

セキュリティキャンプ2022 Y4

RISC-V CPU自作ゼミ

はじめに

講義で取り扱う領域

- RISC-V CPUコアの設計方法については書籍に記載
 - 基本的なRISC-Vコアの実装
 - Chiselの環境構築
 - 簡単なシミュレーションの実行方法
- 書籍では以下の内容は取り扱っていない
 - CPU外部との入出力
 - FPGAへの実装
- 書籍で取り扱っていない部分を補足しつつ、FPGA実装を行い、外部との入出力を行うことが目標

書籍で実装するRISC-Vコア

- 第III部までの内容 (パイプライン化)
- RISC-V RV32I のサブセット
 - 一部命令が実装されていない
 - e.g. LB, LH, SB, SHなどのワード単位以外のロード・ストア命令
- 5段パイプライン

FPGAで動くようにする

FPGAで合成チャレンジ！

- 意外とそのまま行けたりするんじゃないの？という話もあるので、まずは合成できるベースまで持っていく

FPGAとは

- Field Programmable Gate Arrayの略
- ここでは、製造後に論理回路の構成を変更可能なICくらいの認識で良い
- 詳しいことが知りたい場合は [FPGAの原理と構成](#) を参照のこと

ChiselからVerilog HDLの生成

- FPGAの論理合成系へ入力できるようにするためChiselからVerilog HDLへの変換が必要
- Chiselではこの処理のことを **エラボレーション (Elaboration)** と呼ぶ

Chiselのエラレーション(1/3)

- `runMain` で実行できるように `App` の派生クラスを定義する
- `ChiselStage` の `emitVerilog` に、Verilogに変換したいChiselのモジュールを渡して呼び出す
- 第2引数に変換時のパラメータを含む `Array` を指定する
- ソースコード

```
package fpga

import chisel3._
import chisel3.stage.ChiselStage
import cpu.Top

object Elaborate_ComProcCpuBoard extends App {
  (new ChiselStage).emitVerilog(new Top, Array(
    "-o", "riscv.v",
    "--target-dir", "rtl/comproc_cpu_board",
  ))
}
```

Chiselのエラボレーション(2/3)

- sbtから定義したAppを呼び出す

```
$ sbt
sbt:riscv_chisel_book> runMain fpga.Elaborate_ComProcCpuBoard
[info] compiling 6 Scala sources to /home/kenta/repos/seccamp_2022_y4_riscv/fpga_impl/target/scala-2.12/classes ...
[info] running fpga.Elaborate_ComProcCpuBoard
Elaborating design...
Done elaborating.
```

Chiselのエラボレーション(3/3)

- `--target-dir` パラメータで指定したディレクトリ (`rtl/comproc_cpu_board`) に変換後のVerilogのモジュールが出力される
- 出力ファイル名は `-o` パラメータで指定したファイル名 (`riscv.v`)

```
rtl
├── comproc_cpu_board
│   ├── firrtl_black_box_resource_files.f
│   ├── riscv.v
│   ├── Top.anno.json
│   ├── Top.fir
│   └── Top.Memory.mem.v
```

Chiselから変換したHDLの論理合成

- とりあえずGOWINの合成系で合成してみる
- 合成時にエラー

```
eda/cpu_riscv_chisel_book$ make  
(省略)  
Running inference ...  
ERROR (RP0001) : The number(131072) of DFF in the design exceeds the resource limit(6480) of current device(GW1NR-LV9QN88PC6/I5)  
ERROR (IF0003) : Cannot infer "mem" due to multiple write clocks("/home/kenta/repos/seccamp_2022_y4_riscv/fpga_impl/rtl/comproc_cpu_board/riscv.v":1029)  
GowinSynthesis finish
```

- DFFの個数が **131072** 個になっていてFPGAに載らない
 - 対象デバイスには **6480** 個しかDFFがない
- コアで使っているDFFは多く見積もっても 32bit幅のものが100個分程度 = DFF 3200個くらい
 - レジスタファイル (32bit * 40) やパイプラインレジスタ
- ではどこでDFFを使っているのか？

FPGA向けHDLでのメモリの表現

- FPGA向けの合成系では、メモリ (SRAM) を表現する方法が大きく分けて2つある
 1. FPGAのメモリ・プリミティブを直接インスタンス化する
 2. 合成系のRAM推論規則に従ったHDLを記述する
- ChiselでFPGA向けのデザインを記述する場合は、一般的には **2** の方法を用いる
 - 規則は合成系によって微妙に異なるが大枠は一緒

そもそもRAMとは

- 指定したアドレスに対してワード単位での読み書きが可能な記憶素子
- 記憶素子の構造などによりいくつかの種類がある
 - e.g. Static RAM (SRAM), Dynamic RAM (DRAM)

RAMに専用素子が必要な理由

- 一番単純な構造
- アドレスから入出力を選択するマルチプレクサが巨大な回路になる
 - 回路規模の増大
 - 遅延の増加による動作周波数低下
- アドレスから行・列をそれぞれ選択するように分割
- 回路をFPGAの論理素子で構成すると多量の素子を消費する
- SRAMを1つの大きいブロック(ハードマクロ)として実装して利用する

SRAMの使い方 (読み出し)

1. CE (Chip Enable) 信号をアサートする
2. ホストがアドレス線にアドレスを出力する
3. データ出力線にアドレスに対応するセルのデータが出力される
4. CE 信号をデアサートする

SRAMの使い方 (書き込み)

1. CE (Chip Enable) 信号をアサートする
2. ホストがアドレス線にアドレスを出力する
3. ホストがデータ入力線にデータを出力する
4. WE (Write Enable) 信号をアサートする
5. WE 信号をデアサートする
6. CE 信号をデアサートする

GOWIN合成系におけるRAM推論規則 (1/2)

- 前述のSRAMの使い方に対応する処理を記述すると、対応するレジスタをSRAMのワードアクセスに推論する
- GOWINの合成系 (GowinSynthesis) のユーザーガイド (SUG550) に記載

GOWIN合成系におけるRAM推論規則 (2/2)

- 8bit x 1024 (1[kiB]) のRAM記述の例

```
logic [9:0] address;      // アドレス
logic [7:0] mem[0:1023]; // メモリ本体
logic ce;                 // Chip Enable
logic we;                 // Write Enable
logic [7:0] data_in;      // データ入力
logic [7:0] data_out;     // データ出力
always_ff @(posedge clock) begin
    if(reset) begin
        data_out <= 0;
    end
    else begin
        if( ce ) begin
            data_out <= mem[addr];
            if( we ) begin
                mem[addr] <= data_in;
            end
        end
    end
end
end
```

推論規則による推論に失敗した場合

- 前述のHDLの記述の通り、そのままメモリのセルがすべてDFFに展開される
 - 1[kiB]のメモリなら、 8192個のDFFとアドレス選択回路になる
- さきほどのエラボレーション結果で意図せぬ個数のDFFがでたのはこのため
 - 16[kiB] = 131072個のDFF
 - The number(131072) of DFF in the design exceeds the resource limit(6480) of current device(GW1NR-LV9QN88PC6/I5)
 - エラーメッセージの内容と一致

ソースコード

```
// Memory.scala 26行目  
val mem = Mem(16384, UInt(8.W))
```

→ なぜ推論されなかったのか？

Chiselの Mem 型

- "A combinational/asynchronous-read, sequential/synchronous-write memory."
 - <https://www.chisel-lang.org/api/latest/chisel3/Mem.html>
- 非同期読み出し・同期書き込みメモリ
 - c.f. FPGAのSRAMは同期読み出し・同期書き込み
- 等価回路は下記の通り
 - `data_out` がレジスタになっておらず、推論規則と異なる回路

```
logic [9:0] address;      // アドレス
logic [7:0] mem[0:1023]; // メモリ本体
logic ce;                // Chip Enable
logic we;                // Write Enable
logic [7:0] data_in;     // データ入力
logic [7:0] data_out;    // データ出力
assign data_out = mem[address]; // 同一サイクル出力
always_ff @(posedge clock) begin
  if(!reset) begin
    if( ce & we ) begin
      mem[addr] <= data_in;
    end
  end
end
```

Chiselの `SyncReadMem` 型

- "A sequential/synchronous-read, sequential/synchronous-write memory."
 - <https://www.chisel-lang.org/api/latest/chisel3/SyncReadMem.html>
- 同期読み出し・同期書き込みメモリ
- こっちを使えばいいそう？

