvBoard を使って動作確認をします。まずは、先ほど説明した LED 制御プログラムのソースコードを作成します。テキストエディタを起動し、リスト 3-1 どおりにプログラムを入力し、テキストファイルとして保存します。ここでは、LED 制御プログラムを記述したテキストファイルの名前を「led.asm」とします。

次に、アセンブラを使ってソースコードを変換します。コマンドプロンプトを起動し、ファイルを作成した場所に移動します。ソースコードが「D:¥azpr¥program¥」にある場合は、以下のように入力することで移動することができます。

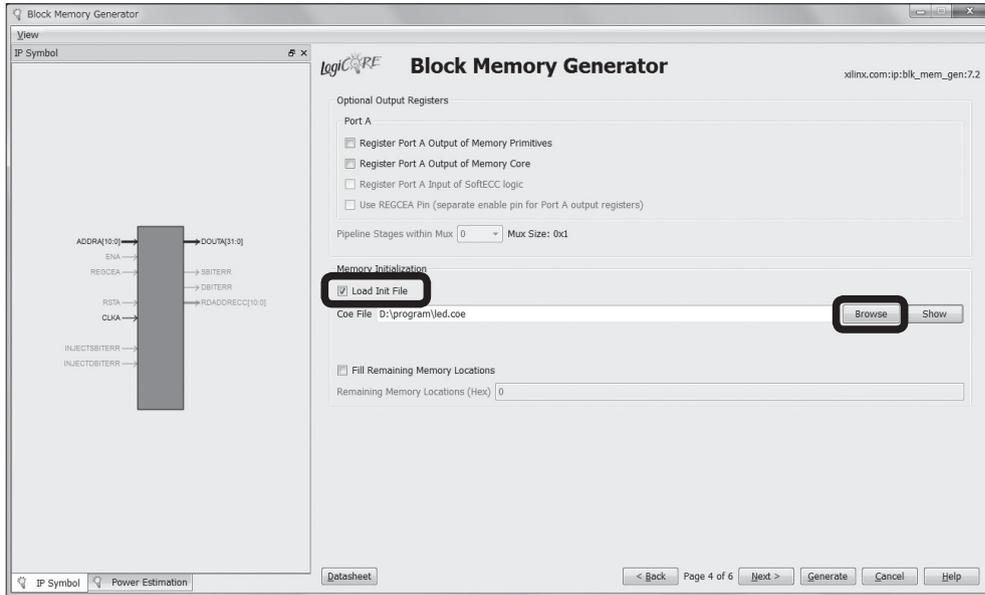
```
C:¥Users¥respon>D:  
D:>cd azpr¥program  
D:¥azpr¥program>
```

アセンブラを実行して、ソースコードを変換するには、以下のコマンドを入力します。

```
D:¥azpr¥program>azprasm led.asm -o led.bin --coe led.coe
```

「led.asm」が置いてあるフォルダと同じ場所に AZ Processor で実行させる機械語のファイル「led.bin」と ISE Project Navigator の「Block Memory Generator」ダイアログでブロック RAM の初期化を行うための形式になっている「led.coe」が作成されます。AZ Processor で実行させる機械語のファイルを BIN ファイルと呼ぶこととします。今回の手順では、プログラムは COE ファイルを使って AZ Processor の ROM 領域の初期化を行うため、「led.bin」は使いません。

次に、BIT ファイルを作成します。BIT ファイルを作成する手順については、3.2.3 項の「BIT ファイルの作成」を参照してください。「x_s3e_sprom」を作成するときに、先ほどアセンブラで作成した「led.coe」を読み込ませます。「Block Memory Generator」ダイアログの画面で、図 3-72 のように「Memory Initialization」の [Load Init File] にチェックを入れ、[Browse] ボタンを押して、「led.coe」を指定します。



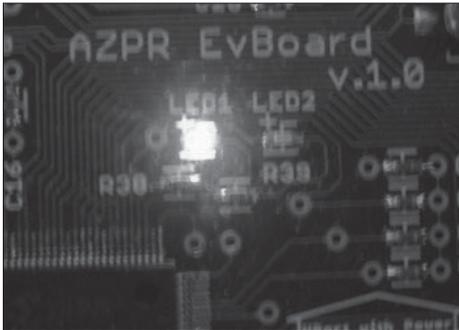
▲ 図 3-72 Block Memory Generator

BIT ファイルから SVF ファイルを作成します。3.2.3 項の「SVF ファイル作成」の手順に従って「led.svf」を作成してください。iMPACT の画面の Create SVF File では「led.svf」を指定し、「Add Device」ダイアログで先程作成した「led.bit」を選択します。Device 上で Program を選択したら、SVF ファイル「led.svf」が作成されます。

最後に、UrJTAG で SVF ファイルを再生します。まず、AZPR EvBoard の電源を入れて、USB ケーブルでパソコンと接続します。パソコンにデバイスが認識されたら、UrJTAG を起動して 3.2.4 項の「FPGA のコンフィギュレーション方法」で説明した手順でコンフィギュレーションを行います。

```
jtag> cable jtagkey
jtag> detect
jtag> part 0
jtag> svf led.svf progress
```

以上の作業で、メモリの ROM 領域にプログラムが書きこまれた AZ Processor のコンフィギュレーションが完了しました。これまでの手順が正しく行えているならば、AZ Processor がプログラムを実行して、写真 3-3 のように LED1 が点灯し、他の LED が消灯します。



▲ 写真 3-3 LED 制御プログラム実行の様子

次の節からは、これまでに説明したツールを利用して開発を進めます。そのため、ここでプログラムが動作していることを確認しておくことは非常に重要になります。もし期待どおりの結果にならなかった場合は、もう一度この節を戻って手順を確認してください。

3.3 シリアル通信

本節では、シリアル通信プログラムについて説明します。AZPR SoC に実装されている UART でパソコンと通信を行い、パソコンの画面に文字を表示させます。

シリアル通信の規格である RS-232（シリアルポートとも呼ばれる）は、パソコンのマザーボードにも搭載されており、周辺機器などの接続で広く使われています。現在は、徐々にシリアルポートが搭載されているマザーボードの数が減ってきており、ノートパソコンにはほとんど搭載されていません。

AZPR EvBoard には USB シリアル変換 IC が搭載されており、パソコンと USB ケーブルで接続することで、シリアル通信ができるようになっています。そのため、シリアルポートが搭載されていないパソコンでも AZPR EvBoard とシリアル通信を行うことができます。

3.3.1 Tera Term のインストール

パソコン側にはシリアルポートの入出力を行うための端末エミュレータが必要となります。シリアルポートから入力された文字はこの端末エミュレータ上に表示されます。Windows 7 には、Tera Term という有名な端末エミュレータがあるので、これを利用します。Tera Term は以下のウェブページからダウンロードできます。

Tera Term

<http://sourceforge.jp/projects/ttssh2/releases/>

ウェブブラウザで上記 URL にアクセスし、**図 3-73** で示すリンクから最新版のインストーラをダウンロードします。ファイル名に「exe」が含まれている方がインストーラです。

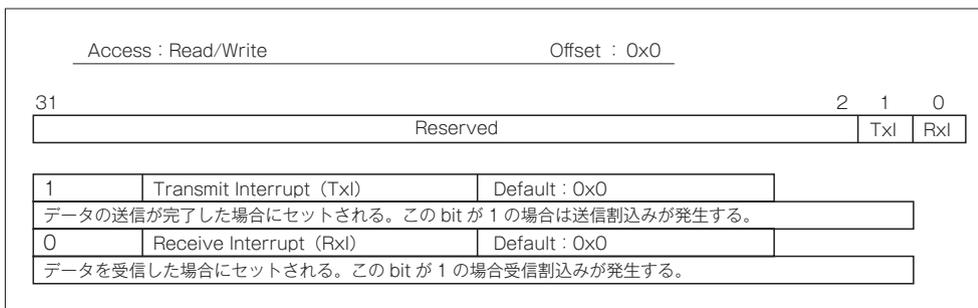
ダウンロードしたファイルを実行するとインストーラが起動します。インストーラに従って進めていけばインストールすることができます。



▲ 図 3-73 Tera Term のダウンロードページ

3.3.2 プログラムの作成

シリアル通信を使って、文字データを送信するプログラムを作成します。文字はプログラムの学習でお馴染みの「Hello,world.」にします。まずは UART のバッファクリアを行います。次に、文字データを 1 文字ずつ送信します。これらの処理を行うために使用する UART 制御レジスタのビットマップを図 3-74、図 3-75 に示します。



