電気工学通論Ⅱ（９）

坂井　修一
東京大学大学院 情報理工学系研究科 電子情報学専攻
東京大学　工学部　電子情報工学科

- 講義の概要と予定
- 命令セットアーキテクチャ

はじめに

- 本講義の目的
  - ディジタル回路とコンピュータアーキテクチャの基礎を学習する
- 時間・場所
  - 火曜日 8:30 – 10:15、工学部2号館213
- ホームページ（ダウンロード可能）
  - url:　http://www.mtl.t.u-tokyo.ac.jp/~sakai/tsuron2/
- 教科書
  - 坂井修一『論理回路入門』（培風館）
  - 坂井修一　『コンピュータアーキテクチャ』（コロナ社）

講義の概要と予定（１／２）

１．ディジタル回路入門

ディジタルとアナログ、２進数、補数表現、四則演算

２．　論理演算

論理演算とは、３つの基本論理演算、NORとNAND、完備性、
ディジタル回路の表現、ブール代数、標準形

３．組み合わせ回路の構成法

真理値表と組合せ回路、組合せ回路の簡単化

４．組合せ回路の実例

加算器、補数、減算器、ＡＬＵ、デコーダ、セレクタなど

５．フリップフロップ

ＦＦ、ＳＲラッチ、Ｄラッチ、非同期と同期、SR-FF、D-FF、
マスタスレーブ形とエッジトリガ形, JK-FF, レジスタ

６．基本的な順序回路

７．一般的な順序回路の作り方

講義の概要と予定（２／２）

８．コンピュータアーキテクチャ入門

計算のサイクル、主記憶装置、メモリの構成と分類、レジスタファイル、命令、命令実行の仕組み、実行サイクル、算術論理演算命令、シーケンサ、条件分岐命令

９．命令セットアーキテクチャ

操作とオペランド、命令の表現形式、アセンブリ言語、命令セット、算術論理演算命令、データ移動命令、分岐命令、アドレシング、サブルーチン、RISCとCISC

10．パイプライン

11．キャッシュと仮想記憶

12．入出力と周辺装置

周辺装置、ディスプレイ、二次記憶装置、ハードウェアインタフェース、割り込みとポーリング、アービタ、DMA、例外処理

試験：　1月14日 8:30-10:00

成績：　出席（小テスト）＋試験　　４年生：追試・レポート無し

９．命令セットアーキテクチャ

- 内容
  - 命令の表現形式とアセンブリ言語
    - 操作とオペランド
    - 命令の表現形式
    - アセンブリ言語
  - 命令セット
    - 算術論理演算命令
    - データ移動命令
    - 分岐命令
  - アドレシング
    - アドレシングの種類
    - バイトアドレシングとエンディアン
    - ゼロレジスタと定数の生成
  - サブルーチンの実現
    - サブルーチンの基本
    - スタックによるサブルーチンの実現
    - サブルーチンのプログラム
  - 練習問題

命令とは何か

- 命令　＝「数」(記号)として表現された操作
  - コンピュータの動作の単位
- 命令の構成要素
  - 操作の種類
  - 操作の対象(オペランド)
    - レジスタ
    - メモリ語:　アドレス(＝ポインタ)で与えられる
    - 即値:　命令に埋め込まれた定数

⇒　すべて2進数で表現される

操作とオペランド

- 命令 ＝ 操作 op ＋ 対象
  - 対象 ＝ オペランド
    - ソースオペランド
    - デスティネーションオペランド
  - オペランドとなるもの
    - データレジスタ
    - メモリ語
    - プログラムカウンタ
    - その他のレジスタ
    - 即値
  - d<= op s （オペランドが1個）
  - d<= s1 op s2 （オペランドが2個）
  - 但しd destination s1,s2 source

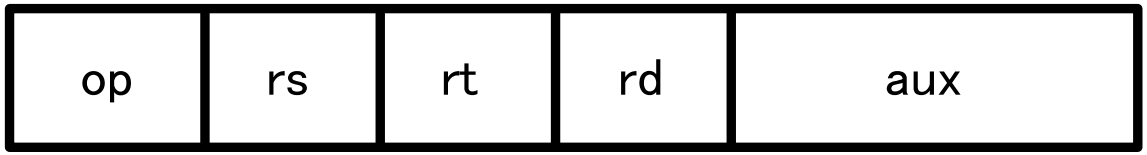
op：	$\log_2$（対象とするコンピュータの命令セットの大きさ）
rs, rt, rd：	$\log_2$（レジスタファイルに含まれるレジスタの数）
aux, imm/dpl, addr：	（命令長）－（他のフィールドのビット数の総和）

図 3.3 命令フィールドの大きさ

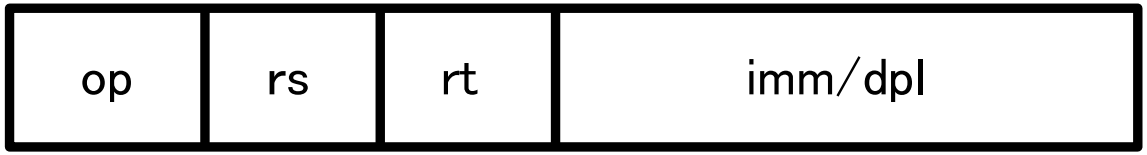
命令セットとは何か？

- 命令セット （instruction set）
  - コンピュータのすべての命令の集まり
- 命令セットアーキテクチャ
  - コンピュータで使われる命令の表現形式と各命令の動作を定めたもの
  - コンピュータに何ができるかをユーザに示し、どのようなハードウェア機構が必要であるかを設計者に教える

