# 先進計算機構成論 01

東京大学大学院 情報理工学系研究科 創造情報学専攻
塩谷 亮太
shioya@ci.i.u-tokyo.ac.jp

# 前回のアンケートの結果

- 「聞いた事はある」以上の人の割合

| | | |
|---|---|---|
| 1. | 組み合わせ回路と順序回路 | 85% |
| 2. | 命令とは何か | 95% |
| 3. | 命令パイプライン | 90% |
| 4. | キャッシュ | 100% |
| 5. | スーパスカラ | 70% |

# 今日の内容：コンピュータの基本の復習

1. コンピュータの基本
    1. 命令やプログラム，機械語とはなにか
    2. 単純な CPU の構造と動作
2. C 言語で書かれたプログラムの実行を考える
    1. C 言語と機械語の対応
3. 命令セットの例：RISC-V

- 今回は予備知識があまりない人をターゲットにしています

# 命令やプログラム，機械語とはなにか

# プログラム

- プログラムとは
  - ◇ 計算の手順を表したもの
  - ◇ 実体：メモリの上にある，計算方法を指示する数字（命令）の列
- （フォン）ノイマン型 (von Neumann-type) コンピュータ
  - ◇ プログラムに従って計算をする機械
  - ◇ メモリに格納された命令を取り出して順に実行
  - ◇ 他にもあるけど，これが今日では主流
- 次項から，簡単な例を使って説明

# 例：A + B - C

- 「A+B-C」の計算の手順：
  1. A と B を足す
  2. 1. の結果から C を引く
- なんとなく形式的に表すと：
  1. `add A, B → D`　// D は一時的に結果をおいておく変数
  2. `sub D, C → E`　// E に A + B - C の結果

# 例：A + B - C

- 形式的に表すと：
  1. `add A, B → D`　// D は一時的に結果をおいておく変数
  2. `sub D, C → E`　// E に A + B - C の結果

- 数字の列で表してみる：
  - ◇ 変換の規則：

| 意味： | add | sub | A | B | C | D | E |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 数字： | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |

  - ◇ 数列：
    1. 0, 2, 3, 5　　// add(0) A(2), B(3) → D(5)
    2. 1, 5, 4, 6　　// sub(1) D(5), C(4) → E(6)

# 例：A + B - C

- 数列を1次元に展開すると：
  - 0, 2, 3, 5, 1, 5, 4, 6

| 意味： | add | sub | A | B | C | D | E |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 数字： | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |

- 先頭から順に数字を読んで，変換規則をみながら計算する
  1. 先頭は 0 なので，これは足し算
     - 続く2つの数字は足し算の入力で，その次は出力
  2. 次は 2 なので，これはA．次は 3 なので B
  3. 結果を 5(E) に入れる …
  4. 次は 1 なので…

# プログラムの表現と用語（１）

- バイナリ：　　0, 2, 3, 5, 1, 5, 4, 6
  - ◇ 計算方法を表す数字の列
  - ◇ コンピュータが直接理解できるのは，このバイナリのみ
- アセンブリ言語：　`add A, B → D`
  - ◇ バイナリと１：１に対応しており，基本的に「相互に」変換可能
  - ◇ 要はバイナリを人間にとって読みやすくしたもの
- 機械語：
  - ◇ 上記のバイナリないしはアセンブリ言語で表現されたプログラム

# プログラムの表現と用語（２）

- 命令：
  - ◇ コンピュータが解釈できるプログラム内の計算手順の最小単位
  - ◇ 「 0, 2, 3, 5 」「add A, B→D」
- オプコード (opcode)
  - ◇ 命令でどういう計算をするか指定する部分
  - ◇ 「 **0,** 2, 3, 5 」「**add** A, B→D 」
- オペランド (operand)
  - ◇ 計算の入出力対象を指定する部分
  - ◇ 「 0, **2, 3, 5** 」「add **A, B→D** 」
  - ◇ 入力をソース，出力をディスティネーション とよぶ

# 命令セット・アーキテクチャ

- バイナリの数字と実際に行う計算のルールを定めたもの：
  - どのような演算をサポートするか
    - 「add, sub …」
  - バイナリのどの数字にどのような意味を持たすか
    - 「0 なら add」
  - 数字の順番の意味
    - 「最初の１桁が計算の種類，次が入力･･･」
  - 各数字に何桁（何ビット）割り当てるか
    - 「10進数で１桁ずつ」

# 命令セット・アーキテクチャ

- ルールはコンピュータ（CPU）の種類ごとに異なる
  - ◇ 「互換性」とは，上記のルールが同じであること

# ここまでのまとめ

- コンピュータとは
  - ◇ プログラムに従って計算をする機械
- プログラムとは
  - ◇ 計算の手順を表したもの
  - ◇ メモリの上にある，命令（計算方法）の列
- 命令とは
  - ◇ コンピュータが解釈できる計算手順の最小単位
    - □ 最終的な実体としては，数字の列
  - ◇ 命令セット：
    - □ 命令の数字と，それに対応する計算方法を定めたもの

# 単純な CPU の構造と動作

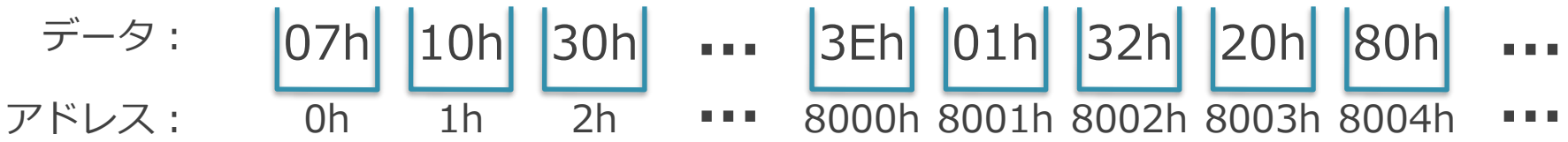
# 単純な CPU の構造と動作

- 下記のようなプログラムを処理できる，最低限のコンピュータを説明
  1. 0, 2, 3, 5　　`// add(0) A(2), B(3) → D(5)`
  2. 1, 5, 4, 6　　`// sub(1) D(5), C(4) → E(6)`

# コンピュータ

- 「プログラム = 命令列 = 数字の列」に従って計算をする機械
- 構成要素：
  - CPU　（計算するもの）
    - 演算器
    - レジスタ
    - PC
  - メモリ（データを記憶するもの）

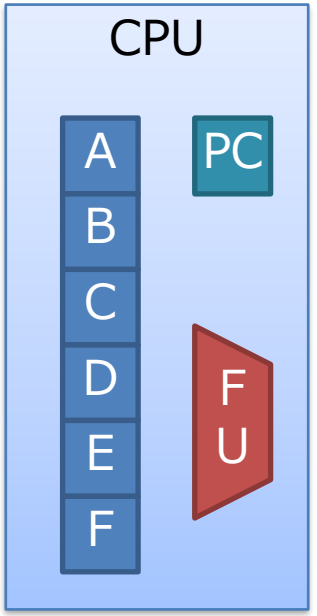
# メモリ




- メモリは命令列と，計算するデータを保持する
  - ◇ 単一の巨大な配列があると思えばよい
  - ◇ C 言語の配列は，これを切り出して見せている
- 数字が入る箱がたくさん並んでいるイメージ
  - ◇ アドレス：箱の通し番号（住所）
  - ◇ データ　：箱の中身の数字

# CPU

- コンピュータの心臓部
  - ◇ メモリから命令を読み出し，計算する
- 構成要素：
  - ◇ 演算器（FU: Functional Unit）
    - □ 加算器や AND 演算器など
    - □ 指示された種類の演算を行う
  - ◇ レジスタ・ファイル（右図では A,B,C...）
    - □ メモリと同様にデータを記憶する
      - ＊ 位置を指定して読み書きする
    - □ CPU の演算は，このレジスタ上でのみ行う
  - ◇ PC
    - □ 現在見ている命令のアドレスを記憶している場所



# CPU の動作

- PC（Program Counter）：
  - ◇ 現在処理する命令のアドレスを保持
- おおざっぱな命令の処理：
  1. PC が指すアドレスのメモリから読む
  2. 読んできた命令に応じて処理をする
  3. PC を更新（数字をたす）
  4. 1. にもどる

# CPU の動作

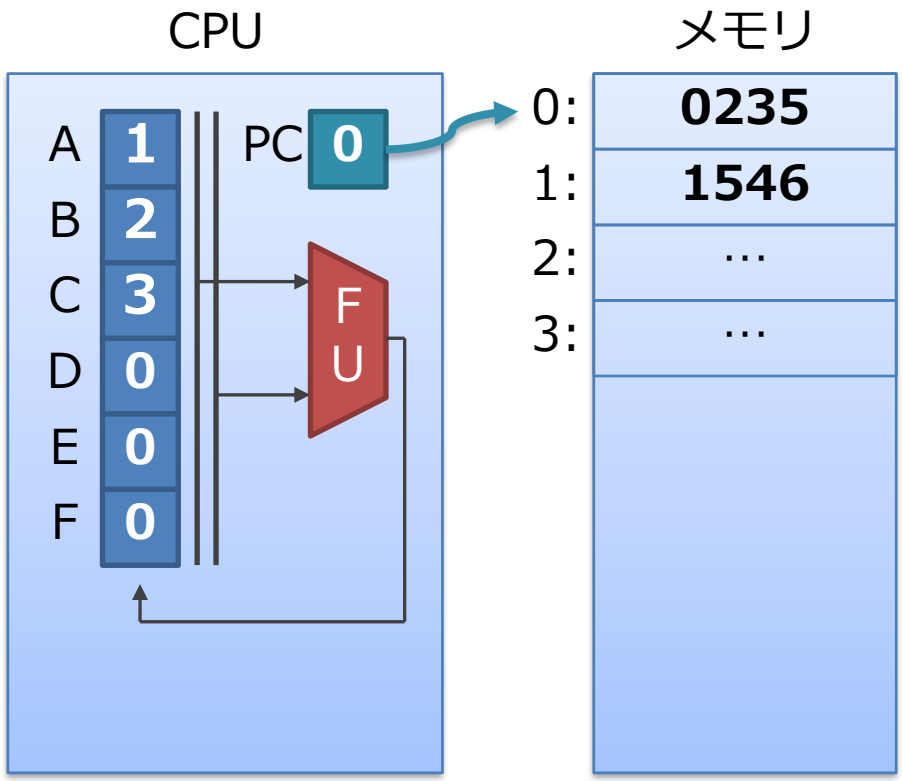
- レシピをみながら料理をするのに似ている
  - ◇ レシピの各手順が命令
  - ◇ 今何個目の手順を見てるか，を憶えているのかが PC
  - ◇ ひとつひとつ手順を取り出して，指示に従って処理