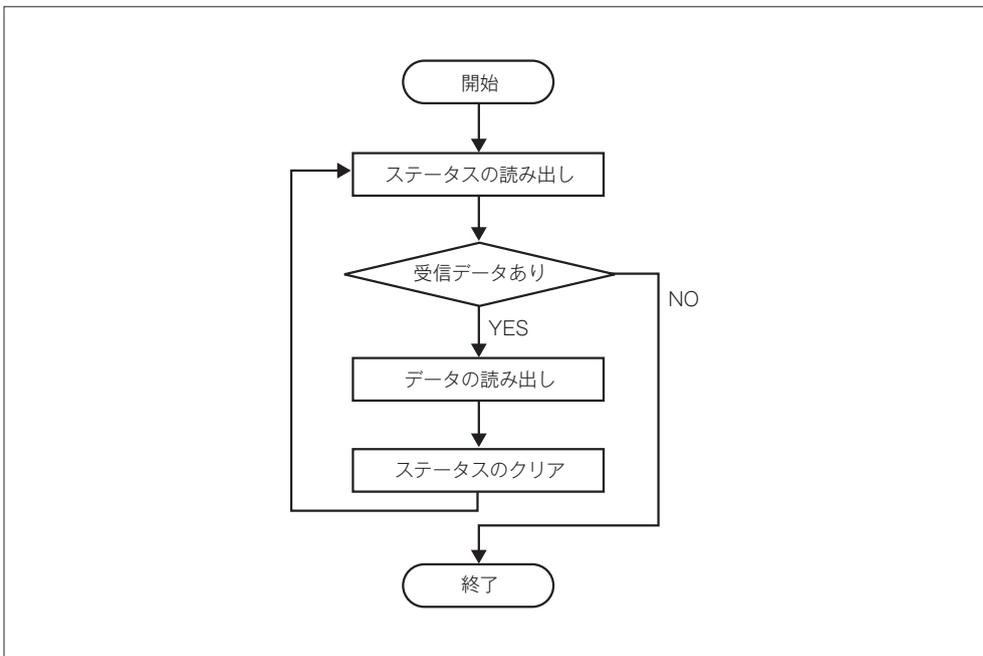
▲ 図 3-74 UART Status レジスタのビットマップ



▲ 図 3-75 UART Data レジスタのビットマップ

■バッファクリア

シリアル通信は電気信号なので、ケーブルの接続時などにハードウェアのノイズが信号に乗ってしまい、UART の送受信データ領域（バッファ）に余計なデータが入ってしまうことがあります。余計なデータを取り除くため、データ送受信を行う前に、バッファのクリアを行います。バッファクリアのフローチャートを図 3-76 に示します。

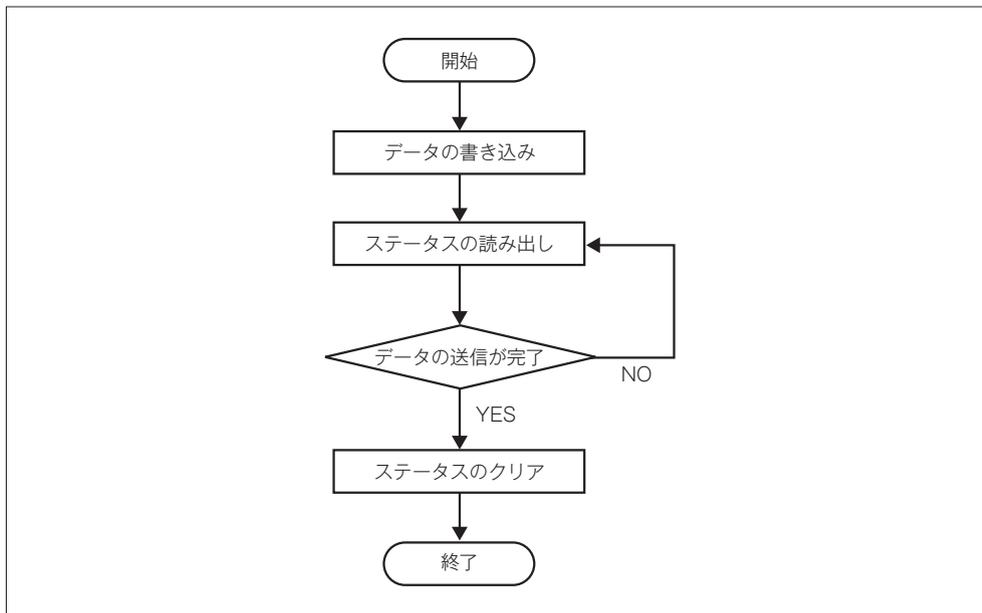


▲ 図 3-76 バッファクリアのフローチャート

UART Status レジスタからステータスの読み出しを行います。UART Status レジスタの Receive Interrupt ビットは、データを受信したかどうかを示します。ステータスがデータを受信したことを示していた場合は、UART Data Register からデータを読み出します。その後、UART Status Register の Receive Interrupt ビットをクリアします。ステータスが受信していないことを示していた場合は、バッファクリアの処理が終了となります。

■データ送信

データ送信のフローチャートを図 3-77 に示します。



▲ 図 3-77 データ送信のフローチャート

UART Data Register に送信データを書き込みます。次に、UART Status Register からステータスの読み出しを行います。UART Status Register の Transmit Interrupt ビットは送信が完了したかどうかを示します。送信が完了したことを示すまで、繰り返しステータスを読み出します。UART Status Register が送信完了したことを示した場合、Transmit Interrupt ビットのクリアを行い、データ送信処理を終了します。このように処理が完了していないか定期的に関わり合いを行う処理方式をポーリングと言います。

シリアル通信で文字データを送信するプログラムでは、ここで紹介したバッファクリアとデータ送信を行います。実際のプログラムをリスト 3-2 に示します。

▼ リスト 3-2 シリアル通信で文字を出力するプログラム (serial.asm)

```
1  ;;; シンボルの定義
2  UART_BASE_ADDR_H    EQU 0x6000      ;UART Base Address High
3  UART_STATUS_OFFSET  EQU 0x0        ;UART Status Register Offset
4  UART_DATA_OFFSET    EQU 0x4        ;UART Data Register Offset
5  UART_RX_INTR_MASK   EQU 0x1        ;UART Receive Interrupt Mask
6  UART_TX_INTR_MASK   EQU 0x2        ;UART Transmit Interrupt Mask
7
8
9  XORR    r0, r0, r0
10
11  ORI     r0, r1, high(CLEAR_BUFFER)  ;CLEAR_BUFFERの上位16ビットをr1にセット
12  SHLLI  r1, r1, 16
13  ORI     r1, r1, low(CLEAR_BUFFER)   ;CLEAR_BUFFERの下位16ビットをr1にセット
14
15  ORI     r0, r2, high(SEND_CHAR)     ;SEND_CHARの上位16ビットをr2にセット
16  SHLLI  r2, r2, 16
17  ORI     r2, r2, low(SEND_CHAR)     ;SEND_CHARの下位16ビットをr2にセット
18
19  ;;; UARTバッファクリア
20  CALL    r1                          ;CLEAR_BUFFER呼び出し
21  ANDR    r0, r0, r0                  ;NOP
22
23  ;;; 文字表示
24
25  ORI     r0, r16, 'H'                ;r16に'H'をセット
26  CALL    r2                          ;SEND_CHAR呼び出し
27  ANDR    r0, r0, r0                  ;NOP
28
29  ORI     r0, r16, 'e'                ;r16に'e'をセット
30  CALL    r2                          ;SEND_CHAR呼び出し
31  ANDR    r0, r0, r0                  ;NOP
32
33  ORI     r0, r16, 'l'                ;r16に'l'をセット
34  CALL    r2                          ;SEND_CHAR呼び出し
35  ANDR    r0, r0, r0                  ;NOP
36
37  ORI     r0, r16, 'l'                ;r16に'l'をセット
38  CALL    r2                          ;SEND_CHAR呼び出し
39  ANDR    r0, r0, r0                  ;NOP
40
41  ORI     r0, r16, 'o'                ;r16に'o'をセット
42  CALL    r2                          ;SEND_CHAR呼び出し
43  ANDR    r0, r0, r0                  ;NOP
44
45  ORI     r0, r16, ','                ;r16に','をセット
46  CALL    r2                          ;SEND_CHAR呼び出し
47  ANDR    r0, r0, r0                  ;NOP
48
49  ORI     r0, r16, 'w'                ;r16に'w'をセット
50  CALL    r2                          ;SEND_CHAR呼び出し
```

```

51     ANDR    r0, r0, r0                ;NOP
52
53     ORI     r0, r16, 'o'              ;r16に'o'をセット
54     CALL    r2                        ;SEND_CHAR呼び出し
55     ANDR    r0, r0, r0                ;NOP
56
57     ORI     r0, r16, 'r'              ;r16に'r'をセット
58     CALL    r2                        ;SEND_CHAR呼び出し
59     ANDR    r0, r0, r0                ;NOP
60
61     ORI     r0, r16, 'l'              ;r16に'l'をセット
62     CALL    r2                        ;SEND_CHAR呼び出し
63     ANDR    r0, r0, r0                ;NOP
64
65     ORI     r0, r16, 'd'              ;r16に'd'をセット
66     CALL    r2                        ;SEND_CHAR呼び出し
67     ANDR    r0, r0, r0                ;NOP
68
69     ORI     r0, r16, '.'              ;r16に'.'をセット
70     CALL    r2                        ;SEND_CHAR呼び出し
71     ANDR    r0, r0, r0                ;NOP
72
73     ;;; 無限ループ
74     LOOP:
75     BE      r0, r0, LOOP               ;無限ループ
76     ANDR    r0, r0, r0                ;NOP

```

■ シンボルの定義

UART 制御レジスタのベースアドレスとアクセスするレジスタのオフセットを定義しています。また、UART Status レジスタの Receive Interrupt ビットと Transmit Interrupt ビットのマスクするための値を定義しています。

■ サブルーチンコールの設定

プログラム中でアクセスするサブルーチン他の処理から呼び出せるように、汎用レジスタにラベルの値を格納しています。

r1 にはラベル CLEAR_BUFFER の値を、r2 にはラベル SEND_CHAR の値を格納しています。

■ UART バッファクリア :

r1 をオペランドとして CALL 命令を実行し、CLEAR_BUFFER サブルーチンを呼び出しています。CALL 命令の次は遅延スロットとなるため、NOP で埋めています。プログラムを最適化する場合は、ここは NOP ではなくてもよいのですが、本書ではプログラムの可読性と説明の容易性のため、最適化は行っていません。