SyncReadMem に変更してみる

- 変更

ソースコード

```
val mem = SyncReadMem(16384, UInt(8.W))
```

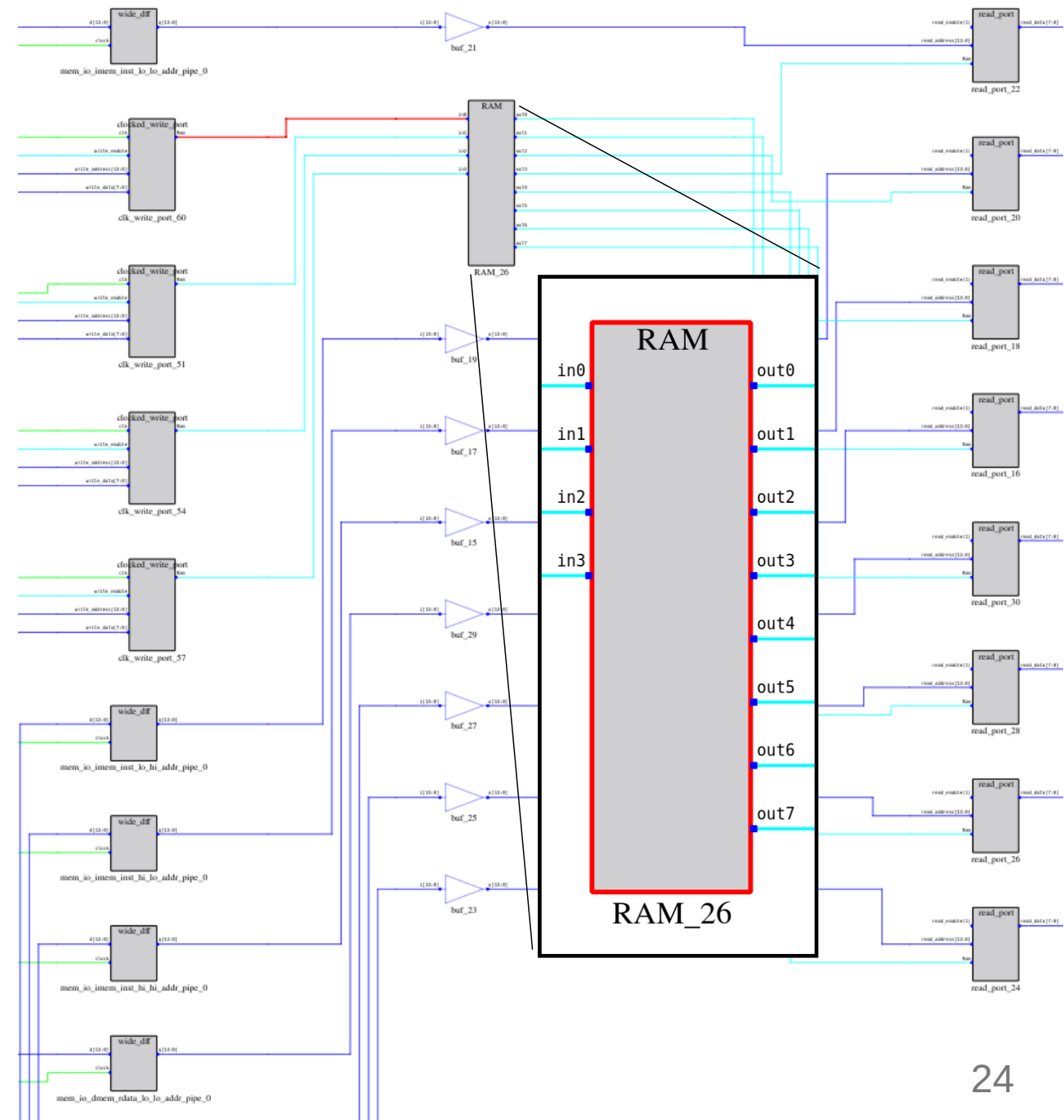
- 結果

```
ERROR (RP0001) : The number(131072) of DFF in the design exceeds the resource limit(6480) of current device(GW1NR-LV9QN88PC6/I5)  
ERROR (IF0003) : Cannot infer "mem" due to multiple write clocks("/home/kenta/repos/seccamp_2022_y4_riscv/fpga_impl/rtl/comproc_cpu_board/riscv.v":1039)
```

- エラーメッセージに変化なし
- そもそも2行目に `Cannot infer "mem" due to multiple write clocks` とある
- ということか？

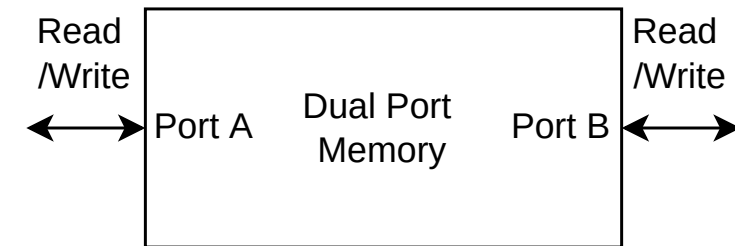
Schematic Viewerで確認

- Gowin EDAのプロジェクトを作成して、エラボレーション結果のVerilog HDLを追加
- Tool -> Schematic Viewer から **Schematic Viewer** で回路を表示
- RAMに対して書き込み4ポート、読み出し8ポート存在する



FPGAの内蔵SRAMのポート数

- FPGA内蔵のSRAMは、大体のデバイスで最大2つまでのポートを使用可能
 - 所謂Dual Port Memory
- FPGAに実装するには一つのSRAMあたりポート数を2つまでに減らす必要がある



ポート数が増えている原因

- 32bit読み書きのために8bit幅で4回ずつ読み書きしている
 - 命令読み出し、データ読み書き

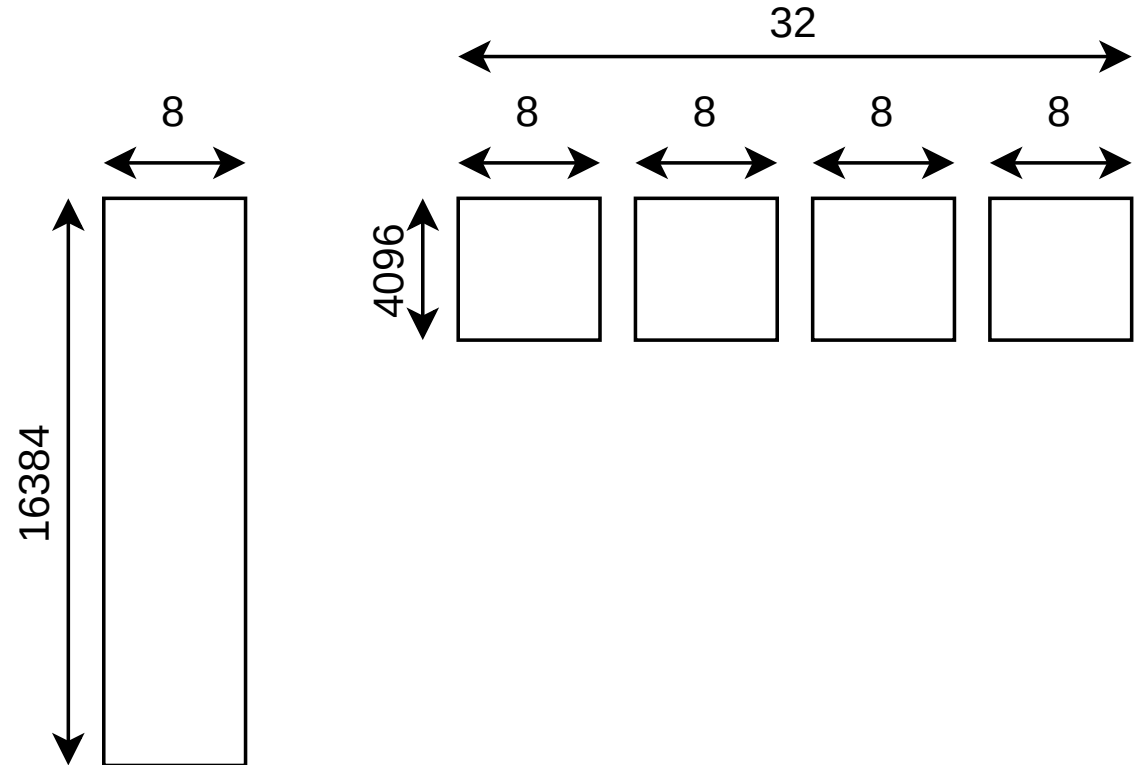
ソースコード

```
val mem = SyncReadMem(16384, UInt(8.W))
loadMemoryFromFile(mem, "src/hex/hazard_ex.hex")
io.imem.inst := Cat(
  mem(io.imem.addr + 3.U(WORD_LEN.W)), // Read 0
  mem(io.imem.addr + 2.U(WORD_LEN.W)), // Read 1
  mem(io.imem.addr + 1.U(WORD_LEN.W)), // Read 2
  mem(io.imem.addr)                    // Read 3
)
io.dmem.rdata := Cat(
  mem(io.dmem.addr + 3.U(WORD_LEN.W)), // Read 4
  mem(io.dmem.addr + 2.U(WORD_LEN.W)), // Read 5
  mem(io.dmem.addr + 1.U(WORD_LEN.W)), // Read 6
  mem(io.dmem.addr)                    // Read 7
)

when(io.dmem.wen){
  mem(io.dmem.addr)           := io.dmem.wdata( 7, 0) // Write 0
  mem(io.dmem.addr + 1.U(WORD_LEN.W)) := io.dmem.wdata(15, 8) // Write 1
  mem(io.dmem.addr + 2.U(WORD_LEN.W)) := io.dmem.wdata(23, 16) // Write 2
  mem(io.dmem.addr + 3.U(WORD_LEN.W)) := io.dmem.wdata(31, 24) // Write 3
}
```

ポート数を増やす(1/3)

- ポート数が足りないのであれば、SRAMの割り当て方を変えればよい
 - e.g. 複数SRAMを並べる
- 今回の場合は1度に32bitアクセスしたいので、8bitごとに4つにわけて並べる