# 具体的な命令の処理

1. 命令のメモリからの読み出し（フェッチ）
2. 命令の解釈（デコード）
3. レジスタの読み出し
4. 演算の実行
5. 結果のレジスタのへの書き戻し

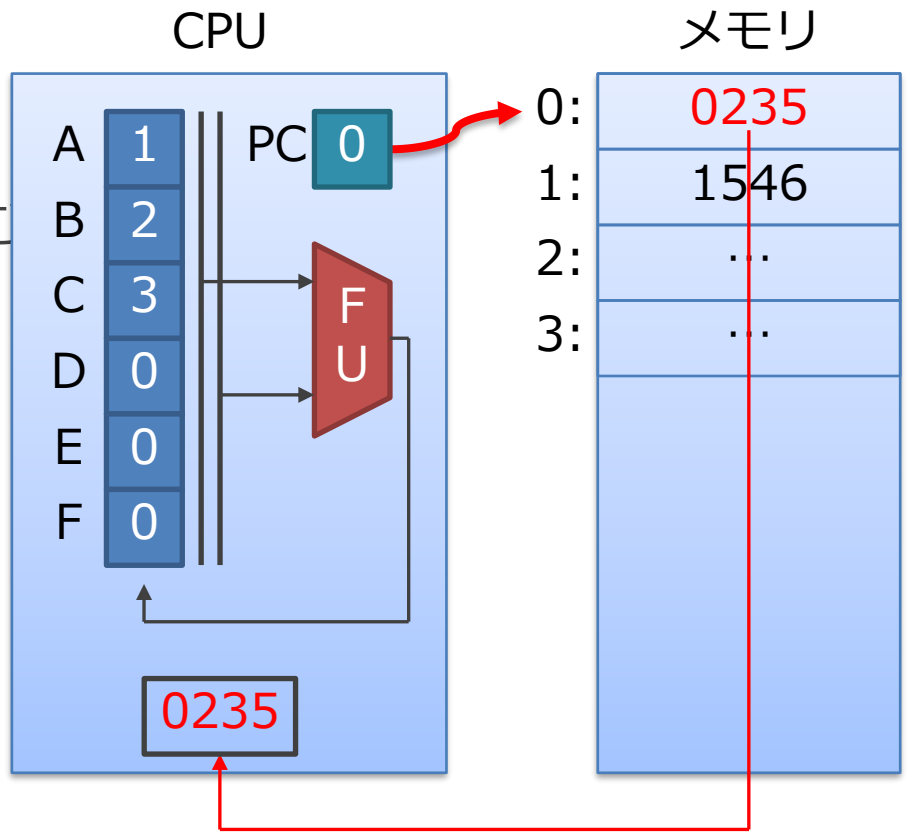
# 0. 初期状態

- PC はアドレス 0 を指している
- レジスタの初期値は1,2,3…
- メモリには,
  - 0番地に 0235 (add A,B→D)
  - 1番地に 1546 (sub D,C→E)



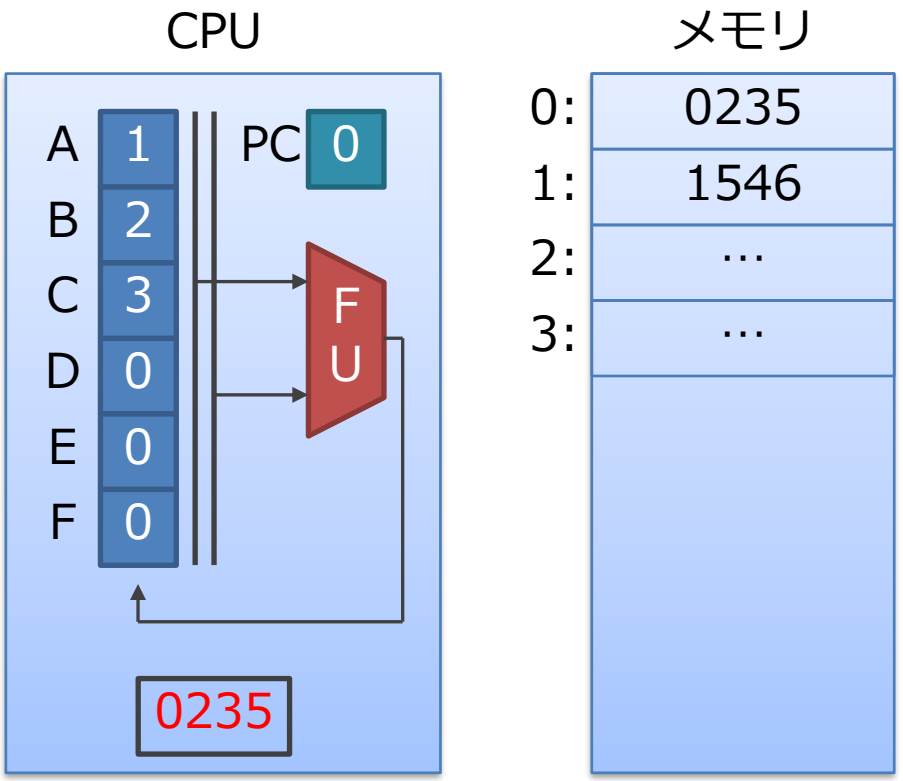
# 1. 命令の読み出し（フェッチ）

1. PC が指している命令の番地を読む
    1. 今はアドレス 0 を指している
2. 内容である 0235 が得られる
3. CPU 内にもってくる



# 2. 命令の解釈（デコード）
# オプコードやオペランドが何かを割り出す

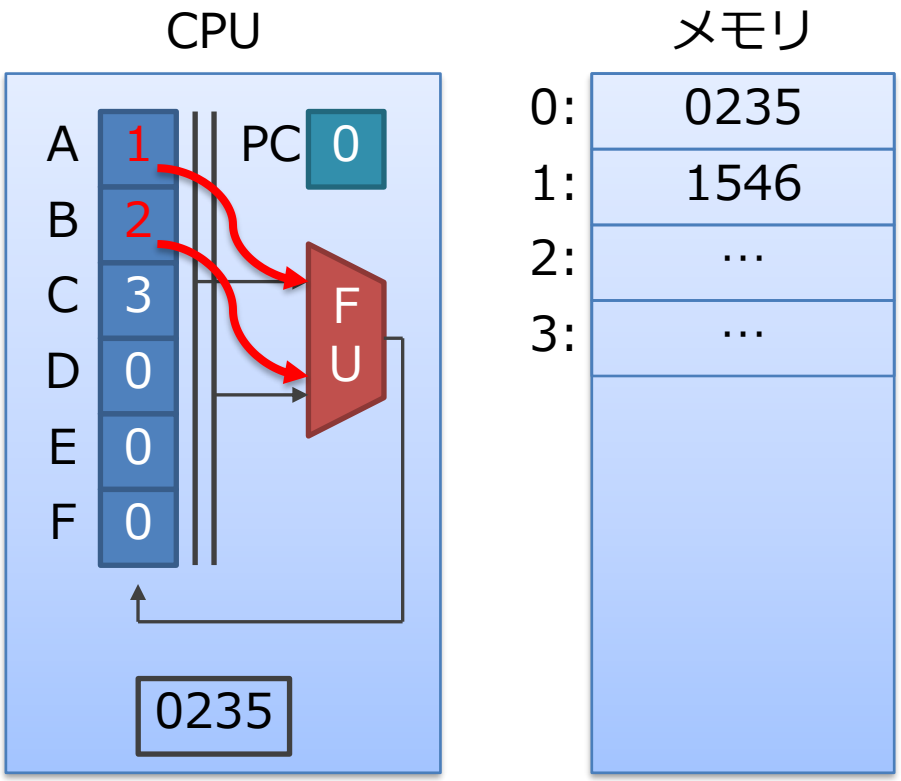
1. 0235 の意味を解釈する
   - ◇ 0: add
   - ◇ 2: レジスタAを読む
   - ◇ 3: レジスタBを読む
   - ◇ 5: 結果はレジスタDに書く




| 意味： | add | sub | A | B | C | D | E |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 数字： | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |

# 3. レジスタ読み出し

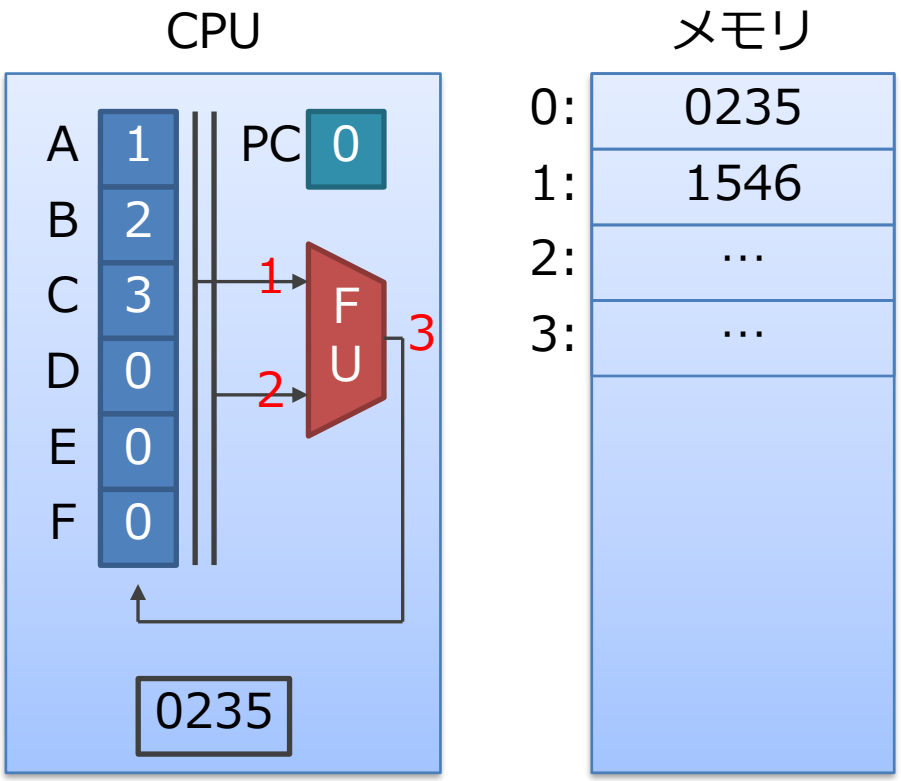
1. A と B をレジスタから読みだす
   - ◇ 先ほどのデコード結果に従う
2. 中身である 1 と 2 が取れる
   - ◇ 「0235」は レジスタの「読み出す場所」を表してることに注意




| 意味： | add | sub | A | B | C | D | E |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 数字： | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |

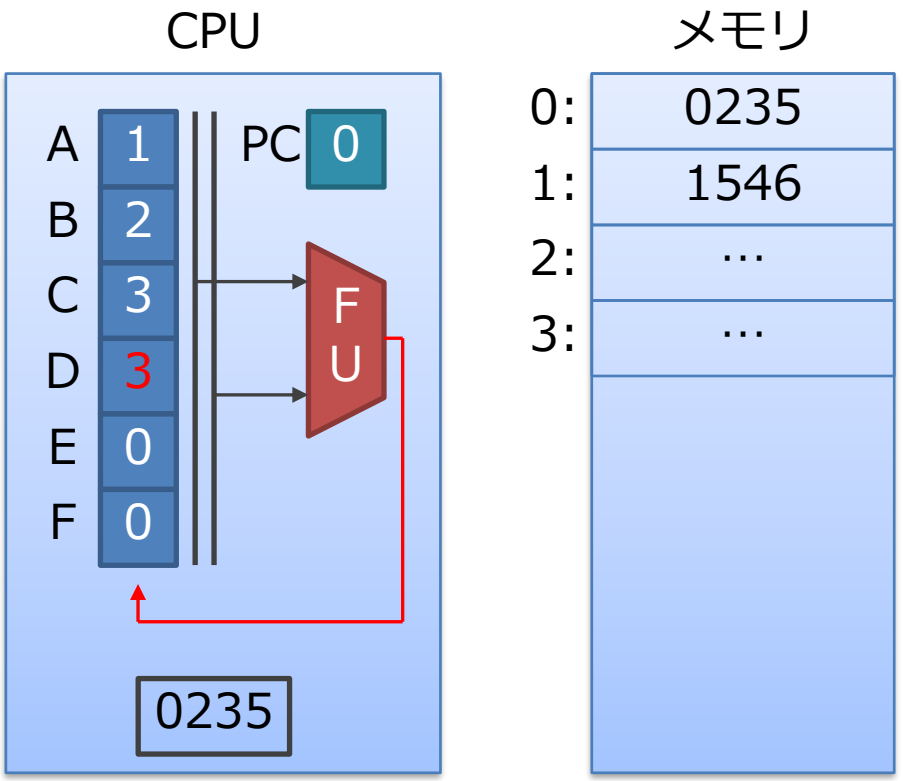
# 4. 演算の実行

1. 演算器（FU）で，足し算をする
   - ◇ 1 + 2 = 3



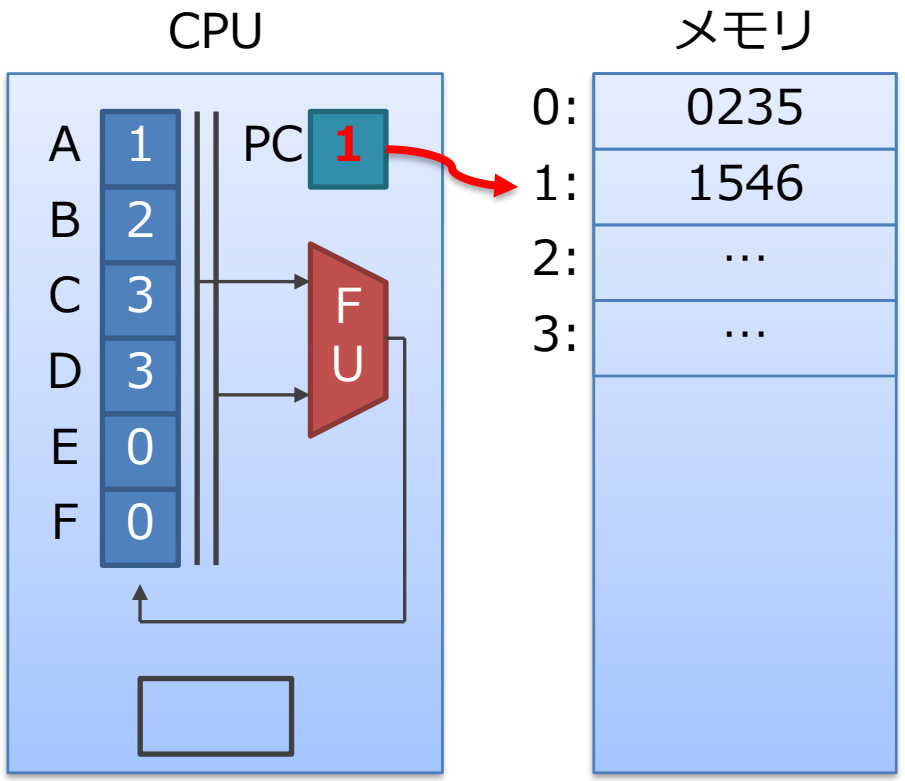
# 5. レジスタへの結果の書き戻し

1. D に結果の3を書き込む



# 6. 次の命令へ

1. PC に＋１をする
2. 1. の命令の読み出しに戻る



# その他の命令

- その他各種の演算命令 = 乗算や除算，論理演算など
  - ◇ これらは，演算器で行う演算の内容が異なるのみ
  - ◇ CPU 全体の制御は，加算や減算と同様に行えばよい
- 演算とは異なる，その他の命令：
  1. メモリの読み書き
  2. 制御
  3. 即値（レジスタの値の書き換え）

# メモリの読み書き

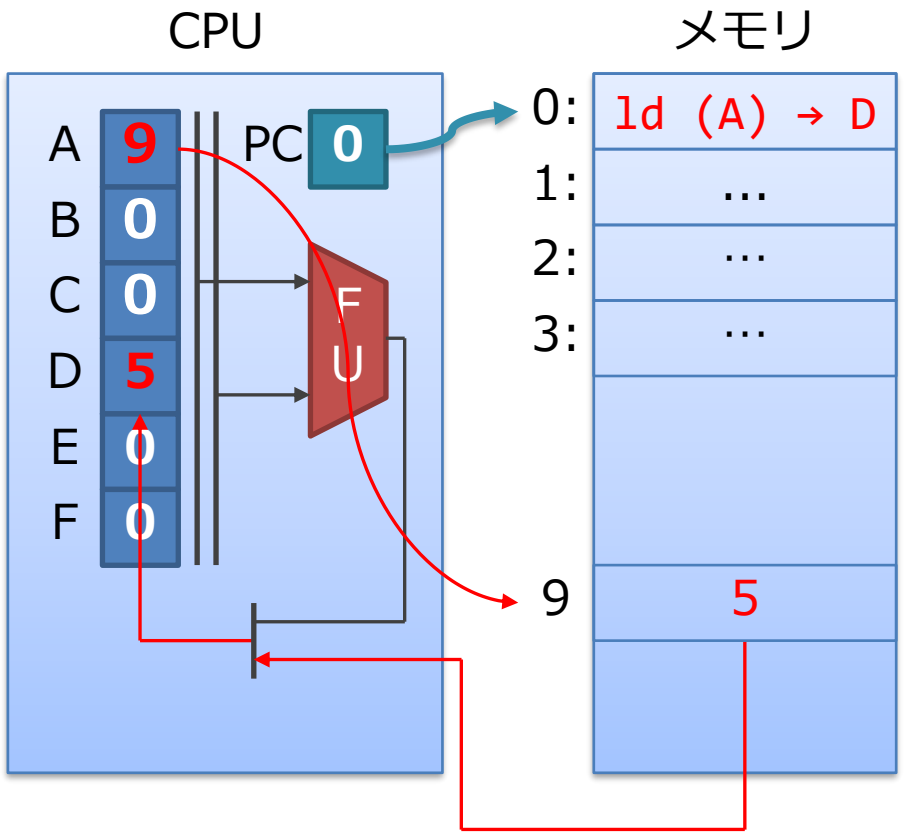
- メモリの読み書き
  1. ロード命令：メモリからデータを読み出す
  2. ストア命令：メモリへデータを書き込む