■ 文字データ送信

r16 に送りたい文字を入れて、SEND_CHAR サブルーチン呼び出しています。1文字ずつの送信のため、25行目から71行目で、文字データをセットし、SEND_CHAR サブルーチン呼び出す処理を繰り返しています。

■ 無限ループ

プログラムの終了処理を行っています。LED制御のプログラムと同じく、この行以降の命令を読み込まないように、ラベル LOOP に戻る無限ループとなっています。

■ CLEAR_BUFFER サブルーチン

CLEAR_BUFFER サブルーチンをリスト 3-3 に示します。

▼ リスト 3-3 CLEAR_BUFFER サブルーチン (serial.asm)

```
78 CLEAR_BUFFER:
79     ORI    r0,r16,UART_BASE_ADDR_H    ;UART Base Address上位16ビットをr16にセット
80     SHLLI  r16,r16,16
81
82     _CHECK_UART_STATUS:
83     LDW    r16,r17,UART_STATUS_OFFSET ;STATUSを取得
84
85     ANDI   r17,r17,UART_RX_INTR_MASK
86     BE     r0,r17,_CLEAR_BUFFER_RETURN ;Receive Interrupt bitが立っていないければ
                                           _CLEAR_BUFFER_RETURNを実行
87     ANDR   r0,r0,r0                    ;NOP
88
89     _RECEIVE_DATA:
90     LDW    r16,r17,UART_DATA_OFFSET    ;受信データを読んでバッファをクリアする
91
92     LDW    r16,r17,UART_STATUS_OFFSET  ;STATUSを取得
93     XORI   r17,r17,UART_RX_INTR_MASK
94     STW    r16,r17,UART_STATUS_OFFSET  ;Receive Interrupt bitをクリア
95
96     BNE    r0,r0,_CHECK_UART_STATUS    ;_CHECK_UART_STATUSに戻る
97     ANDR   r0,r0,r0                    ;NOP
98     _CLEAR_BUFFER_RETURN:
99     JMP    r31                          ;呼び出し元に戻る
100    ANDR   r0,r0,r0                    ;NOP
```

■ CLEAR_BUFFER

79行目から80行目で、r16の値にUART制御レジスタのベースアドレスである

0x60000000を格納しています。83行目で、UART Statusレジスタの値をr17に格納します。85行目から86行目で、r17に格納したUART StatusレジスタのReceive Interruptビットが1とないか確認し、0の場合はラベル_CLEAR_BUFFER_RETURNに分岐します。1の場合は、90行目でUART Dataレジスタを読み出し、92行目から94行目でUART StatusレジスタのReceive Interruptビットを0クリアします。その後、96行目でラベル_CHECK_UART_STATUSに戻ります。ラベル_CLEAR_BUFFER_RETURNでは、99行目でCLEAR_BUFFERサブルーチンの呼び出し元に戻ります。

■SEND_CHAR サブルーチン

SEND_CHAR サブルーチンをリスト 3-4 に示します。

▼リスト 3-4 SEND_CHAR サブルーチン (serial.asm)

```

103 SEND_CHAR:
104     ORI    r0,r17,UART_BASE_ADDR_H    ;UART Base Address上位16ビットをr17にセット
105     SHLLI  r17,r17,16
106     STW   r17,r16,UART_DATA_OFFSET    ;r16を送信する
107
108     _WAIT_SEND_DONE:
109     LDW   r17,r18,UART_STATUS_OFFSET    ;STATUSを取得
110     ANDI  r18,r18,UART_TX_INTR_MASK
111     BE    r0,r18,_WAIT_SEND_DONE
112     ANDR  r0,r0,r0
113
114     LDW   r17,r18,UART_STATUS_OFFSET
115     XORI  r18,r18,UART_TX_INTR_MASK
116     STW  r17,r18,UART_STATUS_OFFSET    ;Transmit Interrupt bitをクリア
117
118     JMP   r31                            ;呼び出し元に戻る
119     ANDR  r0,r0,r0                        ;NOP

```

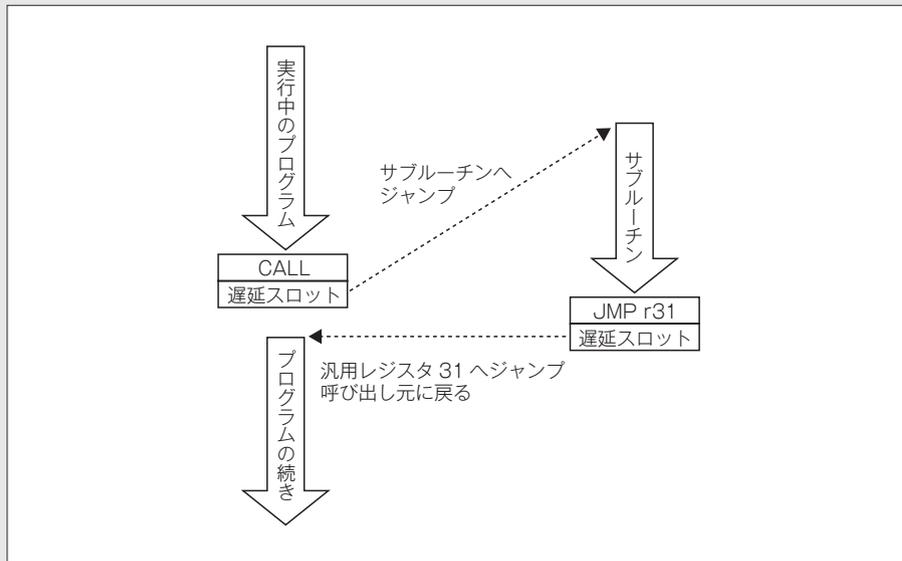
■SEND_CHAR

104行目から105行目で、r16にUART制御レジスタのベースアドレスである0x60000000を格納しています。106行目でUART Dataレジスタにr16の値を書き込みます。108行目から111行目で、UART StatusレジスタのTransmit Interruptビットの値を確認し、0の場合はラベル_WAIT_SEND_DONEに戻ります。1の場合は、114行目から116行目でUART StatusレジスタのTransmit Interruptビットを0クリアします。その後、118行目でSEND_CHARサブルーチンの呼び出し元に戻ります。

サブルーチン

サブルーチンとは、まとまった処理をモジュール化して、別のルーチンから呼び出せるようにしたものです。繰り返し行われる処理をサブルーチンにすることで、同じ処理を何度も記述する手間が省け、プログラムの可読性も上がります。繰り返し行われる処理でなくても、意味的なまとまりを示すために処理をサブルーチン化することもあります。

AZ Processor では、サブルーチンコールに CALL 命令を使用します。CALL 命令ではサブルーチンへ命令の実行が移ると同時に CALL 命令の 2 つ先のアドレスを r31 に格納します。サブルーチンでの処理が終わり、元のプログラムに戻るときは、JMP r31 と記述します。この命令によって r31 に格納されていたアドレスに命令の実行が移ります。CALL 命令には遅延スロットがあるので実行しても問題ないように注意が必要です。図 3-78 にサブルーチンコールの流れを示します。



▲ 図 3-78 サブルーチンコールの流れ

ASCII コード

ASCII コードとは、アメリカ規格協会の定めた文字コードです。7ビットで表現され、128種類のアルファベット、数字、記号、制御コードで構成されています。リスト 3-2 のプログラム中で 'H' のようにシングルクォートで囲んだ文字は、アセンブラによって整数に変換されています。文字の代わりに同じ意味を表す整数をプログラムに書いても、同じ文字が表示されます。ASCII コード表を表 3-10 に掲載します。

▼表 3-10 ASCII コード表

10進	16進	文字	10進	16進	文字	10進	16進	文字	10進	16進	文字
0	0x0	NUL	32	0x20	SPACE	66	0x40	@	99	0x60	`
1	0x1	SOH	33	0x21	!	67	0x41	A	100	0x61	a
2	0x2	STX	34	0x22	"	68	0x42	B	101	0x62	b
3	0x3	ETX	35	0x23	#	69	0x43	C	102	0x63	c
4	0x4	EOT	36	0x24	\$	70	0x44	D	103	0x64	d
5	0x5	ENQ	37	0x25	%	71	0x45	E	104	0x65	e
6	0x6	ACK	38	0x26	&	72	0x46	F	105	0x66	f
7	0x7	BEL	39	0x27	'	73	0x47	G	106	0x67	g
8	0x8	BS	40	0x28	(	74	0x48	H	107	0x68	h
9	0x9	HT	42	0x29	)	75	0x49	I	108	0x69	i
10	0xA	LF	43	0x2A	*	76	0x4A	J	109	0x6A	j
11	0xB	VT	44	0x2B	+	77	0x4B	K	110	0x6B	k
12	0xC	FF	45	0x2C	,	78	0x4C	L	111	0x6C	l
13	0xD	CR	46	0x2D	-	79	0x4D	M	112	0x6D	m
14	0xE	SO	47	0x2E	.	80	0x4E	N	113	0x6E	n
15	0xF	SI	48	0x2F	/	81	0x4F	O	114	0x6F	o
16	0x10	DLE	49	0x30	0	82	0x50	P	115	0x70	p
17	0x11	DC1	50	0x31	1	83	0x51	Q	116	0x71	q
18	0x12	DC2	51	0x32	2	84	0x52	R	117	0x72	r
19	0x13	DC3	52	0x33	3	85	0x53	S	118	0x73	s
20	0x14	DC4	53	0x34	4	86	0x54	T	119	0x74	t
21	0x15	NAK	54	0x35	5	87	0x55	U	120	0x75	u
22	0x16	SYN	55	0x36	6	88	0x56	V	121	0x76	v
23	0x17	ETB	56	0x37	7	89	0x57	W	122	0x77	w
24	0x18	CAN	57	0x38	8	90	0x58	X	123	0x78	x
25	0x19	EM	58	0x39	9	91	0x59	Y	124	0x79	y
26	0x1A	SUB	59	0x3A	:	92	0x5A	Z	125	0x7A	z
27	0x1B	ESC	60	0x3B	;	93	0x5B	]	126	0x7B	{
28	0x1C	FS	61	0x3C	<	94	0x5C	\	127	0x7C	|
29	0x1D	GS	62	0x3D	=	95	0x5D	]	125	0x7D	}
30	0x1E	RS	63	0x3E	>	96	0x5E	^	126	0x7E	~
31	0x1F	US	65	0x3F	?	98	0x5F	_	127	0x7F	DEL