ポート数を増やす(2/3)

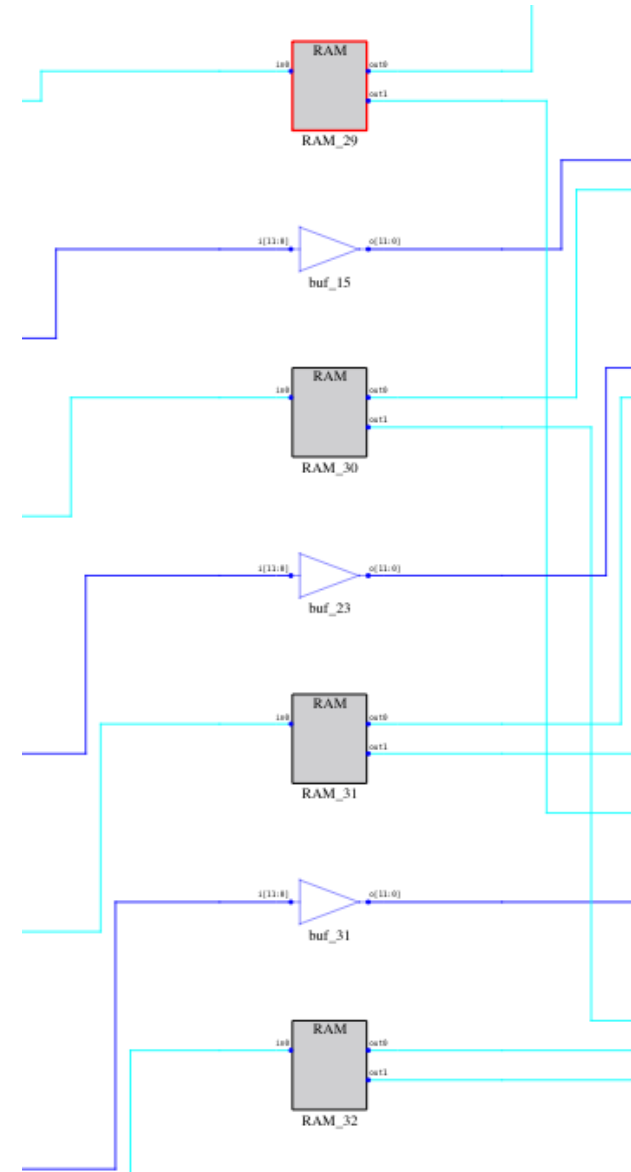
- Chiselでは、 `Vec` 型を使った配列型をメモリの要素型とすれば対応可能

ソースコード

```
// 要素型を8bit幅x4つの配列にし、メモリの長さを1/4に変更
val mem = SyncReadMem(16384/4, Vec(4, UInt(8.W)))
loadMemoryFromFile(mem, "src/hex/hazard_ex.hex")
io.imem.inst := Cat(
  mem.read(io.imem.addr >> 2).reverse, // アドレスをワード単位に変換。長さ4のVecが返ってくるのでreverseで逆順にしてCatで結合
)
io.dmem.rdata := Cat(
  mem.read(io.dmem.addr >> 2).reverse,
)
when(io.dmem.wen){
  // wdataを8bit単位に切り分けて逆順に並べなおしたものを書き込む
  mem.write(io.dmem.addr >> 2, VecInit((0 to 3).map(i => io.dmem.wdata(8*(i+1)-1, 8*i)).reverse))
}
```

ポート数を増やす(3/3)

- Schematic Viewerで効果を確認
 - RAMが4つになり、それぞれ読み書き2ポートまでに抑えられている
- 合成して効果を確認
 - 論理合成・配置配線が成功する



シミュレーション確認(1/4)

- `riscv-tests` のテストを実行
- 全テスト失敗する
- 原因は、`loadMemoryFromFile` が `Vec[UInt]` 型を要素とする `Mem` に対応していないこと
 - `loadMemoryFromFile` だとエラーにならず分かりずらいが
`loadMemoryFromFileInline` だと以下のエラーが出る

```
[info] Cause: java.lang.RuntimeException: [module Memory] Cannot initialize memory mem of non ground type UInt<8>[4]
```

シミュレーション確認(2/4)

- 対策として、`SyncReadMem` の型を `Vec[UInt]` にするのではなく、`SyncReadMem` を複数用意する
- `loadMemoryFromFile` の入力データもバイト単位で分割しておく
 - 分割後のファイル名を取得するためのlambdaを渡しておく

ソースコード

```
val mems = (0 to 3).map(_ => Mem(16384/4, UInt(8.W)))
if( memoryPath.isDefined ) {
  val memoryPath_ = memoryPath.get
  for(i <- 0 to 3) {
    loadMemoryFromFileInline(mems(i), memoryPath_(i))
  }
}
val imemWordAddr = (io.imem.addr - baseAddress) >> 2
val dmemWordAddr = (io.dmem.addr - baseAddress) >> 2
io.imem.inst := Cat(
  (0 to 3).map(i => mems(i).read(imemWordAddr)).reverse
)
io.dmem.rdata := Cat(
  (0 to 3).map(i => mems(i).read(dmemWordAddr)).reverse
)
when(io.dmem.wen){
  for(i <- 0 to 3) {
    mems(i).write((io.dmem.addr - baseAddress) >> 2, io.dmem.wdata(8*(i+1)-1, 8*i))
  }
}
```

シミュレーション確認(3/4)

- Mem を使った場合
 - 未実装の命令 LB LBU LH LHU のテスト以外は成功

```
[info] RiscvTest:
[info] RiscV
[info] - must runs rv32ui-p-add
(省略)
[info] - must runs rv32ui-p-lb *** FAILED ***
[info]   io_success=false (0, 0x0) did not equal expected=true (1, 0x1) (lines in riscv-test.scala: 61) (riscv-test.scala:66)
[info] - must runs rv32ui-p-lbu *** FAILED ***
[info]   io_success=false (0, 0x0) did not equal expected=true (1, 0x1) (lines in riscv-test.scala: 61) (riscv-test.scala:66)
[info] - must runs rv32ui-p-lh *** FAILED ***
[info]   io_success=false (0, 0x0) did not equal expected=true (1, 0x1) (lines in riscv-test.scala: 61) (riscv-test.scala:66)
[info] - must runs rv32ui-p-lhu *** FAILED ***
[info]   io_success=false (0, 0x0) did not equal expected=true (1, 0x1) (lines in riscv-test.scala: 61) (riscv-test.scala:66)
(省略)
[info] Run completed in 38 seconds, 449 milliseconds.
[info] Total number of tests run: 38
[info] Suites: completed 1, aborted 0
[info] Tests: succeeded 32, failed 6, canceled 0, ignored 0, pending 0
[info] *** 6 TESTS FAILED ***
```


シミュレーション確認(4/4)

- SyncReadMem を使った場合
 - ほとんどのテストが失敗
 - なにがおきているのか？

```
[info] RiscvTest:  
[info] RiscV  
[info] - must runs rv32ui-p-add *** FAILED ***  
[info]   io_success=false (0, 0x0) did not equal expected=true (1, 0x1) (lines in riscv-test.scala: 61) (riscv-test.scala:66)  
[info] - must runs rv32ui-p-addi *** FAILED ***  
[info]   io_success=false (0, 0x0) did not equal expected=true (1, 0x1) (lines in riscv-test.scala: 61) (riscv-test.scala:66)  
[info] - must runs rv32ui-p-and *** FAILED ***  
[info]   io_success=false (0, 0x0) did not equal expected=true (1, 0x1) (lines in riscv-test.scala: 61) (riscv-test.scala:66)  
[info] - must runs rv32ui-p-andi *** FAILED ***  
[info]   io_success=false (0, 0x0) did not equal expected=true (1, 0x1) (lines in riscv-test.scala: 61) (riscv-test.scala:66)  
(省略)  
[info] Run completed in 29 seconds, 136 milliseconds.  
[info] Total number of tests run: 38  
[info] Suites: completed 1, aborted 0  
[info] Tests: succeeded 5, failed 33, canceled 0, ignored 0, pending 0  
[info] *** 33 TESTS FAILED ***
```