# ロード命令（ld: load）

- `ld (A) → D`
  - ◇ A の中が指しているメモリの場所を D に読み込む
  - ◇ （A）は，C 言語 で言う *A

1. A の中身であるアドレス 9 を，メモリから読むと 5 が取れる

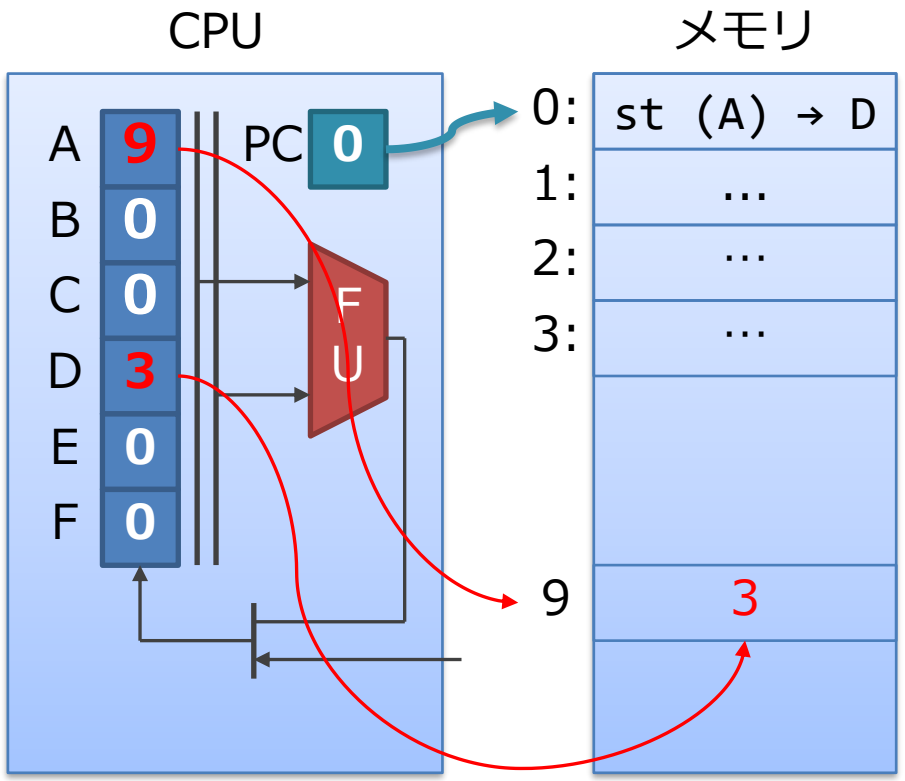
2. 5 を D に書き込む



# ストア命令 (st: store)

- `st D → (A)`
  - ◇ A の中が指しているメモリの場所に D を書き込む

1. A の中身であるアドレス 9 に，D の中身 5 を書き込む



# 制御命令

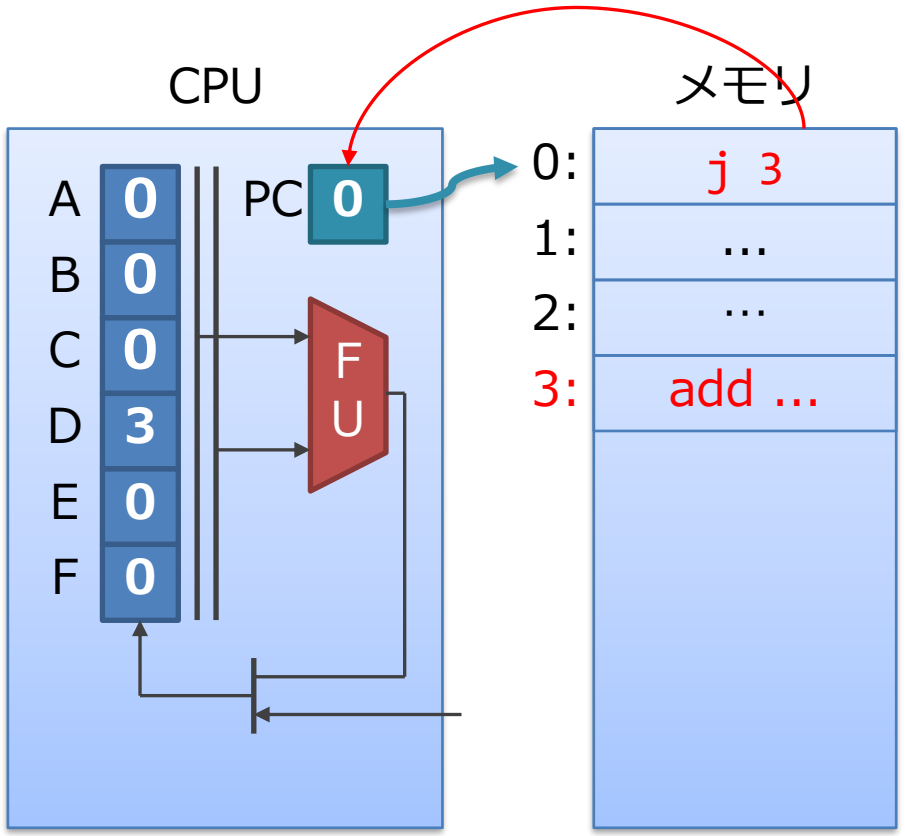
- 制御：
  - PC を +1 するかわりに，任意の値に書き換えること

1. ジャンプ命令
   - プログラムの任意の場所に移動する
2. 分岐命令
   - 条件に応じて，プログラムの任意の場所に移動する

# ジャンプ命令 (j: jump)

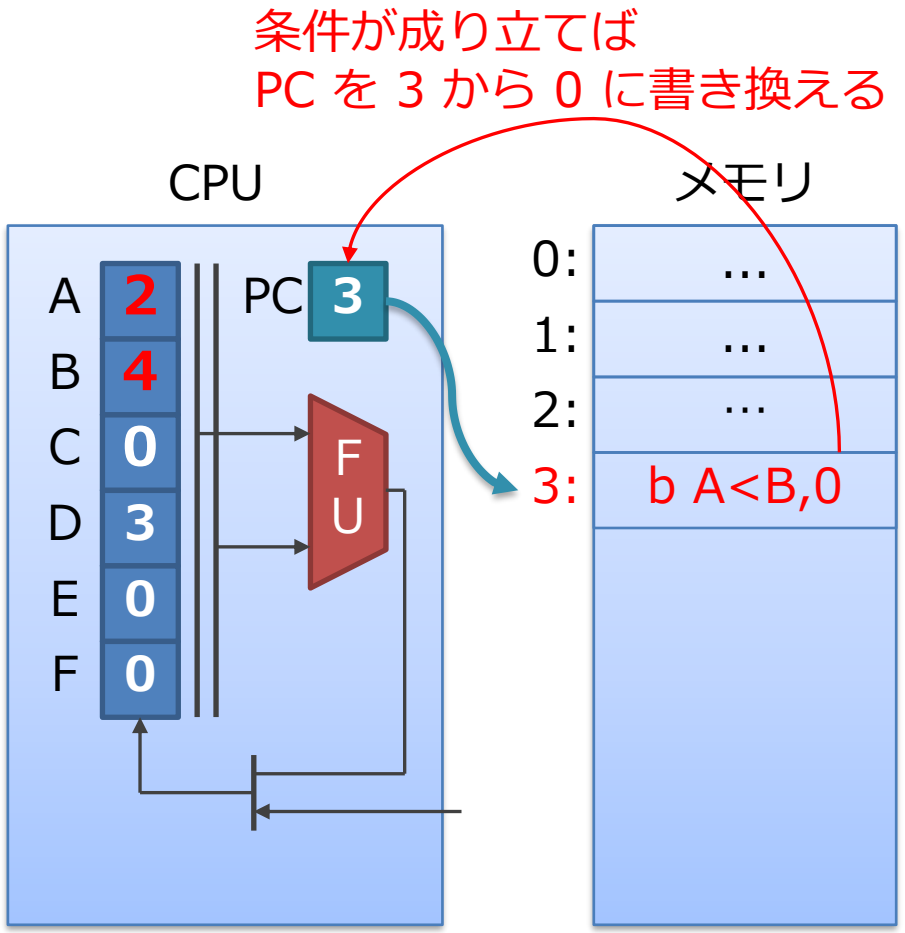
- `j N`
  - (N は任意の数字)
  - PC を N に書き換える
  - 次はアドレス N にある命令が実行される

- 動作例
  1. j 3 をフェッチ
  2. PC を 3 に書き換える
  3. アドレス 3 にある add を実行



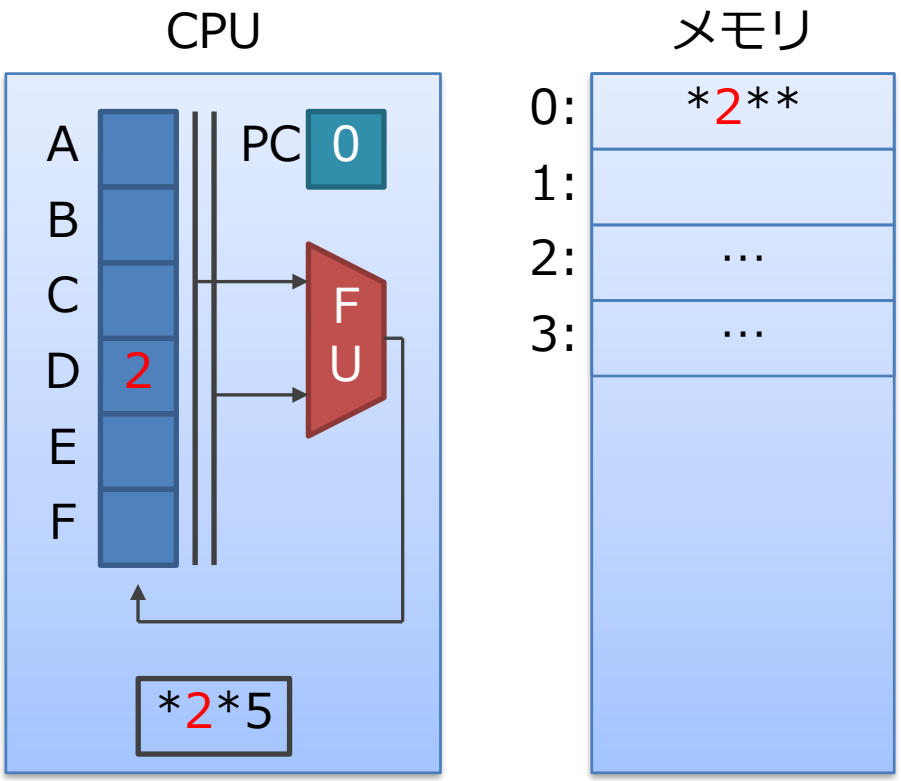
# 分岐命令 (b: branch)

- `b A < B, N`
  - ◇ レジスタを２つ読んで，`A < B` なら，`N` に飛ぶ
- 動作例
  1. `A` にある `2` と `B` にある `4` を読んで比較
  2. `A < B` なので，`PC` を `0` に書き換える
  3. 次は アドレス `0` にある命令が実行される



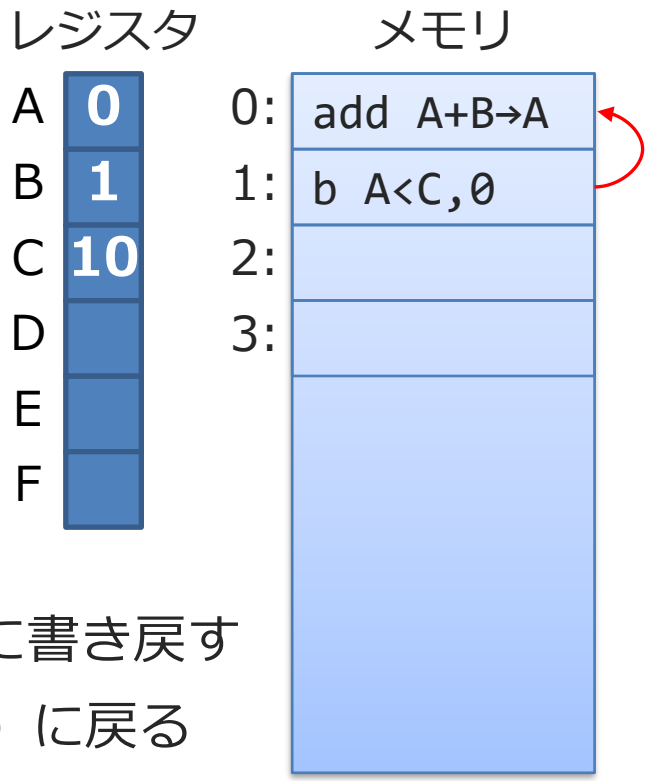
# 即値（レジスタの値の書き換え）

- `li 2 → D`
  - ◇ (load immediate)
- 即値命令は命令の内の数字を，直接レジスタに書き込む
- 他の命令は，命令内の数字を「レジスタの位置」と解釈
- レジスタの初期値を設定することなどに使用



# プログラムの例：10回だけ回るループ

- レジスタ初期値
  - ◇ PC：0 // 0 番地の命令から開始
  - ◇ A：0 // ループ・カウンタ
  - ◇ B：1 // インクリメント量
  - ◇ C：10 // ループ回数




- 動作

0: add A+B→A: A に B を足して，A に書き戻す

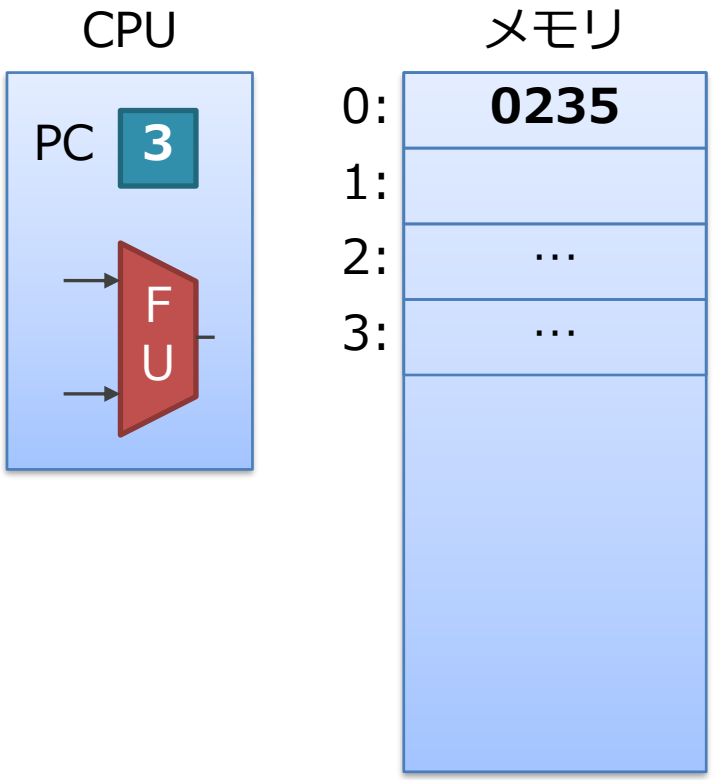
1: b A<C,0 : A < C ならアドレス 0 に戻る
もし A > C ならアドレス 2 に

# ここまでのまとめ

- 単純な CPU の構造
  - ◇ 演算器（FU），レジスタ，PC
- 動作：
  - ◇ PC に従ってメモリから命令を読み出し，それを 1 つずつ処理
- 命令の例
  - ◇ 演算，ロード/ストア，ジャンプ/分岐，即値