3.3.3 プログラムの実行

プログラムの動作確認を行います。まずは、3.2.6 項と同様にソースコードを作成し、SVF ファイルの作成までを行います。次に、AZPR EvBoard の電源を入れて、USB ケーブルでパソコンと接続します。パソコンにデバイスが認識されたら、Tera Term を起動します。

Tera Term を起動すると、「新しい接続」ダイアログが開きます。ここでシリアルポートを選択します。USB シリアル変換デバイスの FT2232 によるシリアルポートは、COM ポートの値の異なる 2 つの「USB Serial Port」が存在します。数字の小さいほうの COM ポートは、FPGA のコンフィギュレーション用のポートなので、ここでは数字が大きいほうの COM ポートを選択して、[OK] ボタンをクリックします。図 3-79 に「新しい接続」ダイアログを示します。



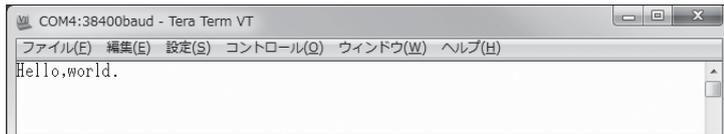
▲ 図 3-79 新しい接続

メニューバーより [設定] → [シリアルポート] を選択して、シリアルポートの設定を行います。この設定値は AZPR SoC の UART の仕様により設定値が決まります。図 3-80 にシリアルポート設定を示します。



▲ 図 3-80 シリアルポート設定

UrJTAG でコンフィギュレーションを行い、リセットボタンを押すと、図 3-81 のように、Tera Term の画面に「Hello,world.」の文字が出力されます。



▲ 図 3-81 「Hello,world.」の出力

3.4 プログラムローダ

本節では、プログラムローダについて説明します。

ここまでのプログラムの実行手順では、プログラムの作成や修正をするたびに論理合成や配置配線などを行なって、FPGA のコンフィギュレーションをしなければいけませんでした。本節では、AZPR Processor の RAM 領域であるスクラッチパッドメモリにプログラムを転送して実行するプログラムローダについて説明します。プログラムローダを ROM に格納し、プログラムの作成や修正をしたときには、プログラムの転送のみを行うことで、作業が短縮され、効率よく開発が行えるようになります。

本節で解説するプログラムローダは、パソコンからシリアル通信でデータを受け取り、スクラッチパッドメモリに展開します。すべてのデータを書き込んだ後、スクラッチパッドメモリの先頭アドレスからプログラムを実行します。

データ通信を行うためには、通信をするための決まり事(プロトコル)が必要になります。実装が比較的簡単であることと、Tera Term で利用可能であることから、ここではデータ転送プロトコルに XMODEM を利用します。まず XMODEM の仕様について説明します。次に、AZ PRocessor で実行するローダとロード対象のプログラムについて説明します。最後に、プログラムをロードするまでの手順を説明します。

3.4.1 XMODEM 解説

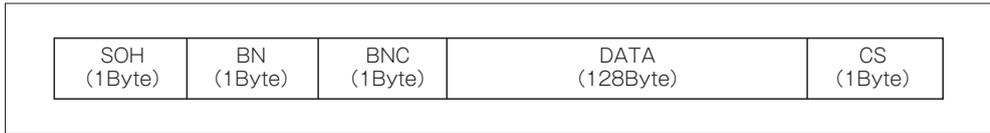
XMODEM にもいくつか種類がありますが、ここでは基本となる XMODEM-SUM について説明します。これ以降、XMODEM と記した場合は、XMODEM-SUM を指します。XMODEM はデータブロック単位でデータを送信し、制御コードを使用して通信制御を行います。通信制御で使われる制御コードを表 3-11 に示します。

▼ 表 3-11 XMODEM で使う制御コード

略号	意味	16進数	送出元
SOH	Start Of Heading	0x01	送信側
EOT	End Of Transmission	0x04	送信側
CAN	CANcel	0x18	双方
ACK	ACKnowledge	0x06	受信側
NAK	Negative AcKnowledge	0x15	受信側

SOH は送信データブロックの先頭に入ります。ACK は、受信側が正しくブロックを受

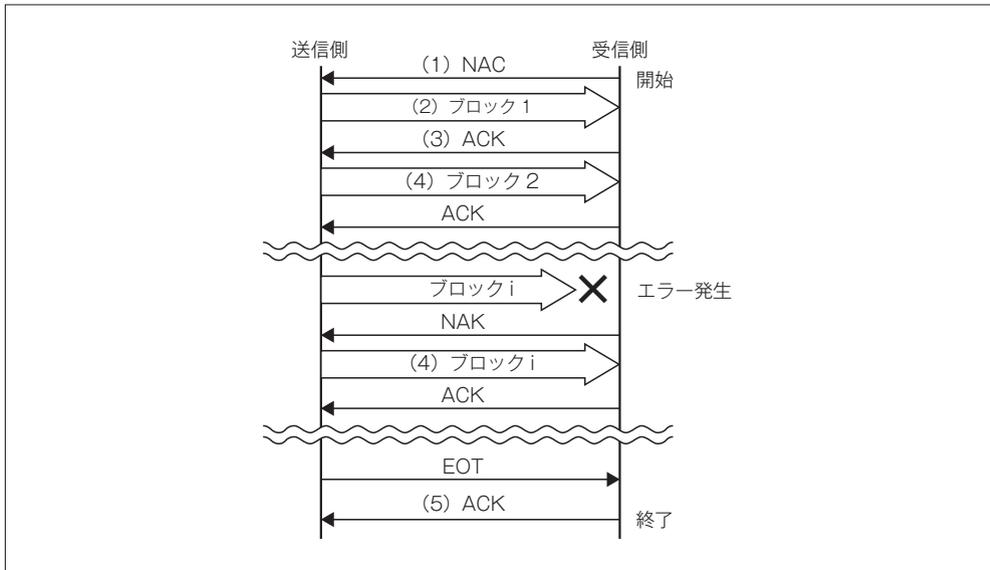
信したことを送信側に伝えます。NAK は送られてきたブロックに誤りがあったなどことを送信側に伝え、送信側は NAK を受信すると直前に送ったブロックを再送します。EOT はファイル転送の終了を意味します。これを受けた側は、ACK を返してファイル転送を終了します。CAN は何らかの理由でファイル転送を続行できなくなった場合に送信側、あるいは受信側から送信します。これを受けた側は、ACK を返すことなく処理をエラー終了します。図 3-82 に送信データのブロックの構成を示します。



▲ 図 3-82 送信データのブロック構成

ブロックの先頭には SOH が入ります。BN はブロック番号が入り、0x01 からはじまります。BN が 0xFF に到達した場合、次は 0x00 になります。BNC はブロック番号をビット反転した値になります。DATA には 128 バイトのデータが入ります。データが 128 バイトに満たないときは、0x1A で埋めて 128 バイトにします。CS は 1 バイトのチェックサムで、1 ブロックのデータをすべて足した下位 8 ビットになります。

次に、図 3-83 を参照して、データの転送手順を説明します。



▲ 図 3-83 XMODEM のデータのやりとり

- (1) 受信側から NAK を送信します。
- (2) 送信側は、NAK を受信すると1つ目のブロックを送信します。
- (3) 受信側では、先頭の1バイト（ヘッダ）が SOH となっていることを確認し、エラーチェックを行います。エラーチェックは、BN と BNC がビット反転の関係にあるか（1の補数となっているか）を確認した後、チェックサムを確認します。すべて正しければ ACK、エラーがあれば NAK を送信します。
- (4) 送信側は、ACK を受信すると次のブロックを送信します。NAK を受信すると、直前に送信したブロックを再送信します。送信側は、データをすべて送り終わると EOT を送信します。
- (5) 受信側は、EOT を受信すると、ACK を送信します。送信側ではこの ACK を受信してファイル転送を終了します。