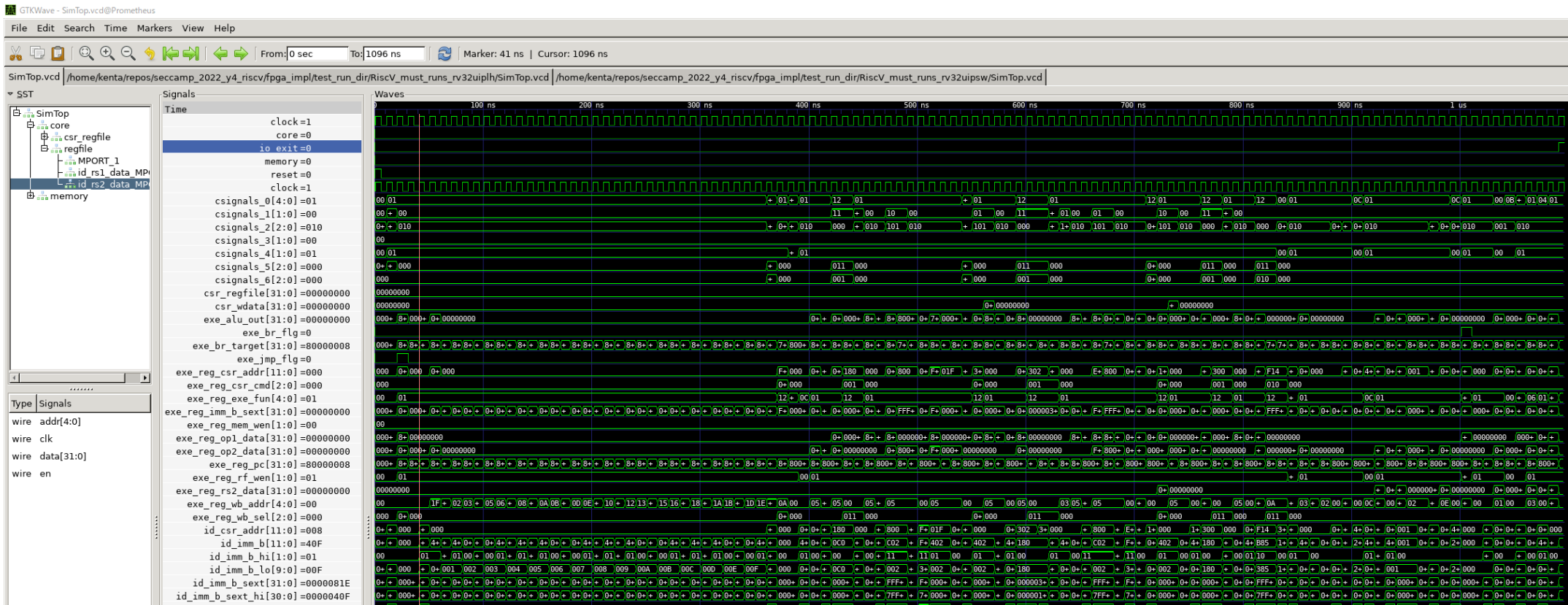
シミュレーション波形の確認(1/3)

- 書籍では `printf` を使ったデバッグ方法のみ紹介
- 一般的なFPGA開発では各信号の時系列変化も確認する
- シミュレーション時に各信号の時系列変化を出力して確認する
- ChiselTestではシミュレーション時に `-DwriteVcd=1` を指定すると時系列変化が出力される

```
sbt:riscv_chisel_book> testOnly cpu.RiscvTest -- -DwriteVcd=1
```

シミュレーション波形の確認(2/3)

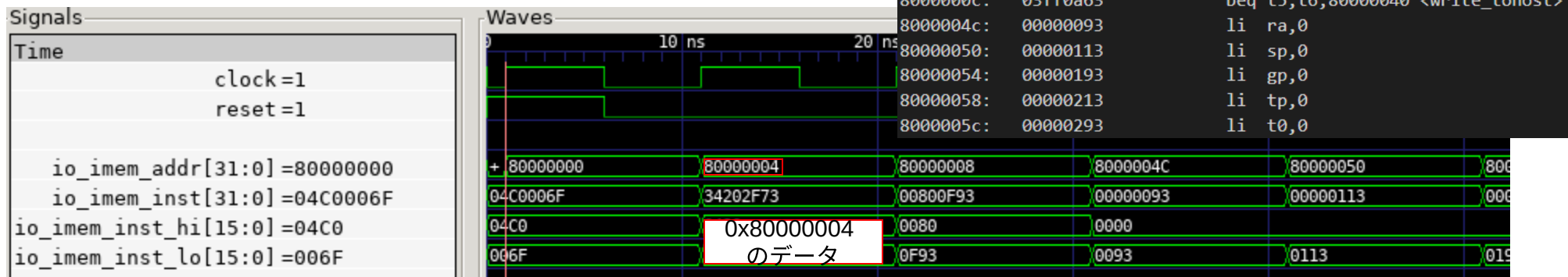
- 出力された波形ファイル (*.vcd) を **gtkwave** で確認する



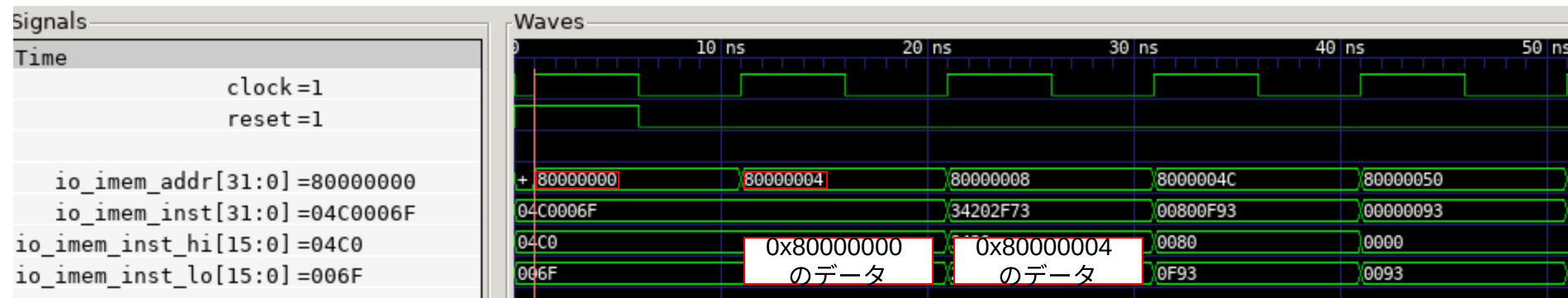
シミュレーション波形の確認(3/3)

- SyncReadMem だとデータ出力が1サイクル遅延
 - 分岐時に1つ古い命令を実行してしまう → 対策が必要

Memを使った場合: io_imem_addrを出して同一サイクルでデータが出力されている



SyncReadMemを使った場合: io_imem_addrを出した次のサイクルでデータが出力されている



対策の方法 - パイプラインのストール(1/5)

- CPUのパイプライン化のときに行ったのと同様に、読み出したいアドレスのデータが準備できていないときにストールさせる
- **データが準備できていないとき** の条件
 - リセット直後 → 1サイクル遅延するのでまだデータを読めていない
 - 分岐直後 → 分岐先アドレスのデータを読めていない

対策の方法 - パイプラインのストール(2/5)

- メモリ・インターフェース (`IMemPortIo`) の変更
- データが準備できているかどうかを表す信号 `valid` を追加する

ソースコード

```
class ImemPortIo extends Bundle {  
  val addr = Input(UInt(WORD_LEN.W))  
  val inst = Output(UInt(WORD_LEN.W))  
  val valid = Output(Bool())           // 追加  
}
```

対策の方法 - パイプラインのストール(3/5)

- メモリ側の変更

ソースコード

```
val imemWordAddrBits = io.imem.addr.getWidth - 2
val imemWordAddr = (io.imem.addr - baseAddress) >> 2
val imemWordAddrFetched = Reg(UInt(imemWordAddrBits.W)) // フェッチ済みのアドレス
val isFirstCycle = RegInit(true.B) // リセット直後かどうか?
isFirstCycle := false.B
// リセット直後でなく、対象アドレスがフェッチ済みならデータ有効
io.imem.valid := !isFirstCycle && imemWordAddrFetched === imemWordAddr
imemWordAddrFetched := imemWordAddr
io.imem.inst := Cat(
  (0 to 3).map(i => mems(i).read(imemWordAddr)).reverse
)
```

対策の方法 - パイプラインのストール(4/5)

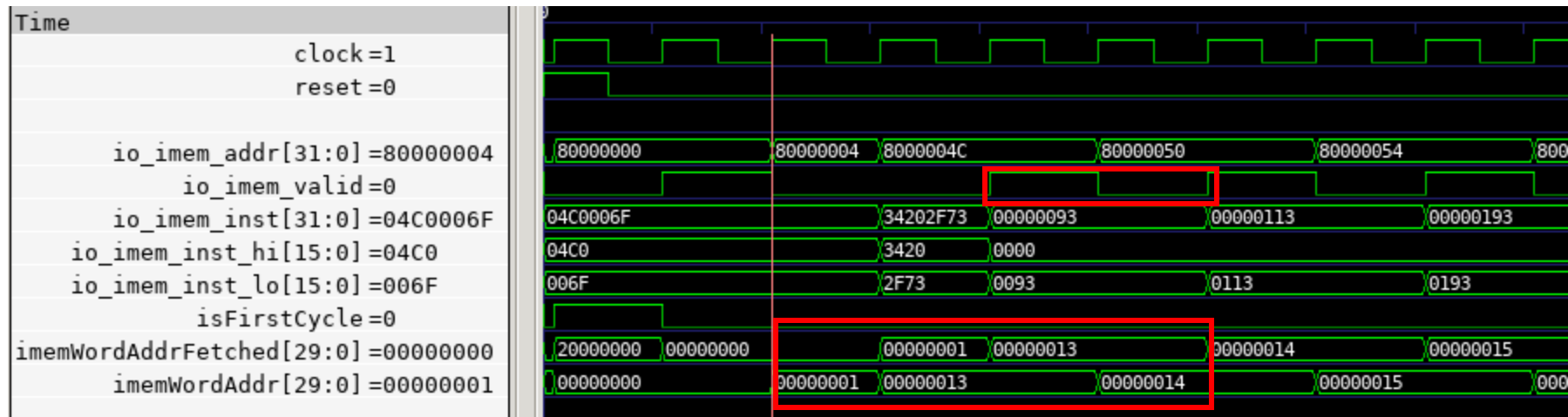
- コア側の変更
 - 命令が無効なら `BUBBLE` に置き換えておく
 - ストールの条件に `!io.imem.valid` を追加