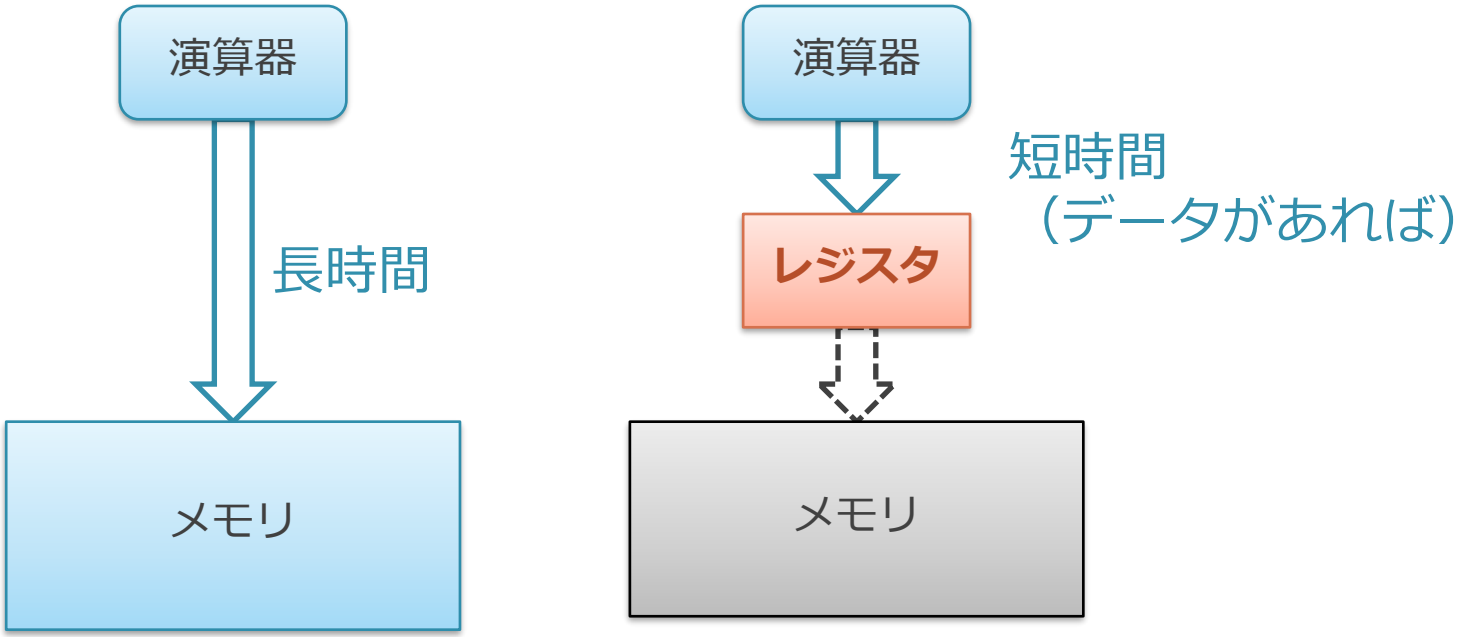
# 余談：メモリのみでもコンピュータは作れる

- レジスタは，必須の存在ではない
- メモリのみでも等価なものは作れる
  - ◇ 命令中のレジスタの指定（A, B, C ...）をメモリのアドレスだと思えばよい
- 昔の命令セットでは，ほぼメモリのみで計算を行うものも実際ある



# なぜレジスタとメモリがあるのか？

- 問題：メモリは大容量だが，その分遅い
- 小容量だけど，高速なレジスタを用意
  - 一度利用した値を入れておくことで，2度目からは高速に
  - 一度使用したデータは，また使う可能性が高い



# データをとってくるのに，どのぐらいかかるか？

CPU

1ns

マイ本棚：
1分（目的の本を探す）

メモリ

100ns

名古屋：
95分（新幹線）

ハードディスク

$10^6$ns

木星：
2年　（ロケット）

光学ドライブ
テープ・ドライブ

$10^9$ns

白鳥座デネブ：
2000年（光速）

# C 言語と機械語の対応

# C 言語で書かれたプログラムを動作させるには

- ここまでに説明した CPU でも，大概のことはできそう
  - ◇ 任意の場所のメモリの読み書き
  - ◇ ループ，分岐
- コンパイラの処理：
  - ◇ C 言語で書いた各ステートメントを，対応する機械語に置き換える
  - ◇ 基本的にはパターンマッチング

# C 言語で書かれたプログラムを動作させるには

- 具体的に，C 言語の構文をみていく
  - ◇ まずは例としてループを手でコンパイルしてみる
- C 言語の構文から，どのような命令が必要なのかを検討

# C 言語のループ

- C 言語のループについて考える

```
1: for (i = 0; i < 10; i++) {
2: }
```

- そのままだと考えづらいので,
  まず上記のループを下記の形に変換して考える

```
1:      i = 0;          // 初期化部分
2: LABEL:               // ループの先頭
3:      i = i + 1;      // カウンタの更新
4:      if (i < 10)     // ループの継続判定
5:          goto LABEL; // LABEL に戻る
```

# 前準備：変数の割り当て

```
1:      i = 0;
2: LABEL:
3:      i = i + 1;
4:      if (i < 10)
5:          goto LABEL;
```

変数表

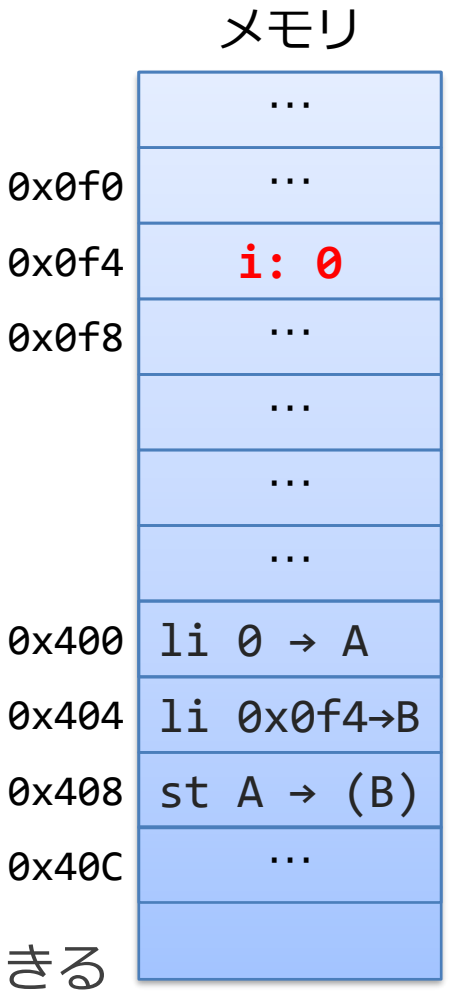
| 変数 | アドレス |
|---|---|
| i | 0x0f4 |

メモリ


- 変数 i をメモリの 0x0f4 番地に割り当てる
  - ◇ グローバル変数だと思ってほしい
  - ◇ 変数は1つ4バイトとする
  - ◇ 適当にあいてるところを選んだだけで，番地の数字に意味はない
- 命令は 0x400 番地から開始するとする
  - ◇ 命令も1つ4バイトとする

# 1 行目：変数 i への 0 の代入

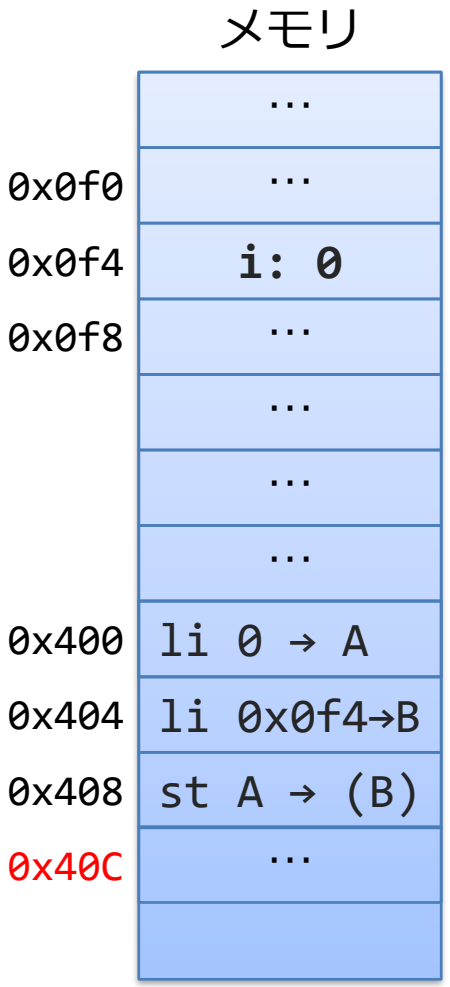
```
1: i = 0;
   // レジスタ A に 0 をいれる
   0x400: li 0      → A
   // B に 0x0f4 (i の番地) をいれる
   0x404: li 0x0f4 → B
   // A を (B) にかきこむ
   0x408: st A → (B)
```




- グローバル変数の更新は，基本的にこのパターンでできる
  - ◇ 変数のアドレスを li で読んで，そこにストア

# 2行目：ラベル

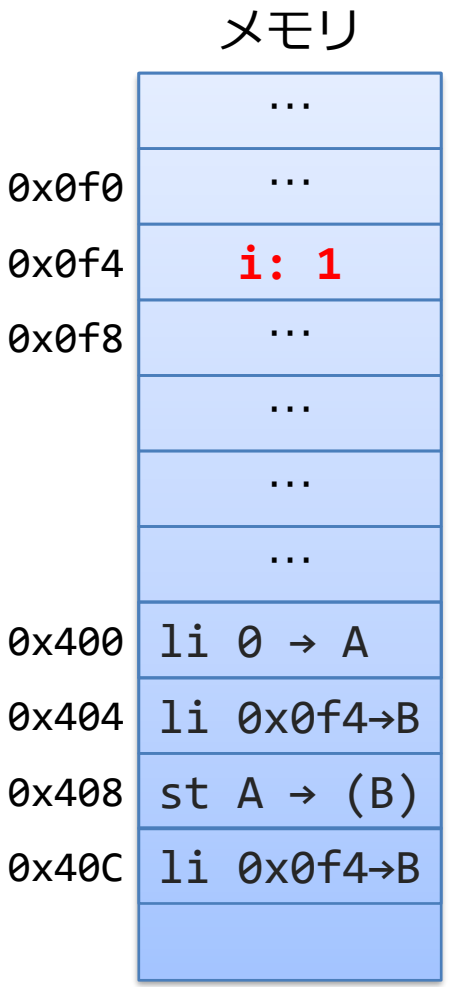
```
1:      i = 0;
2: LABEL:
3:      i = i + 1;
4:      if (i < 10)
5:          goto LABEL;
```




- 次の３行目は，0x40C からはじまるので，LABEL=0x40C として憶えておく

# 3行目：変数 i の インクリメント

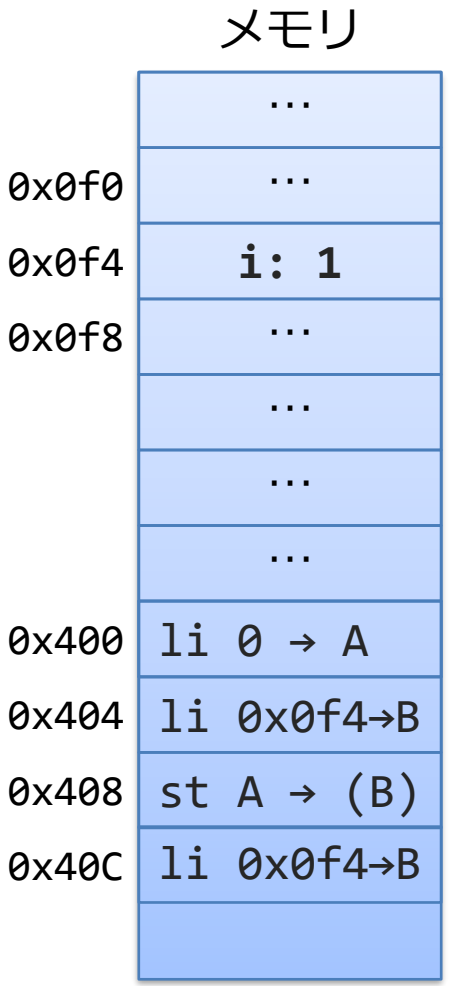
```
3: i = i + 1;
   // B に 0x0f4 (i の番地) をいれる
   0x40C: li 0x0f4 → B
   // (B) を A に読み込む
   0x410: ld (B) → A
   // 1 を足す
   0x414: add A,1 → A
   // A を (B) にかきこむ
   0x418: st A → (B)
```