3.4.2 プログラムローダの作成

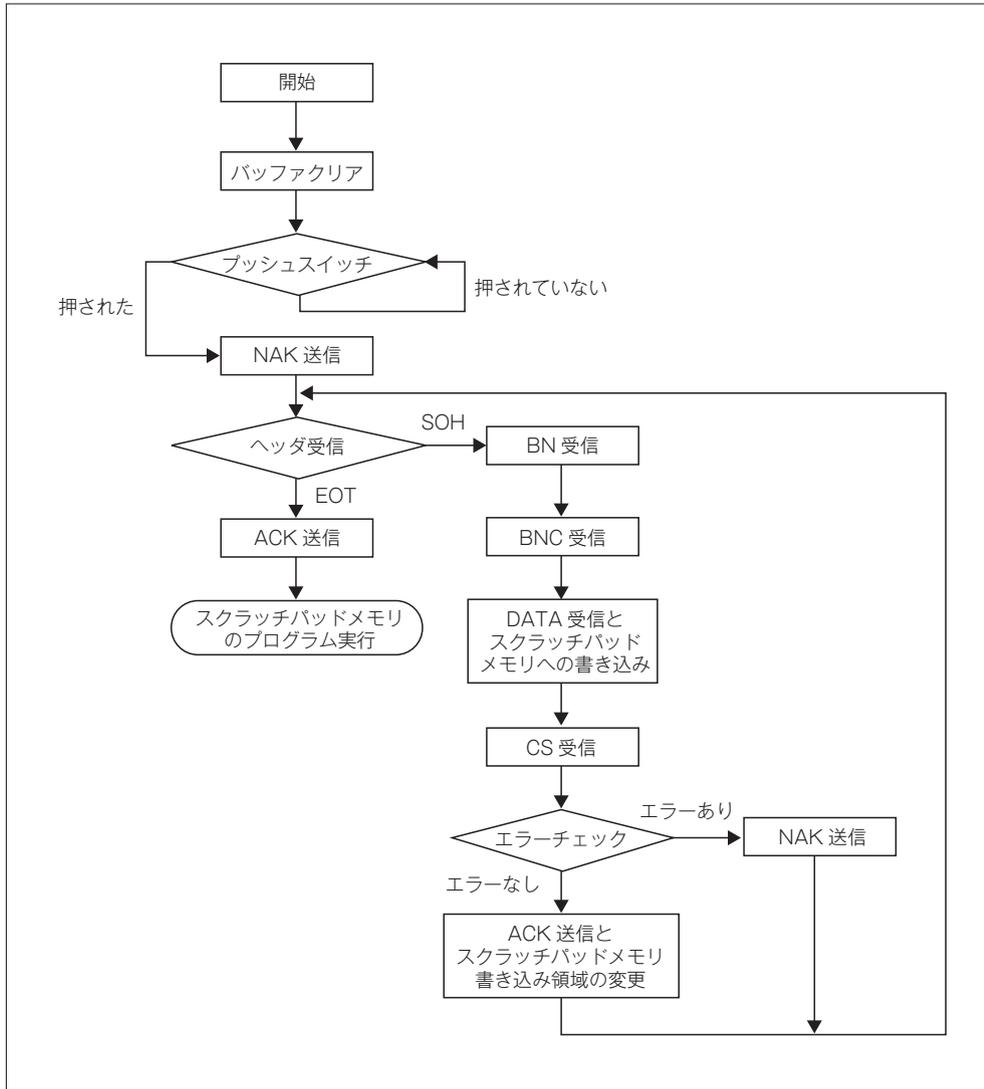
プログラムローダは、XMODEM の受信側の処理を行ってデータを受信し、スクラッチパッドメモリにデータを書き込みます。すべてのデータを書き込んだ後、スクラッチパッドメモリの先頭アドレスからプログラムを実行します。プログラムローダのフローチャートを図 3-84 に示します。

プログラムローダは UART のバッファクリアを行い、プッシュスイッチが押されるのを待ちます。プッシュスイッチが押されると、NAK を送信し、ヘッダを受信します。ヘッダが SOH のときは BN、BNC、DATA を受信します。DATA は1バイトずつ受信し、4バイトのデータに組み立て、スクラッチパッドメモリに書きこんで行きます。これを128バイト分繰り返します。

DATA 受信完了後、CS を受信します。その後、2つのエラーチェックを行います。1つ目のエラーチェックとして BN と BNE を足して 0xFF と比較します。0xFF でなければエラーなので、NAK を送信します。BN と BNE のチェックでエラーとなっていなければ、2つ目のエラーチェックとしてチェックサムを確認します。このチェックサムによる、データの誤り検出は、受信した前データをバイト単位で加算して、CS の値と比較します。値が同じ場合、データは正常であり、異なる値となった場合は、エラーとなります。チェックサムでもエラーが発生した場合は、NAK を送信します。エラーが発生しなかった場合は ACK を送信し、DATA 受信で書き込むスクラッチパッドメモリの領域を、次の領域に変更します。

そして次のヘッダを受信します。SOH を受信した場合は、再度 BN、BNC、DATA を

受信します。EOT を受信した場合は、ACK を送信して命令の実行をスクラッチパッドメモリに移します。



▲ 図 3-84 プログラムローダのフローチャート

■プログラムローダのリスト

プログラムローダをリスト 3-5 に示します。

▼ リスト 3-5 プログラムローダ (loader.asm)

```

1  ;; シンボルの定義
2  UART_BASE_ADDR_H   EQU    0x6000    ;UART Base Address High
3  UART_STATUS_OFFSET EQU    0x0      ;UART Status Register Offset
4  UART_DATA_OFFSET   EQU    0x4      ;UART Data Register Offset
5  UART_RX_INTR_MASK  EQU    0x1      ;UART Receive Interrupt
6  UART_TX_INTR_MASK  EQU    0x2      ;UART Receive Interrupt
7
8  GPIO_BASE_ADDR_H   EQU    0x8000    ;GPIO Base Address High
9  GPIO_IN_OFFSET     EQU    0x0      ;GPIO Input Port Register Offset
10 GPIO_OUT_OFFSET    EQU    0x4      ;GPIO Output Port Register Offset
11
12 SPM_BASE_ADDR_H    EQU    0x2000    ;SPM Base Address High
13
14 XMODEM_SOH        EQU    0x1      ;Start Of Heading
15 XMODEM_EOT        EQU    0x4      ;End Of Transmission
16 XMODEM_ACK        EQU    0x6      ;ACKnowledge
17 XMODEM_NAK        EQU    0x15     ;Negative Acknowledge
18 XMODEM_DATA_SIZE  EQU    128
19
20
21  XORR    r0,r0,r0
22
23  ORI     r0,r1,high(CLEAR_BUFFER) ;ラベルCLEAR_BUFFERの上位16ビットをr1にセット
24  SHLLI  r1,r1,16
25  ORI     r1,r1,low(CLEAR_BUFFER)  ;ラベルCLEAR_BUFFERの下部16ビットをr1にセット
26
27  ORI     r0,r2,high(SEND_BYTE)    ;ラベルSEND_BYTEの上位16ビットをr2にセット
28  SHLLI  r2,r2,16
29  ORI     r2,r2,low(SEND_BYTE)     ;ラベルSEND_BYTEの下部16ビットをr2にセット
30
31  ORI     r0,r3,high(RECV_BYTE)    ;ラベルRECV_BYTEの上位16ビットをr3にセット
32  SHLLI  r3,r3,16
33  ORI     r3,r3,low(RECV_BYTE)     ;ラベルRECV_BYTEの下部16ビットをr3にセット
34
35  ORI     r0,r4,high(WAIT_PUSH_SW) ;ラベルWAIT_PUSH_SWの上位16ビットをr4にセット
36  SHLLI  r4,r4,16
37  ORI     r4,r4,low(WAIT_PUSH_SW)  ;ラベルWAIT_PUSH_SWの下部16ビットをr4にセット
38
39  ;; UARTのバッファクリア
40  CALL   r1                        ;CLEAR_BUFFER呼び出し
41  ANDR   r0,r0,r0                  ;NOP
42

```

```

43     ORI     r0,r20,GPIO_BASE_ADDR_H ;GPIO Base Address上位16ビットをr20にセット
44     SHLLI   r20,r20,16              ;16ビット左シフト
45     ORI     r0,r21,0x3              ;出力データを上位16ビットをr21にセット
46     SHLLI   r21,r21,16              ;16ビット左シフト
47     ORI     r21,r21,0xFFFF          ;出力データを下位16ビットをr21にセット
48     STW     r20,r21,GPIO_OUT_OFFSET ;GPIO Output Portに出力データを書き込む
49
50 ;; Wait Push Switch
51     CALL    r4
52     ANDR    r0, r0, r0
53
54 ;; NAK送信
55     ORI     r0,r16,XMODEM_NAK       ;r16にNAKをセット
56     CALL    r2                      ;SEND_BYTE呼び出し
57     ANDR    r0,r0,r0                ;NOP
58
59     XORR    r5,r5,r5
60 ;; ブロックの先頭を受信する
61 ;; 受信待ち
62 RECV_HEADER:
63     CALL    r3                      ;RECV_BYTE呼び出し
64     ANDR    r0,r0,r0                ;NOP
65
66 ;; 受信データ
67     ORI     r0,r6,XMODEM_SOH        ;r6にSOHをセット
68     BE      r16,r6,RECV_SOH
69     ANDR    r0,r0,r0                ;NOP
70
71 ;; EOT
72 ;; ACK送信
73     ORI     r0,r16,XMODEM_ACK       ;r16にACKをセット
74     CALL    r2                      ;SEND_BYTE呼び出し
75     ANDR    r0,r0,r0                ;NOP
76
77 ;; jump to spm
78     ORI     r0,r6,SPM_BASE_ADDR_H   ;SPM Base Address上位16ビットをr6にセット
79     SHLLI   r6,r6,16
80
81     JMP     r6                      ;SPMのプログラムを実行する
82     ANDR    r0,r0,r0                ;NOP
83
84 ;; SOH
85 RECV_SOH:
86 ;; BN受信
87     CALL    r3                      ;RECV_BYTE呼び出し
88     ANDR    r0,r0,r0                ;NOP
89     ORR     r0,r16,r7                ;r7に受信データBNをセット
90