ソースコード

```
val if_inst = Mux(io.imem.valid, io.imem.inst, BUBBLE) // 命令が無効ならBUBBLEにする
// ...
val if_pc_next = MuxCase(if_pc_plus4, Seq(
  // 優先順位重要！ジャンプ成立とストールが同時発生した場合、ジャンプ処理を優先
  exe_br_flg      -> exe_br_target,
  exe_jmp_flg     -> exe_alu_out,
  (if_inst === ECALL) -> csr_regfile(0x305), // go to trap_vector
  (stall_flg || !io.imem.valid) -> if_reg_pc, // stall
))
if_reg_pc := if_pc_next
```


対策の方法 - パイプラインのストール(5/5)

- シミュレーション結果
 - メモリアクセス系のテスト以外はパスする
 - 但し、CPUの動作速度が半分に低下



演習1 - 命令実行速度の低下抑制

- 命令メモリの読み出し対策を入れて動作速度(IPC)が半分に低下
 - さすがに性能的に許容できない
- 分岐時以外に動作速度が低下しない(ほぼ1サイクルに1回、命令フェッチを行える)ようにCPUのロジックを変更
 - 非同期メモリに戻す方法以外のみ許可
- メモリアクセス系以外のテストが通ることを確認すること
 - LB, LBU, LH, LW, SB, SBU, SH, SW のテストは除外

データバスアクセス時のストール実装 (1/6)

- 命令メモリと同様にデータバスアクセスのストールも実装する
- データバスのアクセスは読み出しデータ有効信号 `rvalid` だけでなく、読み出しを実行するかどうかの信号 `ren` を追加する
 - データバスからのメモリアクセスは毎サイクル行うわけではない

ソースコード

```
class DmemPortIo extends Bundle {  
  val addr  = Input(UInt(WORD_LEN.W))  
  val rdata = Output(UInt(WORD_LEN.W))  
  val ren   = Input(Bool())           // 追加  
  val rvalid = Output(Bool())         // 追加  
  val wen    = Input(Bool())  
  val wdata  = Input(UInt(WORD_LEN.W))  
}
```

データバスアクセス時のストール実装 (2/6)

- メモリ側の変更
 - `rdata` の内容は 1サイクル後に `addr` の番地の内容になる
 - `ren` がアサートされた次のサイクルで `rvalid` をアサート
- ソースコード

```
val dmemWordAddr = (io.dmem.addr - baseAddress) >> 2
val rvalid = RegInit(false.B)
val rdata = Cat(
  (0 to 3).map(i => mems(i).read(dmemWordAddr)).reverse
) // `rdata` の内容は次のサイクルでdmemWordAddr番地の内容になる
io.dmem.rvalid := rvalid
io.dmem.rdata := rdata
rvalid := false.B
val dmemAddrReg = Reg(UInt(io.dmem.addr.getWidth.W)) // デバッグ用
when( io.dmem.ren && !io.dmem.wen && !rvalid ) {
  rvalid := true.B // 次のサイクルでrvalidをアサート
  dmemAddrReg := io.dmem.addr
}
when( rvalid ) {
  printf(p"Data read address=0x${Hexadecimal(dmemAddrReg)} data=0x${Hexadecimal(rdata)}\n")
}
```

データバスアクセス時のストール実装 (3/6)

- コア側の変更 (IF, ID ステージ) [ソースコード](#)

```
val mem_stall_flg = Wire(Bool()) // データバス要因のストール
// (省略)
stall_flg := (id_rs1_data_hazard || id_rs2_data_hazard || mem_stall_flg) // データバス要因のストールも全体のストール要因に追加
// (省略)
// MEMステージがストールしていない場合のみEXEのパイプラインレジスタを更新する。
when( !mem_stall_flg ) {
  exe_reg_pc      := id_reg_pc
  // (省略)
  exe_reg_mem_wen := id_mem_wen
}
```

データバスアクセス時のストール実装 (4/6)

- コア側の変更 (EXステージ) ソースコード

```
// MEMステージがストールしていない場合のみMEMのパイプラインレジスタを更新する。
when( !mem_stall_flg ) {
    mem_reg_pc      := exe_reg_pc
    // (省略)
    mem_reg_mem_wen := exe_reg_mem_wen
}
```

データバスアクセス時のストール実装 (5/6)

- コア側の変更 (MEMステージ) ソースコード

```
//*****  
// Memory Access Stage  
io.dmem.addr := mem_reg_alu_out  
io.dmem.ren  := mem_reg_wb_sel == WB_MEM // ロード命令ならrenをアサート  
io.dmem.wen  := mem_reg_mem_wen  
io.dmem.wdata := mem_reg_rs2_data  
// WBでデータバスの内容が必要だが、データバスのデータが有効でないならストール  
mem_stall_flg := io.dmem.ren && !io.dmem.rvalid
```

- コア側の変更 (WBステージ) ソースコード

```
//*****  
// MEM/WB regster  
wb_reg_wb_addr := mem_reg_wb_addr  
wb_reg_rf_wen  := Mux(!mem_stall_flg, mem_reg_rf_wen, REN_X) // ストールしてなければライトバックする  
wb_reg_wb_data := mem_wb_data
```

データバスアクセス時のストール実装 (6/6)

- 再度 `riscv-tests` のシミュレーションを実行
- `LW` `SW` のテストが通ることを確認

```
[info] RiscvTest:
[info] RiscV
[info] - must runs rv32ui-p-add
(省略)
[info] - must runs rv32ui-p-lb *** FAILED ***
[info]   io_success=false (0, 0x0) did not equal expected=true (1, 0x1) (lines in riscv-test.scala: 61) (riscv-test.scala:66)
[info] - must runs rv32ui-p-lbu *** FAILED ***
[info]   io_success=false (0, 0x0) did not equal expected=true (1, 0x1) (lines in riscv-test.scala: 61) (riscv-test.scala:66)
[info] - must runs rv32ui-p-lh *** FAILED ***
[info]   io_success=false (0, 0x0) did not equal expected=true (1, 0x1) (lines in riscv-test.scala: 61) (riscv-test.scala:66)
[info] - must runs rv32ui-p-lhu *** FAILED ***
[info]   io_success=false (0, 0x0) did not equal expected=true (1, 0x1) (lines in riscv-test.scala: 61) (riscv-test.scala:66)
[info] - must runs rv32ui-p-lui
[info] - must runs rv32ui-p-lw
(省略)
[info] - must runs rv32ui-p-sb *** FAILED ***
[info]   io_success=false (0, 0x0) did not equal expected=true (1, 0x1) (lines in riscv-test.scala: 61) (riscv-test.scala:66)
[info] - must runs rv32ui-p-sh *** FAILED ***
[info]   io_success=false (0, 0x0) did not equal expected=true (1, 0x1) (lines in riscv-test.scala: 61) (riscv-test.scala:66)
[info] - must runs rv32ui-p-simple
(省略)
[info] - must runs rv32ui-p-sw
(省略)i
[info] Run completed in 47 seconds, 965 milliseconds.
[info] Total number of tests run: 38
[info] Suites: completed 1, aborted 0
[info] Tests: succeeded 32, failed 6, canceled 0, ignored 0, pending 0
[info] *** 6 TESTS FAILED ***
```


未実装ロード・ストア命令の実装 (1/7)

- バイト単位・ハーフワード単位のロード・ストア命令を実装する
 - アセンブリ言語でプログラムを書くなれば実装しないのも手だが、Cで書くなれば実装しておくのが無難

ニーモニック	処理内容
LB	<code>rs <- sext([rs1 + imm][7:0])</code>
LH	<code>rs <- sext([rs1 + imm][15:0])</code>
LBU	<code>rs <- zext([rs1 + imm][7:0])</code>
LHU	<code>rs <- zext([rs1 + imm][15:0])</code>
SB	<code>byte[rd + imm] <- rs1[7:0]</code>
SH	<code>halfword[rd + imm] <- rs1[15:0]</code>

未実装ロード・ストア命令の実装 (2/7)

- 命令デコーダの改修
 - 新たにメモリアクセス単位の情報を表す信号を追加
- ソースコード

```
val csignals = ListLookup(id_inst,
    List(ALU_X      , OP1_RS1, OP2_RS2, MEN_X, REN_X, WB_X  , CSR_X, MW_X),
    Array(
        LB    -> List(ALU_ADD , OP1_RS1, OP2_IMI, MEN_X, REN_S, WB_MEM, CSR_X, MW_B), // MW_B: バイト (符号付き)
        LBU   -> List(ALU_ADD , OP1_RS1, OP2_IMI, MEN_X, REN_S, WB_MEM, CSR_X, MW_BU), // MW_BU: バイト (符号なし)
        SB    -> List(ALU_ADD , OP1_RS1, OP2_IMS, MEN_S, REN_X, WB_X  , CSR_X, MW_B),
        LH    -> List(ALU_ADD , OP1_RS1, OP2_IMI, MEN_X, REN_S, WB_MEM, CSR_X, MW_H), // MW_H: ハーフワード (符号付き)
        LHU   -> List(ALU_ADD , OP1_RS1, OP2_IMI, MEN_X, REN_S, WB_MEM, CSR_X, MW_HU), // MW_HU: ハーフワード (符号なし)
        SH    -> List(ALU_ADD , OP1_RS1, OP2_IMS, MEN_S, REN_X, WB_X  , CSR_X, MW_H),
        LW    -> List(ALU_ADD , OP1_RS1, OP2_IMI, MEN_X, REN_S, WB_MEM, CSR_X, MW_W), // MW_W: ワード
        SW    -> List(ALU_ADD , OP1_RS1, OP2_IMS, MEN_S, REN_X, WB_X  , CSR_X, MW_W),
        ADD   -> List(ALU_ADD , OP1_RS1, OP2_RS2, MEN_X, REN_S, WB_ALU, CSR_X, MW_X), // MW_X: 不使用
        // (省略)
    ))
```