# 4-5行目：ループの継続判定とジャンプ

```
2: LABEL:
3:      i = i + 1;
4:      if (i < 10)
5:          goto LABEL;
```

```
// B に 10 を読み込む
li 10 → B
// さっきのインクリメントの結果が残ってる A と
// 比較し，条件がなりたっていたら LABEL に
b A < B, 0x40C
// 条件がなりたっていなかったら，以降の命令に
```



# 全体

```
1:      i = 0;
        0x400: li 0      → A    // レジスタ A に 0 をいれる
        0x404: li 0x0f4 → B     // B に 0x0f4 (i の番地) をいれる
        0x408: st A → (B)       // A を (B) にかきこむ（= i を更新）
2: LABEL:
3:      i = i + 1;
        0x40C: li 0x0f4 → B     // B に 0x0f4 (i の番地) をいれる
        0x410: ld (B)   → A     // (B) を A に読み込む（= i 読み込む）
        0x414: add A,1  → A     // A に 1 を足す
        0x418: st A → (B)       // A を (B) にかきこむ（= i を更新）
4:      if (i < 10)
5:         goto LABEL;
        0x41c: li 10 → B        // B に 10 を読み込む
        0x420: b A < B, 0x40C // 条件がなりたっていたら LABEL に
```

# C 言語への変換（コンパイル）

- 基本的には１つ１つの文を，機械語に置換していけばよい
  - ◇ さっきの結果はかなり冗長なので，実際にはもっと最適化する
  - ◇ 変数 i を毎回メモリから読み書きしていたのを省略するとか
- ただし，デバッグ用にコンパイルしたコードはさっきの例に近い
  - ◇ デバッガでステップ実行するためには，元の文と１：１に対応していた方が都合が良い
- C 言語の演算子と制御構文の全体について見ていく

# C 言語 の 演算子（優先順位順）

| | 記述例 | 説明 | | 記述例 | 説明 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | `a[i]` | 配列アクセス | 4 | `a * b` `a / b` `a % b` | 乗除算 |
| | `f(a)` | 関数呼び出し | 5 | `a + b` `a - b` | 加減算 |
| | `s.m` `sp->m` | 構造体アクセス | 6 | `a << b` `a >> b` | シフト |
| | `a++` `a--` | インクリメント, デクリメント | 7 | `a < b` `a <= b` | 比較 |
| 2 | `++a` `--a` | | | `a > b` `a >= b` | |
| | `&a` | アドレス | 8 | `a == b` `a != b` | |
| | `*p` | デリファレンス | 9 | `a & b` `a ^ b` `a \| b` | ビットごとの論理演算 |
| | `+a` `-a` | 単項 + と - | 12 | `a && b` `a \|\| b` | 論理演算 |
| | `~a` | ビット反転 | 14 | `c ? l : r` | 条件 |
| | `!a` | 論理否定 | 15 | `a = b` | 代入 |
| | `sizeof a` | サイズ | | `a += b` `a -= b` | 演算 と 代入 |
| 3 | `(t)a` | キャスト | 16 | `a, b` | コンマ |

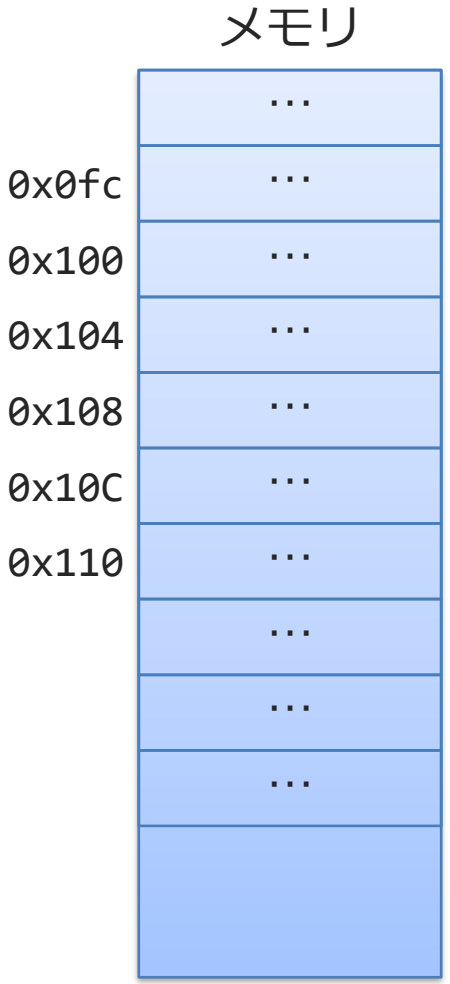
算術・論理演算　アドレス（ポインタ）　その他言語上の作用

# 変数，アドレス，ポインタ

- 変数，配列，構造体アクセス
  - 変数の出現
    - `x` ⇒ `*(&x)`
  - 配列
    - `a[i]` ⇒ `*(a + i)`
  - 構造体
    - `s.m` ⇒ `*(&s + offset)`
    - `sp->m` ⇒ `*(sp + offset)`
- 下記があればよい：
  - アドレスに対する演算
  - アドレスを指定したロードとストア

変数表

| 変数 | アドレス |
|---|---|
| x | 0x0fc |
| a | 0x100 |
| s | 0x110 |
| m | 0x4 |



# C言語 の 実行順序の制御

- C 言語の制御構文
  - if ～ else
  - for，while，do ～ while
  - switch ～ break, continue
  - return
  - goto
- 基本的に if ～ goto で書き換え可能
  - return だけ，これまでに説明した命令では作れない
  - ジャンプするときに，PC が戻るアドレスを保存する命令が必要

# C 言語を実行するためには

- おおよそ CPU にはこれだけの命令あればよい
  - 各種演算，アドレス計算
  - アドレスを指定した読み書き
  - `if ～ goto` 的な分岐 `+ return`

# C 言語と機械語は結構近い

- 「C 言語がこうだから，コンピュータをこう作ろう」ではなく，
  - 「コンピュータ がこうだから，C言語 がこうなった」
  - 「C 言語は，読みやすいアセンブリ言語」とか言われる

# ここまでのまとめ

- C 言語 コンパイラの処理：
  - 各ステートメントを，対応する機械語に置き換える
  - 基本的にはパターンマッチング
- C 言語を動かすためには，たとえば下記があればよい
  - 各種演算，アドレス計算
  - アドレスを指定した読み書き
  - `if ～ goto` 的な分岐 `+ return`

# 実際の命令セットの例（やや発展）

# 実際の命令セットの例

- 「RISC-V」を例としてとりあげる
  - ◇ 比較的最近登場した，CPU の命令セットのオープンな規格
- 前提知識がない状態だと，やや理解が追いつかないかもしれない
  - ◇ 大ざっぱにわかっていれば OK

# 商用の CPU の命令セットは「オープン」ではない

- ソフトウェア・エミュレーションとして実装する分には問題ない
  - ◇ たとえば QEMU や，VMware
- しかし，ハードウェア設計を公開すると怒られる
  - ◇ それをハードとして特許にひっかかる･･･ らしい
  - ◇ むかし塩谷は ARM 互換を作って公開しようとしたら怒られた

# RISC-V

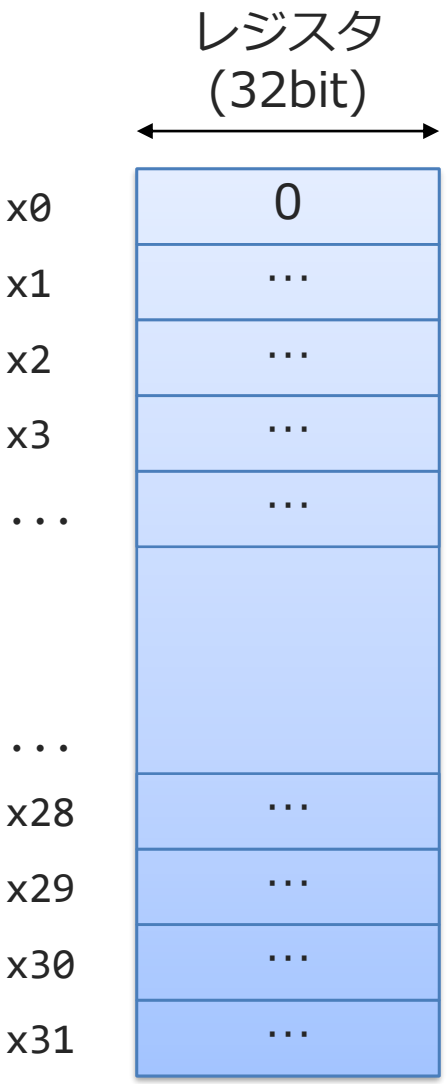

- オープンな CPU の規格（命令セット・アーキテクチャ）
  - ◇ x86 や ARM と違って，自由に互換品を作れる
- モチベーション：
  - ◇ 既存命令セットのライセンス料が高い or
    互換品をそもそも作らせてくれない
  - ◇ 研究者：自由に研究成果を入れた CPU を作りたい
  - ◇ 企業：　自由に特色のある CPU を作りたい

# RISC-V の普及状況

- 研究分野ではデファクトに近い使われ方をしている
- 製品での実使用例もかなり出てきた
  - ◇ 日本でも大手メーカーでの使用例が結構ある
  - ◇ NVIDIA GPU や 富岳の ARM の内部にもコッソリ使われている
  - ◇ 基本的には，小型のコントローラから広がって行っている