```

続く→

```

91 ;; BNC受信
92 CALL r3 ;RECV_BYTE呼び出し
93 ANDR r0,r0,r0 ;NOP
94 ORR r0,r16,r8 ;r8に受信データBNCをセット
95
96 ORI r0,r9,XMODEM_DATA_SIZE
97 XORR r10,r10,r10 ;r10をクリア
98 XORR r11,r11,r11 ;r11をクリア
99
100 ;; 1ブロック受信
101 ; byte0
102 READ_BYTE0:
103 CALL r3 ;RECV_BYTE呼び出し
104 ANDR r0,r0,r0 ;NOP
105 ADDUR r11,r16,r11
106 SHLLI r16,r16,24 ;24bit左シフト
107 ORR r0,r16,r12
108
109 ; byte1
110 CALL r3 ;RECV_BYTE呼び出し
111 ANDR r0,r0,r0 ;NOP
112 ADDUR r11,r16,r11
113 SHLLI r16,r16,16 ;16bit左シフト
114 ORR r12,r16,r12
115
116 ; byte2
117 CALL r3 ;RECV_BYTE呼び出し
118 ORR r0,r0,r0 ;NOP
119 ADDUR r11,r16,r11
120 SHLLI r16,r16,8 ;8bit左シフト
121 ORR r12,r16,r12
122
123 ; byte3
124 CALL r3 ;RECV_BYTE呼び出し
125 ORR r0,r0,r0 ;NOP
126 ADDUR r11,r16,r11
127 ORR r12,r16,r12
128
129 ; write memory
130 ORI r0,r13,SPM_BASE_ADDR_H ;SPM Base Address上位16ビットをr13にセット
131 SHLLI r13,r13,16
132
133 SHLLI r5,r14,7
134 ADDUR r14,r10,r14
135 ADDUR r14,r13,r13
136 STW r13,r12,0
137
138 ADDUI r10,r10,4

```

```
139     BNE     r10,r9,READ_BYTE0
140     ANDR   r0,r0,r0           ;NOP
141
142 ;; CS受信
143     CALL   r3                 ;RECV_BYTE呼び出し
144     ANDR   r0,r0,r0           ;NOP
145     ORR    r0,r16,r12
146
147 ;; Error Check
148     ADDUR  r7,r8,r7
149     ORI    r0,r13,0xFF        ;r13に0xFFをセット
150     BNE    r7,r13,SEND_NAK    ;BN+BNCが0xFFでなければNAK送信
151     ANDR   r0,r0,r0           ;NOP
152
153     ANDI   r11,r11,0xFF       ;r11に0xFFをセット
154     BNE    r12,r11,SEND_NAK    ;check sumが正しいか
155     ANDR   r0,r0,r0           ;NOP
156
157 ;; ACK送信
158 SEND_ACK:
159     ORI    r0,r16,XMODEM_ACK  ;r16にACKをセット
160     CALL   r2                 ;SEND_BYTE呼び出し
161     ANDR   r0,r0,r0           ;NOP
162     ADDUI  r5,r5,1
163     BNE    r0,r0,RETURN_RECV_HEADER
164     ANDR   r0,r0,r0           ;NOP
165
166 ;; NAK送信
167 SEND_NAK:
168     ORI    r0,r16,XMODEM_NAK  ;r16にNAKをセット
169     CALL   r2                 ;SEND_BYTE呼び出し
170     ANDR   r0,r0,r0           ;NOP
171
172 ;; RECV_HEADERに戻る
173 RETURN_RECV_HEADER:
174     BE     r0,r0,RECV_HEADER
175     ANDR   r0,r0,r0           ;NOP
176
```

■ シンボルの定義

プログラム中でアクセスする UART と GPIO の制御レジスタのベースアドレスと各レジスタのオフセット、XMODEM で使う制御コード、スクラッチパッドメモリのベースアドレス、データサイズを定義しています。

■ サブルーチンコールの設定

r1 にはラベル CLEAR_BUFFER の値を、r2 にはラベル SEND_BYTE の値を、r3 にはラベル RECV_BYTE の値を、r4 にはラベル WAIT_PUSH_SW の値を格納しています。

■ UART バッファクリア

シリアル通信のプログラムと同じように、CLEAR_BUFFER を呼び出して、UART のバッファ内が空になるまで、データの読み出しを行っています。CLEAR_BUFFER サブルーチンについては 3.3.2 項で説明していますので、そちらを参照してください。

■ LED 制御

43 行目から 48 行目で、LED 制御を行っています。3.2.6 項で説明した LED 制御とほぼ同じなのですが、GPIO Output Port レジスタの LED に割り当てられているビットをすべて 1 にして、すべての LED を消灯しています。このプログラムは、主に UART でのデータのやりとりとなるため、転送が始まるまではプログラムが動作しているかがわかりません。AZPR EvBoard の LED はデフォルトの設定ではすべての LED が点灯するため、この LED 制御を行うことでプログラムが動作しているかどうかを AZPR EvBoard 上の LED で確認することができます。

■ プッシュスイッチの入力待ち

WAIT_PUSH_SW を呼びだし、プッシュスイッチが押されるのを待ちます。WAIT_PUSH_SW サブルーチンについては後述します。

■ NAK 送信

r16 に送信データとして NAK を格納し、CALL 命令で SEND_BYTE サブルーチンを呼んでいます。これによって、NAK を送信します。

■ ヘッダ受信

RECV_BYTE サブルーチンを呼び出し、1 バイト受信しています。受信データが SOH となっているかを確認し、SOH の場合は、ラベル RECV_SOH に分岐し、BN 受信を行います。SOH ではない場合は、受信データが EOT であるとして ACK 送信を行います。RECV_BYTE サブルーチンについては後述します。

■ ACK 送信

NAK 送信と同様に、r16 に送信データとして ACK を格納し、CALL 命令で SEND_BYTE サブルーチン呼び出ししています。これによって、ACK を送信します。ここで XMODEM による転送が完了します。78 行目から 79 行目で、r6 にスクラッチパッドメモリのベースアドレスである 0x20000000 を格納し、81 行目の JMP 命令でスクラッチパッドメモリに命令の実行が移ります。その後、スクラッチパッドメモリに書き込まれたプログラムを実行します。

■ BN 受信

RECV_BYTE サブルーチン呼び出し、1 バイト受信しています。受信データを r7 にセットしています。

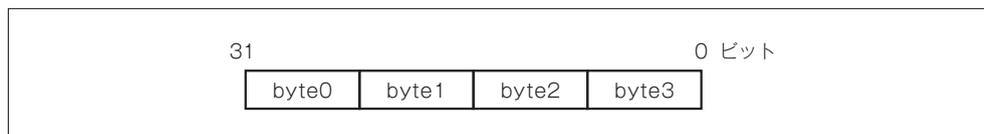
■ BNC 受信

RECV_BYTE サブルーチン呼び出し、1 バイト受信しています。受信データを r8 にセットしています。

■ DATA 受信とスクラッチパッドメモリへの書き込み

96 行目では r9 に 1 ブロックの DATA 領域のサイズである 128 を格納しています。r10 は 1 ブロック中に受信した DATA 領域のサイズを記録するカウンタとして使用し、r11 はチェックサムのために使用します。r10 と r11 は、それぞれ 98 行目、99 行目で 0 クリアをしています。

DATA 領域は、byte0、byte1、byte2、byte3 に分けて RECV_BYTE サブルーチン呼び出し、1 バイトずつデータを受信しています。データを受信後、r12 に受信データを格納しています。byte0 は 24 ビット分、byte1 は 16 ビット分、byte2 は 8 ビット分左シフトしてから格納することで、r12 は図 3-85 で示すような 4 バイトのデータに組立られています。



▲ 図 3-85 4 バイトのデータ

105 行目、112 行目、119 行目、126 行目では、受信データを加算して r11 に格納し、チェックサムを計算しています。

130 行目から 135 行目で、4 バイトのデータを書き込むアドレスを計算しています。130 行目から 131 行目では、r13 にスクラッチパッドメモリのベースアドレスである 0x20000000 を格納しています。133 行目では、128 倍と同じ結果が得られる 7 ビットの左シフトを受信したブロック数を格納する r5 に対して行い、r14 に格納しています。134 行目から 135 行目で、r10 と r13 と r14 を加算し、r13 に格納しています。つまり、以下の結果を r13 に格納していることになります。

$$r13 + r5 \times 128 + r10$$

r5 : 受信したブロック数
r10 : 1 ブロック中に受信した DATA 領域のサイズ
r13 : スクラッチパッドメモリのベースアドレス

136 行目で、上記で計算した r13 で示すアドレスに r16 の値を書き込みます。138 行目から 129 行目で、カウンタに 4 を加算し、受信データが 128 バイトに到達したかどうかを確認しています。到達していない場合は、ラベル READ_BYTE0 に分岐し、DATA 受信を行います。到達した場合は、CS 受信を行います。

■CS 受信

RECV_BYTE サブルーチンを呼び出し、1 バイト受信しています。受信データを r12 にセットしています。

■エラーチェック

148 行目から 149 行目で、BN の値が格納されている r7 と BNE の値が格納されている r8 を足して、0xFF となっているか確認しています。0xFF となっていない場合は、ラベル SEND_NAK に分岐し、NAK 送信を行います。0xFF となっている場合は、153 行目から 154 行目でチェックサムを格納している r11 の値が 0xFF となっているかを確認します。0xFF となっていない場合は、ラベル SEND_NAK に分岐し、NAK 送信を行います。0xFF となっているばあいは ACK 送信を行います。

■ACK 送信

r16 に送信データとして ACK を格納し、CALL 命令で SEND_BYTE サブルーチンを

呼び出し、ACKを送信します。162行目で、受信したブロック数を格納している r5 に 1 を加算します。その後、163行目でラベル RETURN_RECV_HEADER に分岐します。