未実装ロード・ストア命令の実装 (3/7)

- パイプラインレジスタの追加
- アクセス単位を後段のステージに伝搬
- ソースコード

```
//*****  
// ID/EX register  
// MEMステージがストールしていない場合のみEXEのパイプラインレジスタを更新する。  
when( !mem_stall_flg ) {  
    exe_reg_pc          := id_reg_pc  
    // 省略  
    exe_reg_mem_w       := id_mem_w  
}
```

未実装ロード・ストア命令の実装 (4/7)

- アクセス単位を後段のステージに伝搬
- 書き込み時のストローブ信号を生成
 - 書き込み対象のバイト位置に対するマスク信号
- ソースコード

```
//*****
// EX/MEM register
// MEMステージがストールしていない場合のみMEMのパイプラインレジスタを更新する。
when( !mem_stall_flg ) {
    mem_reg_pc      := exe_reg_pc
    // 省略
    mem_reg_mem_w    := exe_reg_mem_w
    mem_reg_mem_wstrb := (MuxCase("b1111".U, Seq( // メモリアクセス単位からストローブ信号を生成
        (exe_reg_mem_w === MW_B) -> "b0001".U,
        (exe_reg_mem_w === MW_H) -> "b0011".U,
        (exe_reg_mem_w === MW_W) -> "b1111".U,
    )) << (exe_alu_out(1, 0)))(3, 0)
}
```

未実装ロード・ストア命令の実装 (5/7)

- データバスにバイトストローブ信号を出力
- 書き込みデータをアドレスのバイトオフセット分ずらす
- ソースコード

```
io.dmem.wstrb := mem_reg_mem_wstrb  
io.dmem.wdata := (mem_reg_rs2_data << (8.U * mem_reg_alu_out(1, 0)))(WORD_LEN-1, 0) // バイトアドレスでデータをシフト
```

未実装ロード・ストア命令の実装 (6/7)

- 読み出したデータをアドレスのバイトオフセット分ずらす
- アクセス単位にしたがってバイト単位でのマスクと符号拡張
- ソースコード

```
// ロードしたデータのバイト位置合わせと符号拡張
def signExtend(value: UInt, w: Int) = { // 符号つきで符号拡張する
  Fill(WORD_LEN - w, value(w - 1)) ## value(w - 1, 0)
}
def zeroExtend(value: UInt, w: Int) = { // 符号なしで符号拡張する
  Fill(WORD_LEN - w, 0.U) ## value(w - 1, 0)
}
}

val mem_wb_byte_offset = mem_reg_alu_out(1, 0) // アドレスの下位2ビットを抽出
val mem_wb_rdata = io.dmem.rdata >> (8.U * mem_wb_byte_offset) // バイトオフセット分読み出しデータを右にずらす
val mem_wb_data_load = MuxCase(mem_wb_rdata, Seq(
  (mem_reg_mem_w === MW_B) -> signExtend(mem_wb_rdata, 8), // 符号付きバイト・ロード
  (mem_reg_mem_w === MW_H) -> signExtend(mem_wb_rdata, 16), // 符号付きハーフワード・ロード
  (mem_reg_mem_w === MW_BU) -> zeroExtend(mem_wb_rdata, 8), // 符号無しバイト・ロード
  (mem_reg_mem_w === MW_HU) -> zeroExtend(mem_wb_rdata, 16), // 符号無しハーフワード・ロード
))

mem_wb_data := MuxCase(mem_reg_alu_out, Seq(
  (mem_reg_wb_sel === WB_MEM) -> mem_wb_data_load,
  (mem_reg_wb_sel === WB_PC) -> (mem_reg_pc + 4.U(WORD_LEN.W)),
  (mem_reg_wb_sel === WB_CSR) -> csr_rdata
))
```

未実装ロード・ストア命令の実装 (7/7)

- 全テストがパスするようになった

```
...  
[info] - must runs rv32ui-p-lb  
[info] - must runs rv32ui-p-lbu  
[info] - must runs rv32ui-p-lh  
[info] - must runs rv32ui-p-lhu  
[info] - must runs rv32ui-p-lui  
[info] - must runs rv32ui-p-lw  
  
...  
[info] - must runs rv32ui-p-sb  
[info] - must runs rv32ui-p-sh  
  
...  
[info] - must runs rv32ui-p-sw  
  
...  
[info] Tests: succeeded 38, failed 0, canceled 0, ignored 0, pending 0  
[info] All tests passed.
```

FPGAでの動作確認 (1/5)

- CPU上のファームウェアを作成 ソースコード
- riscv-testsでテストをパスしたときと同じ命令列を用意
- 正常に動作すれば、テストベンチで使用しているのと同様に `success` 信号と `exit` 信号がアサートされる
 - `il a0,0` の次に `ecall` を呼んだら `success` がアサートされる

```
extern void __attribute__((naked)) __attribute__((section(".isr_vector"))) isr_vector(void)
{
    asm volatile ("j _start");
}
extern void __attribute__((naked)) __attribute__((noret)) trap_handler(void)
{
    while(true);
}
extern void __attribute__((naked)) _start(void)
{
    asm volatile (
        "la t0, trap_handler; " /* トラップベクタ初期化 */ \
        "csrw mtvec, t0; " /* */ \
        "li a0, 0; " /* success判定 */ \
        "ecall " /* トラップ */ \
    );
}
```


FPGAでの動作確認 (2/5)

- ファームウェアのビルド結果

```

00000000 <isr_vector>:
    0:    0080006f          j      8 <_start>
00000004 <trap_handler>:
    4:    0000006f          j      4 <trap_handler>
00000008 <_start>:
    8:    00000297      auipc    t0,0x0
   c:    ffc28293      addi    t0,t0,-4 # 4 <trap_handler>
  10:    30529073      csrw    mtvec,t0
  14:    00000513      li     a0,0
  18:    00000073      ecall
    
```

FPGAでの動作確認 (3/5)

- トップレベルデザインの作成 ソースコード
 - 7seg LEDにPCの下位8bitを出力
 - `io_exit` がアサートされたら CPUクロックを停止する

```
logic [31:0] io_debug_pc;
logic io_success;
logic io_exit;
assign d = io_debug_pc[9:2]; // 7seg LED
logic cpu_halt = 0;
always_ff @(posedge clock) begin
    if( reset ) begin
        cpu_halt <= 0;
    end
    else begin
        if( io_exit ) begin
            cpu_halt <= 1;
        end
    end
end
assign led = ~{3'b000, reset, io_success, io_exit};
Top core(
    .clock(clock && !cpu_halt),
    .*,
);
```

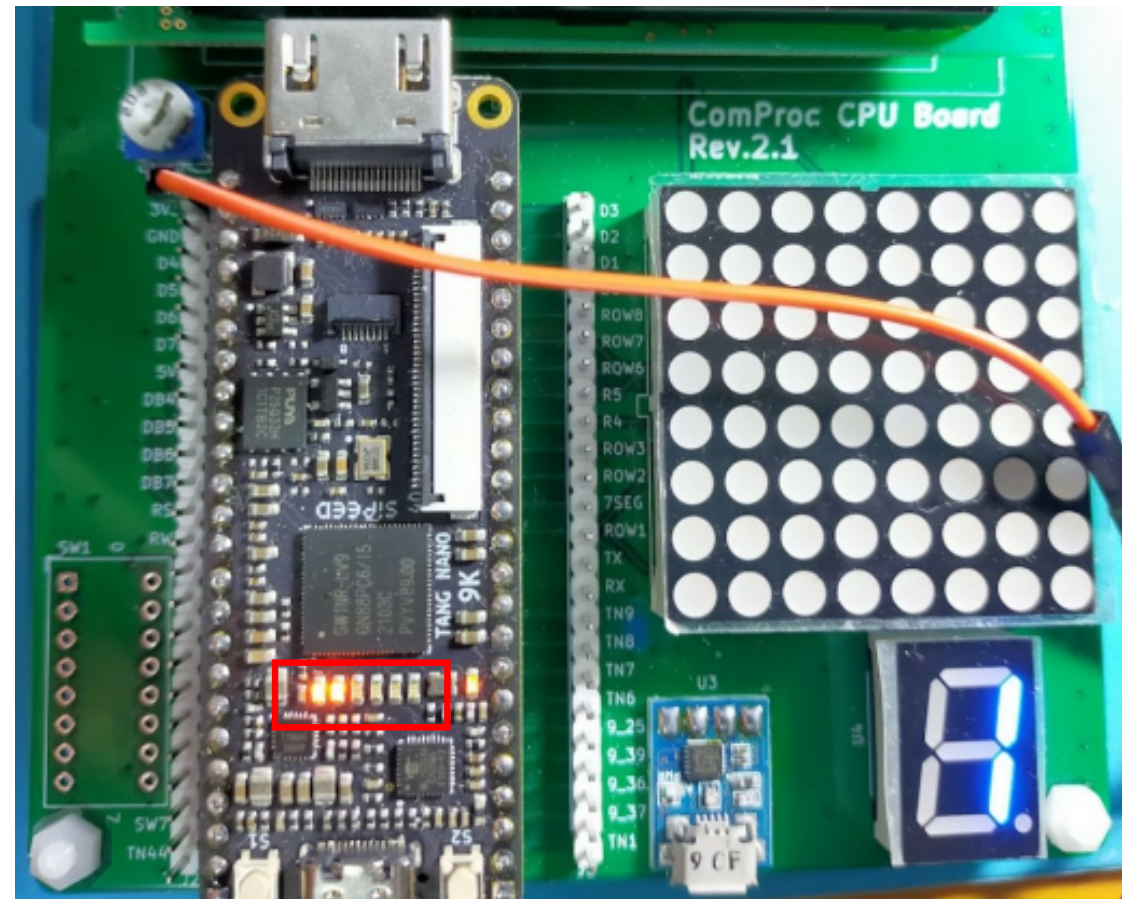
FPGAでの動作確認 (4/5)