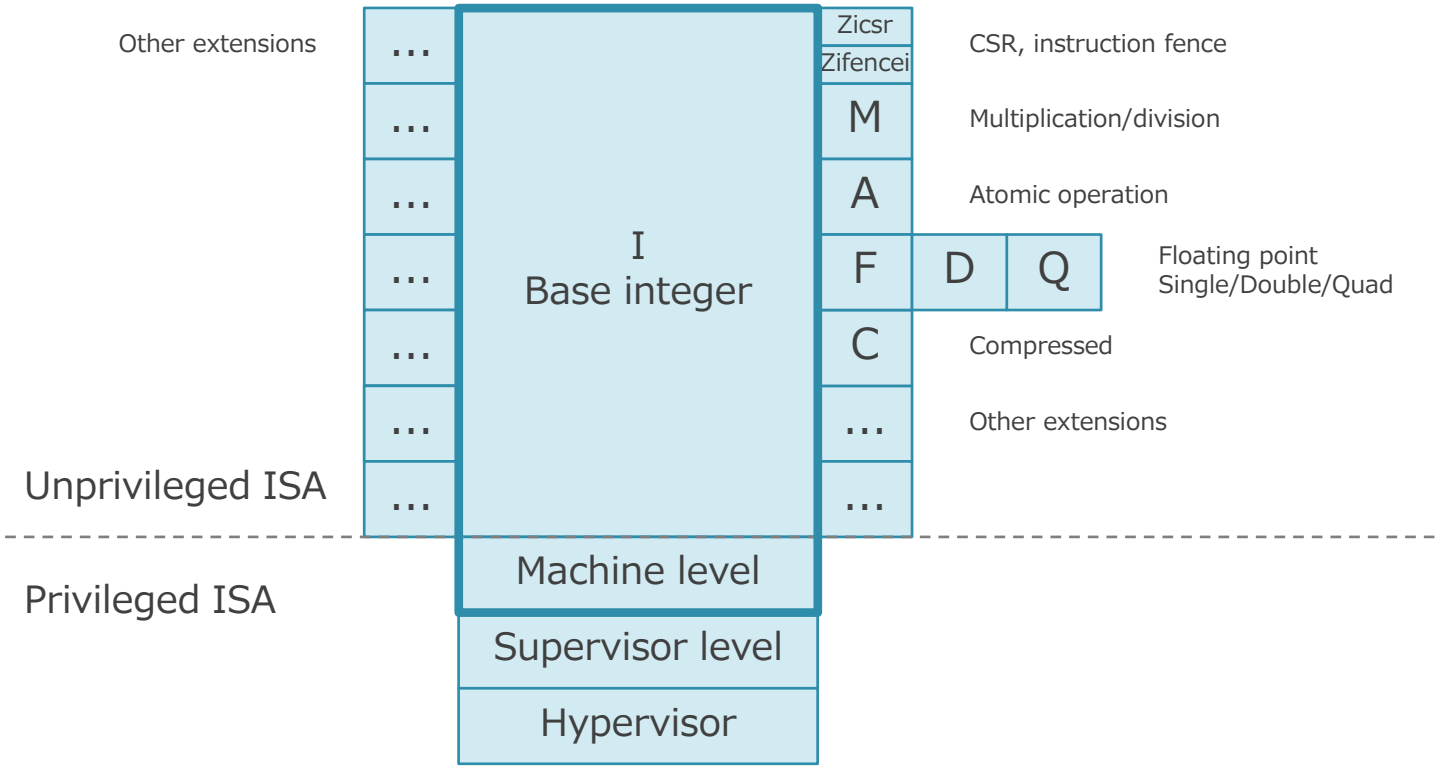
# RISC-V 命令セットの基本

- 基本的な特徴：
  - 各命令は４バイトのデータで構成
  - レジスタは 32本 ある
    - A,B,C … ではなく，x0, x1, x3… と表記
    - うち１つはゼロレジスタ
      （常にゼロが入っている
  - 各レジスタの幅は 32/64/128 bit が規定されている
    - ここでは 32bit のものをとりあげる
- 基本的には，今日前半で話した命令セットを
  2進数ベースできちんとつめたもの



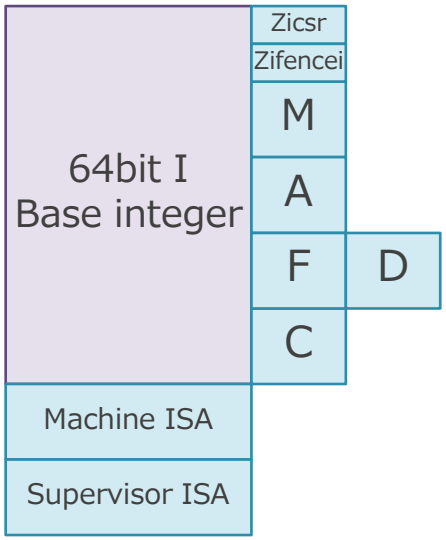
# RISC-V 命令セットの概観

- 必須部分：下図の太枠部分
  - ◇ I（基本整数）+ Machine Level（割り込み関係の特権命令）
  - ◇ この図に描ききれていない拡張もたくさんたくさんあります

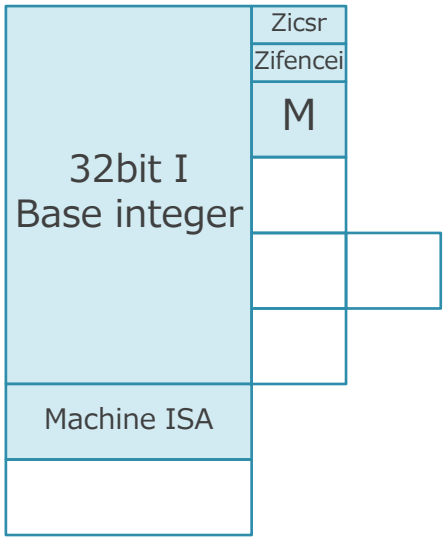


# プロセッサごとのサポート命令の例

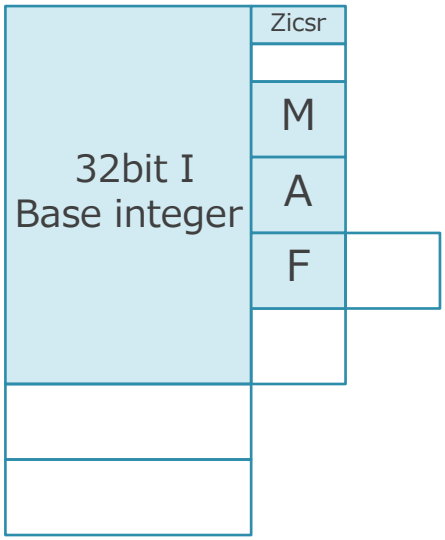
Rocket: RV64GC
(IMAD C Zifencei Zicsr)




RSD: RV32IM
(IM Zifencei Zicsr)




HORNET: RV32IMFA
(IMFA Zicsr)




- 目的に応じてさまざまな拡張を足して使用
  - Zicsr：制御レジスタ
  - Zifencei：命令メモリ書き込みフェンス
  - C：圧縮
  - M：乗除算
  - A：アトミック
  - F, D, Q：浮動小数点

# RISC-V における拡張機能と課題

- 特定用途向けのプロセッサを作成する場合などに非常に有用
- RISC-V International と呼ばれる団体が管理
  - そこで提案され承認を経たもののみが公式となる
  - 基本的には拡張が無節操に増えることはない.
- 命令セットの分断化の懸念
  - 組み合わせは膨大なものとなっている
  - ソフトウェアの相互運用を考える場合に課題となる
    - コンパイルしたバイナリが別のハードではそのまま動かない

# プロファイル

- プロファイル = 標準的な拡張の組み合わせ
  - https://github.com/riscv/riscv-profiles/blob/main/profiles.adoc
  - 想定されるユース・ケースごとに「ファミリ」がある
    - 例：組み込み向け，リッチなアプリケーション向け
- 策定中の最新のプロファイル
  - RVA23：リッチなアプリ+OS が動く
  - RVB23：RVA のもうちょっと機能を削ったもの？
  - RVM23：組み込みコントローラ向け

# プロファイルの課題

- どの拡張を必須にするかで超揉める
  - 特定の人物/ベンダが特定の拡張を入れたがる or 外したがる
- 例：
  - 既にその拡張の実装を終えているので入れたい
    - 他社からはある種の参入障壁に見える
  - その拡張を入れてない実装をつくっちゃったので，外したい
    - 再設計したくない