■NAK 送信

r16 に送信データとして NACK を格納し、CALL 命令で SEND_BYTE サブルーチンを呼び出し、NAKを送信します。

■ヘッダ受信に戻る

ラベル RECV_HEADER に戻り、再度ヘッダ受信を行います。

■RECV_BYTE サブルーチン

RECV_BYTE サブルーチンをリスト 3-6 に示します。このサブルーチンは、UART の受信データを r16 に格納します。

▼リスト 3-6 RECV_BYTE サブルーチン (loader.asm)

```

220 RECV_BYTE:
221     ORI    r0,r17,UART_BASE_ADDR_H    ;UART Base Address上位16ビットを
                                         ;r17にセット
222     SHLLI  r17,r17,16
223
224     LDW    r17,r18,UART_STATUS_OFFSET ;STATUSを取得
225     ANDI   r18,r18,UART_RX_INTR_MASK
226     BE     r0,r18,RECV_BYTE           ;Receive Interrupt bitが立ってい
                                         ;ればRECV_BYTEを実行
227     ANDR   r0,r0,r0                   ;NOP
228
229     LDW    r17,r16,UART_DATA_OFFSET    ;受信データを読む
230
231     LDW    r17,r18,UART_STATUS_OFFSET ;STATUSを取得
232     XORI   r18,r18,UART_RX_INTR_MASK
233     STW    r17,r18,UART_STATUS_OFFSET ;Receive Interrupt bitをクリア
234
235     JMP    r31                          ;呼び出し元に戻る
236     ANDR   r0,r0,r0                   ;NOP

```

■RECV_BYTE

224行目で、UART Status レジスタを r18 に格納し、225行目から 226行目で Receive Interrupt ビットが 0 かどうかを確認しています。0 となっている場合は、ラベル RECV_BYTE に戻り、再度 UART Status レジスタを読み出します。1 となった場合は、UART

Data レジスタで受信データを r16 に格納します。231 行目から 233 行目で、Receive Interrupt レジスタをクリアしてサブルーチンを終了しています。

■ WAIT_PUSH_SW サブルーチン

WAIT_PUSH_SW サブルーチンをリスト 3-7 に示します。このサブルーチンでは、SW1 から SW4 のいずれかのプッシュスイッチが押されたときに、呼び出し元に戻ります。

▼ リスト 3-7 WAIT_PUSH_SW サブルーチン (loader.asm)

```

238 WAIT_PUSH_SW:
239     ORI     r0, r16, GPIO_BASE_ADDR_H
240     SHLLI  r16, r16, 16
241     _WAIT_PUSH_SW_ON:
242     LDW    r16, r17, GPIO_IN_OFFSET
243     BE     r0, r17, _WAIT_PUSH_SW_ON
244     ANDR   r0, r0, r0                ;NOP
245     _WAIT_PUSH_SW_OFF:
246     LDW    r16, r17, GPIO_IN_OFFSET
247     BNE   r0, r17, _WAIT_PUSH_SW_OFF
248     ANDR   r0, r0, r0                ;NOP
249     _WAIT_PUSH_SW_RETURN:
250     JMP    r31
251     ANDR   r0, r0, r0                ;NOP

```

■ WAIT_PUSH_SW

241 行目から 243 行目で、GPIO Input Port レジスタに値がセットされていないか確認し、プッシュスイッチが ON になるまでラベル _WAIT_PUSH_SW_ON に戻り続けます。次に、プッシュスイッチが OFF に戻ることを確認します。245 行目から 247 行目で、再度 GPIO Input Port レジスタを確認し、プッシュスイッチが OFF になるまでラベル _WAIT_PUSH_SW_OFF に戻り続けます。

3.4.3 ロード対象のプログラムの作成

次はロード対象のプログラムについて説明します。ロード対象のプログラムの簡単な例をリスト 3-8 のプログラムで示します。

▼ リスト 3-8 ロード対象のプログラムの例 (prog.asm)

```
1  ;;; ロケーションアドレスの設定
2  LOCATE 0x20000000
3
4  ;;; シンボルの定義
5  GPIO_BASE_ADDR_H EQU 0x8000 ;GPIO Base Address High
6  GPIO_OUT_OFFSET EQU 0x4 ;GPIO Output Port Register Offset
7
8  ;;; LED点灯
9  XORR r0,r0,r0
10 ORI r0,r1,GPIO_BASE_ADDR_H ;GPIO Base Address上位16ビットをr1にセット
11 SHLLI r1,r1,16 ;16ビット左シフト
12 ORI r0,r2,0x2 ;出力データを上位16ビットをr2にセット
13 SHLLI r2,r2,16 ;16ビット左シフト
14 ORI r2,r2,0xFFFF ;出力データを下位16ビットをr2にセット
15 STW r1,r2,GPIO_OUT_OFFSET ;GPIO Output Portに出力データを書き込む
16
17 ;;; 無限ループ
18 LOOP:
19 BE r0,r0,LOOP ;LOOPに戻る
20 ANDR r0,r0,r0 ;NOP
```

このプログラムは、リスト 3-1 の LED を点灯させるためのプログラムとほぼ同じで、動作としては LED の点灯を行います。リスト 3-1 のプログラムと異なる点は、2 行目の LOCATE の記述です。

LOCATE でアドレスを指定することにより、プログラムの先頭番地を指定します。アドレス 0x20000000 番地は AZ Processor のスクラッチパッドメモリのベースアドレスとなっているため、リスト 3-8 はスクラッチパッドメモリに配置するためのプログラムとなります。

3.4.4 プログラムの実行

プログラムローダの動作確認を行います。まず、プログラムローダのソースコード「loader.asm」を作成し、アセンブラでバイナリファイルに変換します。その後、このバイナリファイルに対して 3.2.6 項と同様に BIT ファイルを作成します。

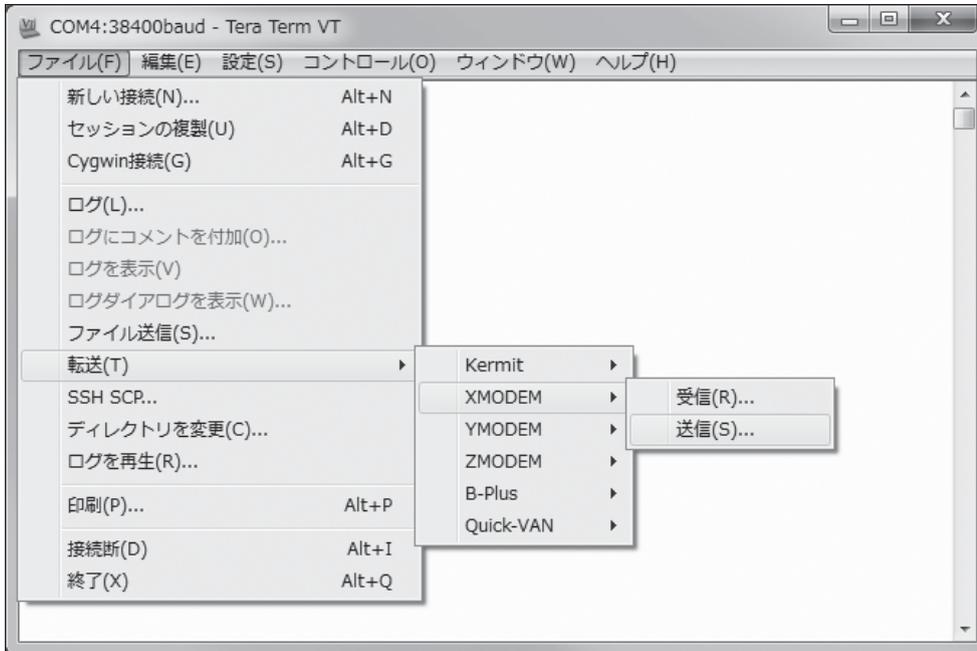
プログラムローダはこの後の節でも使うことになるので、AZPR EvBoard の電源を入れた時に自動的に FPGA にコンフィギュレーションが行われるように、コンフィギュレーション ROM を使用することをおすすめします。コンフィギュレーション ROM に書き込むために必要な MCS ファイルを作成する手順は、3.2.3 項の「MCS ファイル作成」を参照してください。その後、SVF ファイルを作成します。MCS ファイルから SVF ファイルを作成する手順は、3.2.3 項の「SVF ファイル作成」を参照してください。

UrJTAG で SVF ファイルを再生し、コンフィギュレーション ROM に対して書き込みを行います。AZPR EvBoard の電源を入れて、USB ケーブルでパソコンを接続します。パソコンにデバイスが認識されたら、UrJTAG を起動し、以下のコマンドを実行します。上記手順で作成した SVF ファイルを「loader.svf」としています。

```
jtag> cable jtagkey
jtag> detect
jtag> part 1
jtag> svf loader.svf progress
```

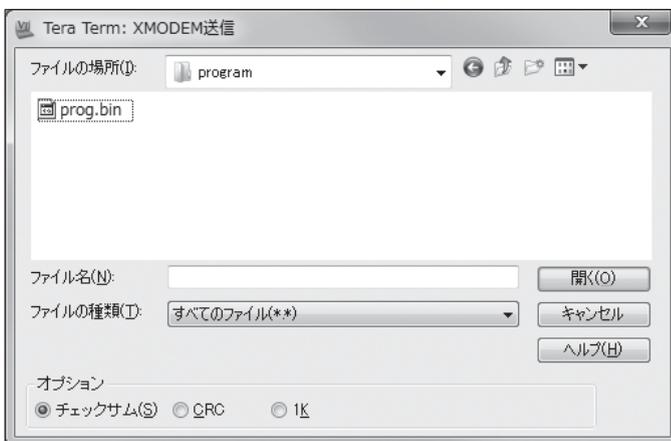
次に、ロード対象のプログラムのソースコード「prog.asm」を作成し、アセンブラでバイナリファイル「prog.bin」に変換します。その後、Tera Term を起動します。3.3.3 項と同様に「新しい接続」ダイアログで、シリアルポートを選択します。ここで選択するシリアルポートも、COM ポートの異なる 2 つの「USB Serial Port」のうち数字の大きいほうになります。