- 合成と書き込みを行う

```
$ cd eda/cpu_riscv_chisel_book  
$ make  
$ make run
```

FPGAでの動作確認 (5/5)

- 書き込んで実行すると左から2つのLEDが点灯する



合成結果の確認

- 合成系の出力として、ビットストリーム以外に合成レポートが出力される
 - リソースの使用量
- クロックの情報を設定すると、タイミング解析結果が出力される
 - 各クロックのパスが **タイミング制約** を満たすかどうか
- 対応するファイルが出力されているので確認する

CPUと外部のI/O処理

CPUが外部と入出力する方法

1. Memory Mapped I/O
2. 拡張レジスタ
3. 拡張命令

Memory Mapped I/O (MMIO)

- データバスにつなげられるのはメモリだけではない
- データバスのインターフェースと同じであればつなげられる
 - e.g. `DMemPortIo`
- CPUのメモリ空間上に外部と入出力するためのアドレスを割り当てる
 - 入力: 対応するアドレスからの読み出し
 - 出力: 対応するアドレスへの書き込み

拡張レジスタ

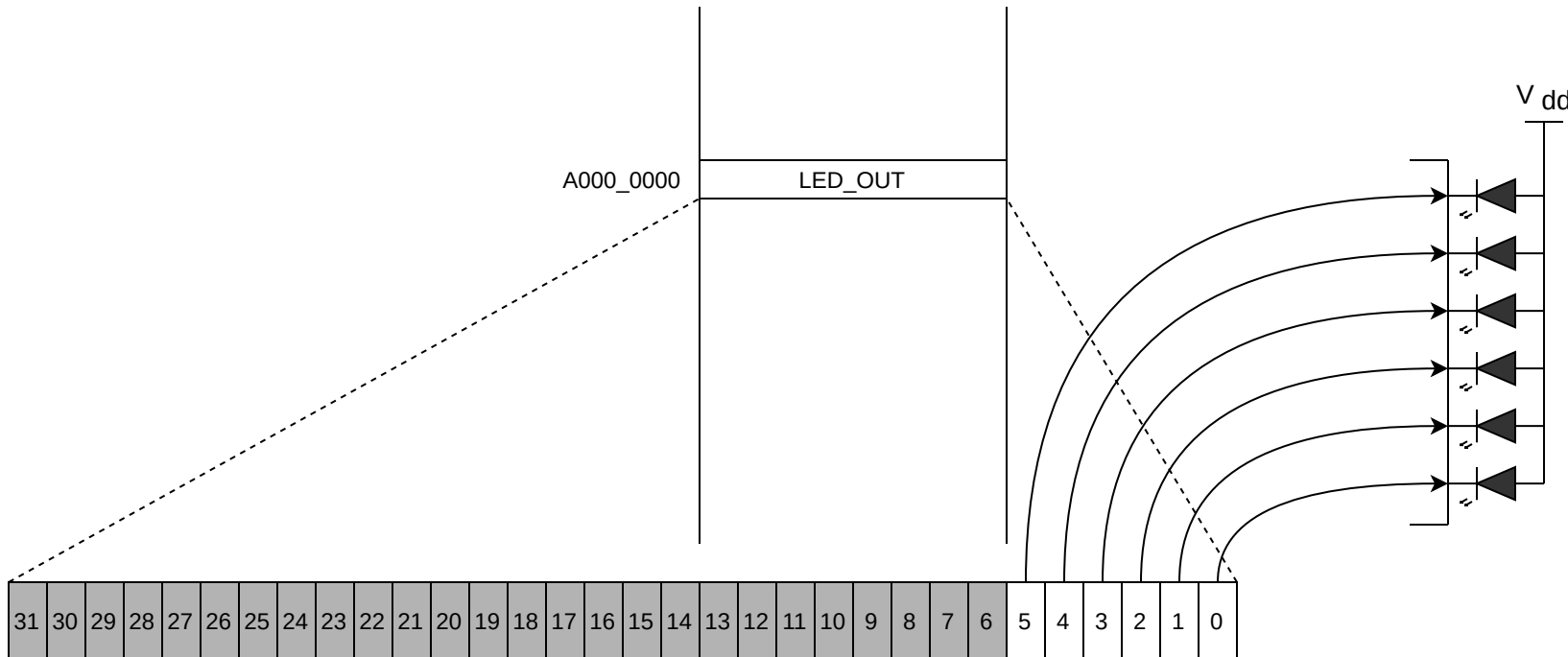
- RISC-Vには4096ワード分の **CSR (Control and Status Register)** 空間がある
- Memory Mapped I/Oと同様に、CSRの空間経由でCPU外の回路とやり取りをする

拡張命令

- RISC-Vでは、独自の命令を拡張命令として追加することができる
- CPU外と入出力を行う専用命令を実装する

GPIO(General Purpose I/O) の実装 (1/5)

- CPUからLEDの点灯・消灯できるように **GPIO** を実装する
- アドレス `32'ha000_0000` に書き込んだ内容の下位6bitをLEDへの出力とする



GPIO(General Purpose I/O) の実装 (2/5)

- 現状、CPUのデータバスには1つのターゲットしか接続できない
 - データメモリを接続済み
- アドレスを確認してアクセス先を分岐する **アドレス・デコーダ** を実装する
- ソースコード

```
// 使い方
val decoder = Module(new DMemDecoder(Seq(
  (BigInt(0x00000000L), BigInt(memSize)), // メモリ
  (BigInt(0xA0000000L), BigInt(64)),      // GPIO
)))

class DMemDecoder(targetAddressRanges: Seq[(BigInt, BigInt)]) extends Module {
  val io = IO(new Bundle {
    val initiator = new DmemPortIo() // CPU側接続ポート
    val targets = Vec(targetAddressRanges.size, Flipped(new DmemPortIo)) // ターゲット側接続ポート
  })
}
```

GPIO(General Purpose I/O) の実装 (3/5)

- ソースコード

```
val rvalid = WireDefault(true.B)
val rdata = WireDefault("xdeadbeef".U(32.W))
val wready = WireDefault(false.B)
io.initiator.rvalid := rvalid
io.initiator.rdata := rdata
// アドレス範囲のリストに対して分岐を生成する
for(((start, length), index) <- targetAddressRanges.zipWithIndex) {
  val target = io.targets(index)

  val addr = WireDefault(0.U(32.W))
  val ren = WireDefault(false.B)
  val wen = WireDefault(false.B)
  val wdata = WireDefault("xdeadbeef".U(32.W))
  val wstrb = WireDefault("b1111".U)

  target.addr := addr
  target.ren := ren
  target.wen := wen
  target.wdata := wdata
  target.wstrb := wstrb
  // アドレス範囲ならCPU側とターゲット側の信号を接続する
  when(start.U <= io.initiator.addr && io.initiator.addr < (start + length).U ) {
    addr := io.initiator.addr - start.U
    ren := io.initiator.ren
    rvalid := target.rvalid
    rdata := target.rdata
    wen := io.initiator.wen
    wdata := io.initiator.wdata
    wstrb := io.initiator.wstrb
  }
}
```

GPIO(General Purpose I/O) の実装 (4/5)

- コアとデコーダ、メモリ、GPIOを接続する ソースコード

```
val core = Module(new Core(startAddress = baseAddress.U(WORD_LEN.W)))
val decoder = Module(new DMemDecoder(Seq(
  (BigInt(0x00000000L), BigInt(memSize)), // メモリ
  (BigInt(0xA0000000L), BigInt(64)),      // GPIO
)))

val memory = Module(new Memory(Some(i => f"..sw/bootrom_${i}.hex"), baseAddress.U(WORD_LEN.W), memSize))
val gpio = Module(new Gpio)

core.io.imem <> memory.io.imem
core.io.dmem <> decoder.io.initiator // CPUにデコーダを接続
decoder.io.targets(0) <> memory.io.dmem // 0番ポートにメモリを接続
decoder.io.targets(1) <> gpio.io.mem    // 1番ポートにGPIOを接続
io.gpio_out := gpio.io.out // GPIOの出力を外部ポートに接続
```