# RISC-V の 基本整数命令

- 概要
  - ◇ 加減算，論理演算，
    ロード・ストア，
    即値，分岐とジャンプなど
  - ◇ 各命令は 32bit 幅

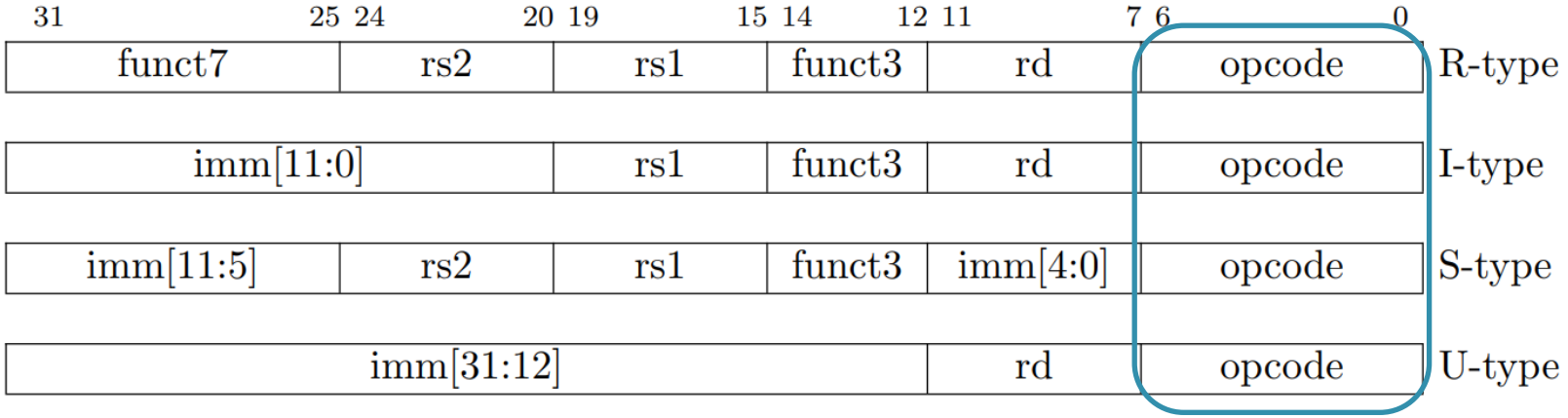
**RV32I Base Instruction Set**

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| imm[31:12] | | | rd | 0110111 | LUI |
| imm[31:12] | | | rd | 0010111 | AUIPC |
| imm[20\|10:1\|11\|19:12] | | | rd | 1101111 | JAL |
| imm[11:0] | | 000 | rd | 1100111 | JALR |
| imm[12\|10:5] | rs2 | 000 | imm[4:1\|11] | 1100011 | BEQ |
| imm[12\|10:5] | rs2 | 001 | imm[4:1\|11] | 1100011 | BNE |
| imm[12\|10:5] | rs2 | 100 | imm[4:1\|11] | 1100011 | BLT |
| imm[12\|10:5] | rs2 | 101 | imm[4:1\|11] | 1100011 | BGE |
| imm[12\|10:5] | rs2 | 110 | imm[4:1\|11] | 1100011 | BLTU |
| imm[12\|10:5] | rs2 | 111 | imm[4:1\|11] | 1100011 | BGEU |
| imm[11:0] | | 000 | rd | 0000011 | LB |
| imm[11:0] | | 001 | rd | 0000011 | LH |
| imm[11:0] | | 010 | rd | 0000011 | LW |
| imm[11:0] | | 100 | rd | 0000011 | LBU |
| imm[11:0] | | 101 | rd | 0000011 | LHU |
| imm[11:5] | rs2 | 000 | imm[4:0] | 0100011 | SB |
| imm[11:5] | rs2 | 001 | imm[4:0] | 0100011 | SH |
| imm[11:5] | rs2 | 010 | imm[4:0] | 0100011 | SW |
| imm[11:0] | | 000 | rd | 0010011 | ADDI |
| imm[11:0] | | 010 | rd | 0010011 | SLTI |
| imm[11:0] | | 011 | rd | 0010011 | SLTIU |
| imm[11:0] | | 100 | rd | 0010011 | XORI |
| imm[11:0] | | 110 | rd | 0010011 | ORI |
| imm[11:0] | | 111 | rd | 0010011 | ANDI |
| 0000000 | shamt | 001 | rd | 0010011 | SLLI |
| 0000000 | shamt | 101 | rd | 0010011 | SRLI |
| 0100000 | shamt | 101 | rd | 0010011 | SRAI |
| 0000000 | rs2 | 000 | rd | 0110011 | ADD |
| 0100000 | rs2 | 000 | rd | 0110011 | SUB |
| 0000000 | rs2 | 001 | rd | 0110011 | SLL |
| 0000000 | rs2 | 010 | rd | 0110011 | SLT |
| 0000000 | rs2 | 011 | rd | 0110011 | SLTU |
| 0000000 | rs2 | 100 | rd | 0110011 | XOR |
| 0000000 | rs2 | 101 | rd | 0110011 | SRL |
| 0100000 | rs2 | 101 | rd | 0110011 | SRA |
| 0000000 | rs2 | 110 | rd | 0110011 | OR |
| 0000000 | rs2 | 111 | rd | 0110011 | AND |
| 0000 pred | succ | 000 | 00000 | 0001111 | FENCE |
| 0000 0000 | 0000 | 001 | 00000 | 0001111 | FENCE.I |
| 000000000000 | | 000 | 00000 | 1110011 | ECALL |
| 000000000001 | | 000 | 00000 | 1110011 | EBREAK |
| csr | | 001 | rd | 1110011 | CSRRW |
| csr | | 010 | rd | 1110011 | CSRRS |
| csr | | 011 | rd | 1110011 | CSRRC |
| csr | | 101 | rd | 1110011 | CSRRWI |
| csr | | 110 | rd | 1110011 | CSRRSI |
| csr | | 111 | rd | 1110011 | CSRRCI |

画像は下記より
The RISC-V Instruction Set Manual Volume I: User-Level ISA Document Version 2.2

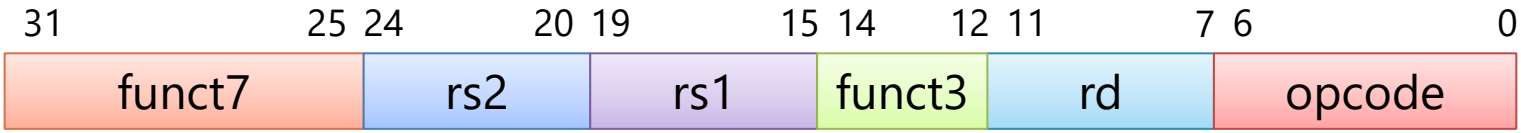
# RISC-V の 基本整数命令の構造

- エンコーディング：R, I, S, U の4タイプがある
  - opcode によって，32 bit 中をどう区切って解釈するかが変わる
  - funct は追加の opcode (opcode が大分類，funct が小分類
- rs1, rs2, rd はオペランド
  - それぞれ 5bit: 2^5=32本のレジスタを指定可能
  - imm は即値




画像は下記より
The RISC-V Instruction Set Manual Volume I: User-Level ISA Document Version 2.2

# R-Type の演算命令

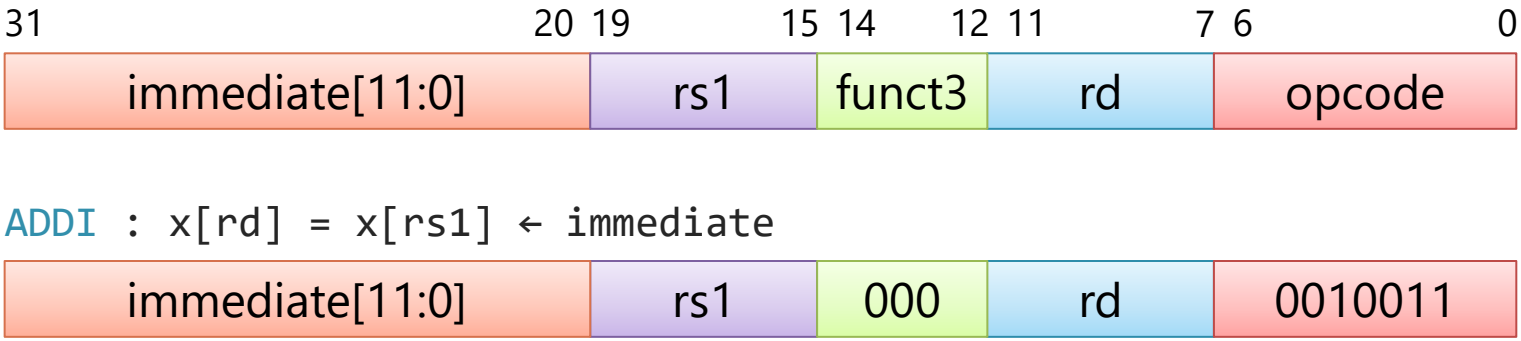



ADD : x[rd] ← x[rs1] + x[rs2]


SUB : x[rd] ← x[rs1] - x[rs2]


- ADD や SUB は R-Type となる
  - opcode = 0110011 は R-Type
  - funct7 の部分で，さらに ADD や SUB を判別

# I-Type の演算命令




- レジスタを読んだ値ではなく，immediate の部分をそのまま演算する

# ADD と ADDI の違い

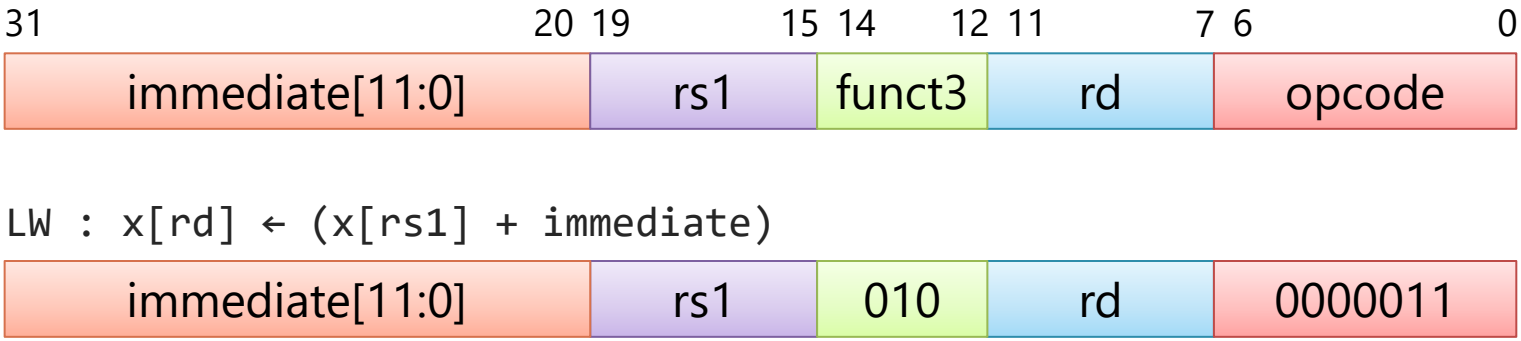
ADDI : x[rd] ← x[rs1] + **immediate**


ADD : x[rd] ← x[rs1] + x[**rs2**]


SUB : x[rd] ← x[rs1] - x[rs2]

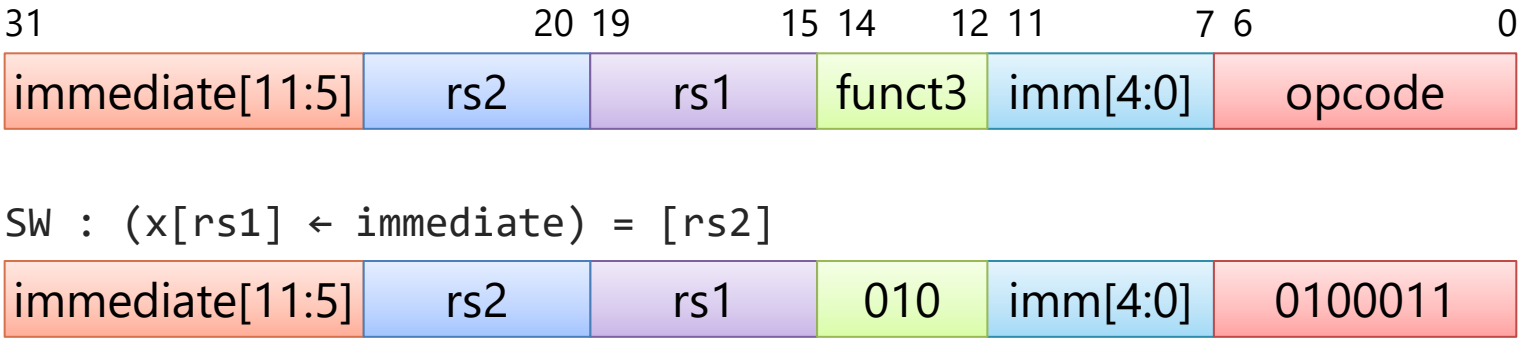

- immediate の部分はなるべくビット幅を大きく取りたい
  - その方がより大きな数が扱える
  - ADDI には専用の opcode: 0010011 を割り当てる
- ADD や SUB はレジスタ番号が表せる 5bit があれば足りる
  - なので，opcode にまとめて funct7 で判別していた

# I-Type のロード命令




- LW：Load Word 命令（4バイトをロード）
  - opcode: 0000011 は ロード命令で I-Type
  - funct3 部分がかわると，バイト数が異なる他のロードに
- `(x[rs1] + immediate)` と加算が入っている
  - レジスタ値に即値を加算してアドレスとできると便利だから
  - `x[rs1]` に構造体の先頭，`immediate` がメンバへの オフセットとか

# S-Type の命令




- SW：Store Word 命令
  - opcode: 0100011 はロード命令で S-Type
  - funct3 部分がかわると，バイト数が異なる他のストアに

# ロードとストアの違い

LW : x[rd] ← (x[rs1] + immediate)


SW : (x[rs1] + immediate) ← [rs2]


- どちらもレジスタのオペランドは２つ
  - しかし，使用するビット位置が違う
  - LW: rd, rs1　/　SW: rs1, rs2
- ストアの rs1 は実際には入力なので，ソースとした方が一貫する
  - 次回講義で補足

# RISC-V の命令フォーマット

- 残りの命令は，大体これのバリエーション

# まとめ

# 今日のまとめ

- 今日の内容
  1. コンピュータの基本
     1. 命令やプログラム，機械語とはなにか
     2. 単純な CPU の構造と動作
  2. C 言語で書かれたプログラムの実行を考える
     1. C 言語と機械語の対応
  3. 命令セットの例：RISC-V

- 次週の予定
  - ◇ 命令パイプライン

# 出欠と感想

- 本日の講義でよくわかったところ，わからなかったところ，質問，感想などを書いてください
  - ◇ LMS の出席を設定するので，そこにお願いします
  - ◇ パスワード
- 意見や内容へのリクエストもあったら書いてください
- LMS の出席の締め切りは来週の講義開始までに設定してあります
  - ◇ 仕様上「遅刻」表示になりますが，特に減点等しません
  - ◇ 来週の講義開始までは感想や質問などを受け付けます