Tera Term のウィンドウが表示されたら、メニューバーより [ファイル] → [転送] → [XMODEM] → [送信] を選択します。メニューバーから選択している画面を図 3-86 に示します。



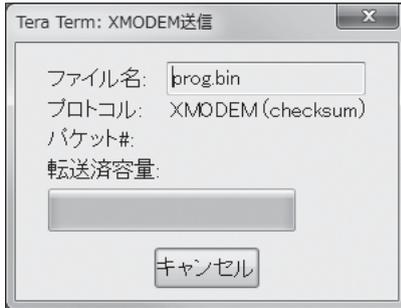
▲ 図 3-86 XMODEM による送信の選択

図 3-87 で示すようにファイル選択ダイアログが表示されるので、ロード対象のプログラムである「prog.bin」を選択します。このとき、オプションでは「チェックサム」が選択されていることを確認してください。



▲ 図 3-87 送信のファイル選択ダイアログ

ロード対象のプログラムを選択すると、Tera Termは転送待ちの状態となり、**図 3-88**で示すウィンドウが表示されます。



▲ **図 3-88** 転送待ちの状態が表示されるウィンドウ

ここまでで、準備は完了です。AZPR EvBoardのリセットボタンを押し、プログラムローダを再実行します。AZPR EvBoard上のSW1からSW4までのいずれかのプッシュスイッチを押すと、Tera Termで指定したファイルの転送が開始します。転送中は転送済容量がプログレスバーで表示され、転送が完了するとウィンドウは自動的に閉じます。ロード対象のプログラムが動作すると、LED1が点灯します。

ロード対象のプログラムを変更した場合は、アセンブラでバイナリファイルに変換し、Tera Termの操作からやり直します。このように、プログラムローダを使うと、プログラムを転送するだけで動作確認をすることができます。

次の節からは、プログラムローダを使う前提でプログラムを作成します。

3.8 おわりに

本章では、AZ Processor のプログラミングについて解説しました。

始めに、AZ Processor の開発環境として、ISE WebPACK、UrJTAG、アセンブラのインストールと使い方を説明しました。その後、LED、シリアル通信、XMODEM、割り込み、例外、7セグメント LED を動作させるためのサンプルプログラムの説明を行いました。最後に、AZPR EvBoard に搭載されている様々な周辺回路を動作させる応用プログラムとして、キッチンタイマーを作成しました。

謝辞

本書を出版するに際して、大変多くの方々からご助力を賜りました。末筆ではありますが、そうした全ての方々に対して、感謝の意を述べたいと思います。

「CPU 自作入門」の書籍化にあたり、担当編集者の林也寸夫様に、深く感謝いたします。彼のマネジメント、アドバイス、そして忍耐なしには、本書が完成する日は来なかったでしょう。そして、編集長の加藤博様にも、厚く御礼申し上げます。

第1章の執筆にあたり、ツールの掲載を快諾して下さった IcarusVerilog 作者の Stephen Williams 様、GTKWave 作者の Tony Bybell 様に深く感謝いたします。

第2章の執筆にあたり、基板製作のアドバイスや機材の貸し出しをして下さったサンハヤト株式会社様、Eagle の使用方法についてアドバイスをして下さった有限会社サーキットボードサービス様、基板製造についてアドバイスをして下さった株式会社ピーバンドットコム様、3D 部品ライブラリを提供して下さった株式会社図研 ePartFinder 運営事務局様に深く感謝いたします。

第3章の執筆にあたり、ツールの不明点についての問い合わせに快く応じて下さったザイリンクステクニカルサポートセンター様、ツールの掲載を快諾して下さった cblsvr-0.1_ft2232 作者の fenrir 様に深く感謝いたします。

本書の内容について、下記の方々から多くのご助言、ご指導を賜りました。深く感謝いたします。

株式会社 東芝 セミコンダクター&ストレージ社	武田 瑛 様
株式会社 東芝 セミコンダクター&ストレージ社	真垣 郁男 様
パナソニック株式会社	西川 由理 様
某情報サービス事業会社	藤井 啓 様

また、本書の執筆にあたって、家族の理解と協力を感謝いたします。

最後に、本書を手にとって下さった全ての方々に、心より感謝いたします。

CPU 自作入門 おわりに

本書ではオリジナルのコンピュータシステムを作成しました。第1章ではCPUであるAZ Processorを中心に、I/O、メモリ、バスから構成されるAZPR SoCの設計と実装について説明しました。第2章ではAZPR SoCを実機にて動作させるための基板を設計し、製作する手順を説明しました。第3章ではAZPR SoC上で動作するプログラムを作成し、実機にて動作を確認する手順を説明しました。

本書の原点は、執筆者らの同人活動です。執筆者の3人は同人サークル「れすぽん」(<http://respon.org/>)において、CPUを独自に設計・実装し、その過程を同人誌にまとめて頒布しています。本書の前身は、れすぽんにて執筆した同人誌「CPU自作入門」です。2007年8月の発足以来、同人誌をコミックマーケットなどで頒布していたところ、技術評論社の林様から書籍化の話を受け、このたび出版に至りました。

書籍化にあたり、CPU、基板、ソフトウェアを新たに設計しました。より多くの人に読んでもらうため、前提知識の敷居を低く設定し、本文も新たに書き下ろしました。限られた紙面の中で、CPUの設計と実装、基板の設計と製作、プログラミングに至るまでを網羅的に説明すると、どうしても内容が一足飛びになってしまいますが、本書では「ものをつくる」ということに重点を置いて執筆しました。コンピュータの設計と製作について説明した数少ない書籍として、お役に立てれば幸いです。

2012年9月 執筆者一同

■著者略歴

■第1章著者

水頭 一壽 (すいとう かずとし)

1986年3月福岡県生まれ。慶應義塾大学理工学研究科前期博士課程を修了。現在同大学の後期博士課程に在学。組込みリアルタイムシステム用システムLSIの研究開発に従事。趣味は音楽、写真、自転車など。サークルれすぼんでは論理設計を担当。

■第2章著者

米澤 遼 (よねざわりょう)

1984年10月東京都生まれ。慶應義塾大学理工学研究科前期博士課程を修了後、株式会社 東芝 セミコンダクター & ストレージ社に勤務。高速シリアルインタフェースIPの開発に従事。趣味は電子工作、自宅サーバ管理など。サークルれすぼんでは基板設計と表紙絵を担当。

■第3章著者

藤田 裕士 (ふじた ゆうじ)

1985年3月愛知県生まれ。慶應義塾大学理工学研究科前期博士課程を修了後、日本電気株式会社に勤務。ファームウェア開発に従事。趣味は音楽鑑賞、ギター演奏など。サークルれすぼんではソフトウェア設計を担当。

しーびーゆーじさくにゆうもん CPU自作入門

えいちでいーえる ろんりせつけい きばんせいさく
～HDLによる論理設計・基板製作・プログラミング～

2012年11月25日 初版 第1刷発行

著者 すいとう かずとし よねざわりょう ふじた ゆうじ
水頭 一壽・米澤 遼・藤田 裕士
発行者 片岡 巖
発行所 株式会社技術評論社
東京都新宿区市谷左内町 21-13
電話 03-3513-6150 販売促進部
03-3513-6166 書籍第2編集部

印刷／製本 株式会社 加藤文明社

定価はカバーに印刷してあります

本書の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、複製、転載、テープ化、ファイルに落とすことを禁じます。

造本には細心の注意を払っておりますが、万一、乱丁（ページの乱れ）や落丁（ページの抜け）がございましたら、小社販売促進部までお送りください。送料小社負担にてお取り替えいたします。

© 2012 水頭 一壽・米澤 遼・藤田 裕士

ISBN978-4-7741-5338-4 C3055

Printed in Japan

- カバーデザイン
有限会社釣巻デザイン室
- 本文デザイン・DTP
有限会社スタジオ・キャロット
- 編集担当
林 也寸夫

■お問い合わせについて

本書に関するご質問は記載内容についてのみとさせていただきます。本書の内容以外のご質問には一切応じられませんので、あらかじめご了承ください。なお、お電話でのご質問は受け付けておりませんので、書面またはFAX、小社Webサイトのお問い合わせフォームをご利用ください。

〒162-0846
東京都新宿区市谷左内町 21-13
株式会社技術評論社 書籍第2編集部
「CPU自作入門 ～HDLによる論理設計・基板製作・プログラミング～」係
FAX：03-3513-6167
URL：<http://gihyo.jp/>
(技術評論社 Web サイト)



本コンテンツは、Gihyo Digital Publishing において、
電子化データとして再発行されたものです。

初回配信日：2012年10月20日

最新配信日：2012年10月20日

電子版 ISBN978-4-7741-5381-0

本コンテンツは、電子化データの一部分をお試し版として再発行したものです。

正誤表などは以下をご覧ください。

<http://gihyo.jp/book/2012/978-4-7741-5338-4>

電子版の詳細は以下をご覧ください。

<https://gihyo.jp/dp/ebook/2012/978-4-7741-5381-0>

初回配信日：2017年10月27日

最新配信日：2017年10月27日