GPIO(General Purpose I/O) の実装 (5/5)

- ファームウェアを変更してGPIOの出力を変化させる [ソースコード](#)
 - bit0~bit5を順に点灯
 - bit5点灯後はbit0に戻る
 - 更新速度調整のため 100000 回ループする
 - 最適化で削除されないように変数に `volatile` をつけておく

```
static volatile uint32_t* const REG_GPIO_OUT = (volatile uint32_t*)0xA0000000;
void __attribute__((noreturn)) main(void)
{
    uint32_t led_out = 1;
    while(1) {
        *REG_GPIO_OUT = led_out;
        led_out = (led_out << 1) | ((led_out >> 5) & 1);
        for(volatile uint32_t delay = 0; delay < 100000; delay++);
    }
}
```

拡張レジスタの実装 (1/3)

- GPIOの出力を保持するCSRを定義 [ソースコード](#)
 - RISC-VのCSRにはいくつかカスタム用の領域が定義されている
 - 今回は、M-Mode用CSRのカスタム領域の先頭 **0x7c0** を使用する

```
// CSR
val csr_rdata = MuxCase(0.U(WORD_LEN.W), Seq(
  (mem_reg_csr_addr == CSR_CUSTOM_GPIO.U) -> csr_gpio_out,
  (mem_reg_csr_addr == CSR_MTVEC.U) -> csr_trap_vector,
))
// (省略)
when(mem_reg_csr_cmd > 0.U){
  when( mem_reg_csr_addr == CSR_MTVEC.U ) {
    csr_trap_vector := csr_wdata
  } .elsewhen( mem_reg_csr_addr == CSR_CUSTOM_GPIO.U ) {
    csr_gpio_out := csr_wdata
  }
}
```


拡張レジスタの実装 (2/3)

- CSRの内容をコアの外に直接出力 ソースコード
 - MMIOのときに出力していた信号にCSRの内容を接続

```
// Core.scala
val csr_gpio_out = RegInit(0.U(WORD_LEN.W)) //
val csr_trap_vector = RegInit(0.U(WORD_LEN.W)) //
io_gpio_out := csr_gpio_out
// Top.scala
//io_gpio_out := gpio.io.out // GPIOの出力を外部ポートに接続
io_gpio_out := core.io_gpio_out // GPIO CSRの出力を外部ポートに接続
```

拡張レジスタの実装 (3/3)

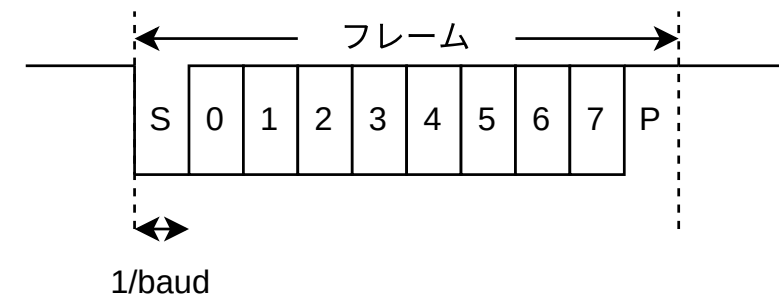
- ファームウェアでMMIOアクセス部分をCSRアクセスに置き換え
- ソースコード

```
static uint64_t write_gpio_csr(uint32_t value)
{
    asm volatile ("csrw 0x7c0, %0" :: "r" (value)); // CSR 0x7c0に書き込む
}
void __attribute__((noreturn)) main(void)
{
    uint32_t led_out = 1;
    while(1) {
        write_gpio_csr(led_out);
        led_out = (led_out << 1) | ((led_out >> 5) & 1);
        for(volatile uint32_t delay = 0; delay < 100000; delay++);
    }
}
```

UART通信機能の実装

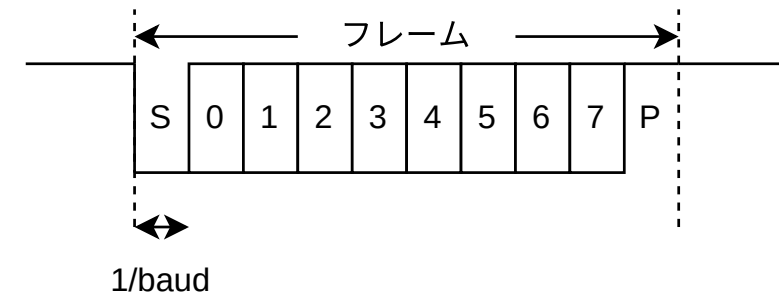
UARTとは (1/2)

- UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter)
- 調歩同期方式のシリアル通信
 - c.f. クロック同期方式
- 送信側・受信側であらかじめ取り決めた通信レート (baud rate:ボー・レート)でシンボルを送信
- いくつかのまとまったビット列を表す **フレーム** を通信単位とする
 - 現代的には大体の場合8bit単位
- フレームで表現するビット列のLSBから順に送信する



UARTとは (2/2)

- アイドル状態では高い電位 '1' の状態
- データは正論理(高い電位 = '1' 低い電位 = '0') で表現する
- フレームの始端に必ず **スタート・ビット (S)** として低い電位 '0' を付加する
- フレームの終端に必ず **ストップ・ビット (P)** として高い電位 '1' を付加する
 - ストップ・ビットで必ず '1' に戻るなので、スタート・ビットを検出できる



UART送信回路の作成

- 送信は比較的単純
- ボー・レートの間隔でスタート・ビット、データ列、ストップ・ビットを出力すればよい

特定の文字を送り続けるUART送信回路の作成 (1/2)

- **A** を送信しつづける回路 ソースコード

```
class UartTx(clockFrequency: Int, baudRate: Int) extends Module {
  val io = IO(new Bundle{
    val tx = Output(Bool())
  })
  val baudDivider = clockFrequency/baudRate // クロック周波数/ボー・レート
  val rateCounter = RegInit(0.U(log2Ceil(baudDivider).W)) // ボー・レート周期生成用カウンタ
  val bitCounter = RegInit(0.U(log2Ceil(8 + 2).W)) // 残り送信ビット数カウンタ
  val bits = Reg(Vec(8 + 2, Bool())) // 送信ビット・バッファ
  io.tx := bitCounter === 0.U || bits(0) // 送信中ならbit0を出力。それ以外は'1'を出力
  val ready = bitCounter === 0.U // ビット・カウンタ == 0なので、次の送信を開始できるか?
  when(ready) {
    bits := Cat(1.U, 0x41.U(8.W), 0.U).asBools // STOP(1), 'A', START(0)
    bitCounter := (8 + 2).U // 残送信ビット数 = 10bit (STOP + DATA + START)
    rateCounter := (baudDivider - 1).U // レートカウンタを初期化
  }
  when( bitCounter > 0.U ) {
    when(rateCounter === 0.U) { // 次のボーレート周期の送信タイミング
      (0 to 8).foreach(i => bits(i) := bits(i + 1)) // ビットバッファを右シフトする
      bitCounter := bitCounter - 1.U
      rateCounter := (baudDivider - 1).U
    } .otherwise {
      rateCounter := rateCounter - 1.U
    }
  }
}
```

特定の文字を送り続けるUART送信回路の作成 (2/2)

- 送信回路のインスタンス作成と接続 ソースコード

```
class Top extends Module {  
  val io = IO(new Bundle {  
    val debug_pc = Output(UInt(WORD_LEN.W))  
    val gpio_out = Output(UInt(32.W))  
    val uart_tx = Output(Bool())  
    val success = Output(Bool())  
    val exit = Output(Bool())  
  })  
  // ...  
  val uartTx = Module(new UartTx(27000000, 115200))  
  io.uart_tx := uartTx.io.tx  
  // ...  
}
```


特定の文字を送り続けるUART送信回路の作成 (3/4)

- SystemVerilogのトップレベルモジュールに出力 [ソースコード](#)

```
// top.sv
Top core(
    .clock(clock && !cpu_halt),
    .io_uart_tx(uart_tx), // UART送信出力ピン
    .*
);
```

特定の文字を送り続けるUART送信回路の作成 (4/4)

- 動作確認
 - ComProc CPU BoardのUSB-UARTモジュールをPCに接続
 - モジュールに対応するデバイスをターミナルソフトで開く
 - Windows: Tera Term等
 - Linux : miniterm等
 - ボー・レートは 115200 に設定
- ひたすら **A** が表示される

```
$ miniterm /dev/ttyUSB0 115200
--- Miniterm on /dev/ttyUSB0 115200,8,N,1 ---
--- Quit: Ctrl+] | Menu: Ctrl+T | Help: Ctrl+T followed by Ctrl+H ---
AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA
```

演習: CPUからUARTの送信を行う回路の作成

- 固定の文字を送信するUART回路を改造してCPUに接続
- CPUへの接続方法はGPIOと同様の方法、もしくは全く別の方法いずれでもよい
- ファームウェアを変更して、 `Hello, RISC-V` の文字列をPCに送信する