命令の表現形式



(1) R型



(2) I型

(3) A型

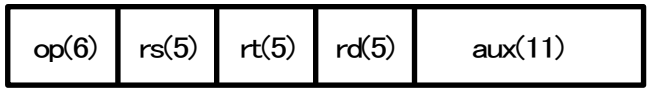
注：
imm:immediateの略
dpl：displacement
addr：address

op: 操作コード、 rs, rt, rd: オペランドレジスタ、aux: 実行細則、
imm/addr: 即値または変位、addr: メモリアドレス

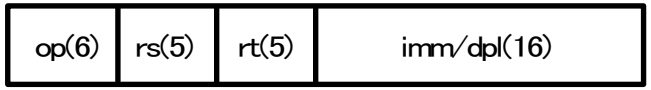
命令フィールドの大きさ

op :	$\log_2$（対象とするコンピュータの命令セットの大きさ）
rs, rt, rd :	$\log_2$（レジスタファイルに含まれるレジスタの数）
aux, imm/dpl, addr :	（命令長）－（他のフィールドのビット数の総和）

図 3.3 命令フィールドの大きさ



(1) R型



(2) I型

(3) A型

図 3.4 命令のフィールド構成（例）

↑　命令語が32ビット、命令セットの大きさが64、レジスタ数が32

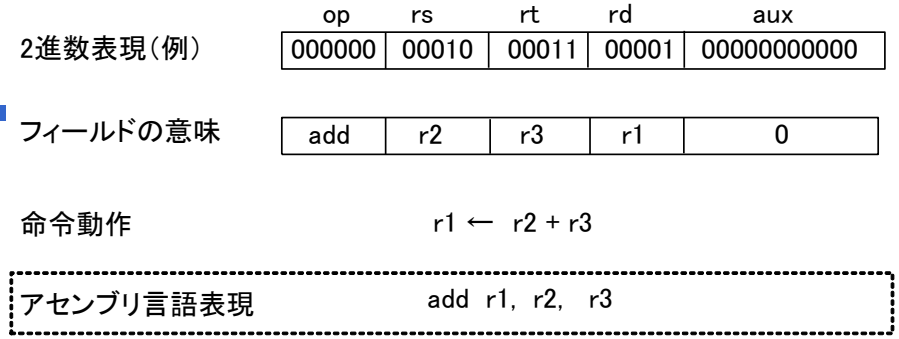
アセンブリ言語

- プログラムの表記
  - 機械語： 2進数で読みにくい
  - アセンブリ言語
    - 英語に近い記号で表記
    - 機械語と1対1対応

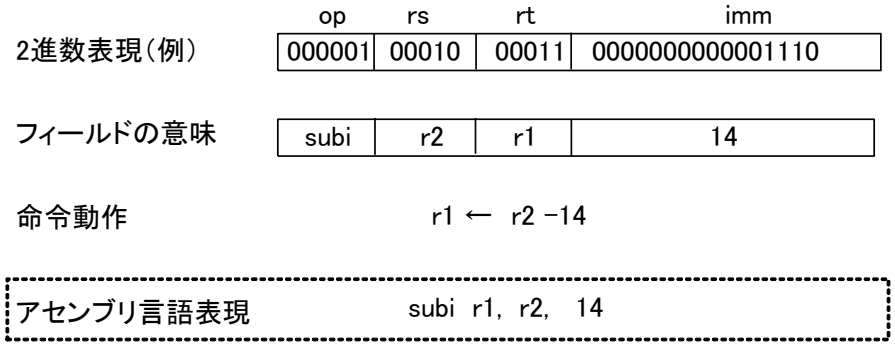
00000001000011000100000000000000

⇔

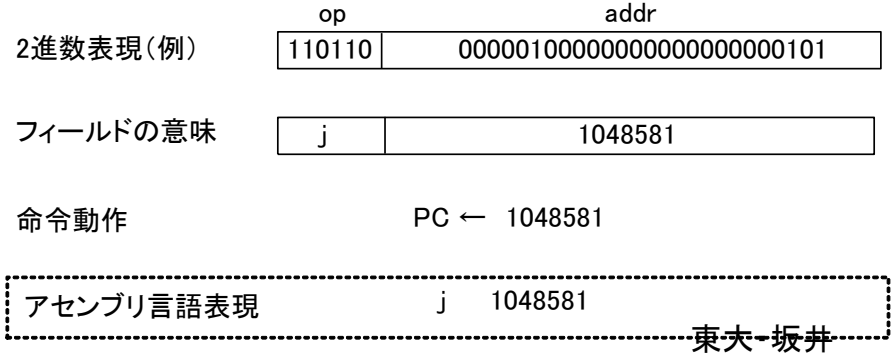
add r1, r2, r3



(a) R型のアセンブリ表現



(b) I型のアセンブリ表現



(c) A型のアセンブリ表現

命令セット

- 命令の分類(復習)
  - 算術論理演算命令
  - データ移動命令
  - 分岐命令

- 算術論理演算命令

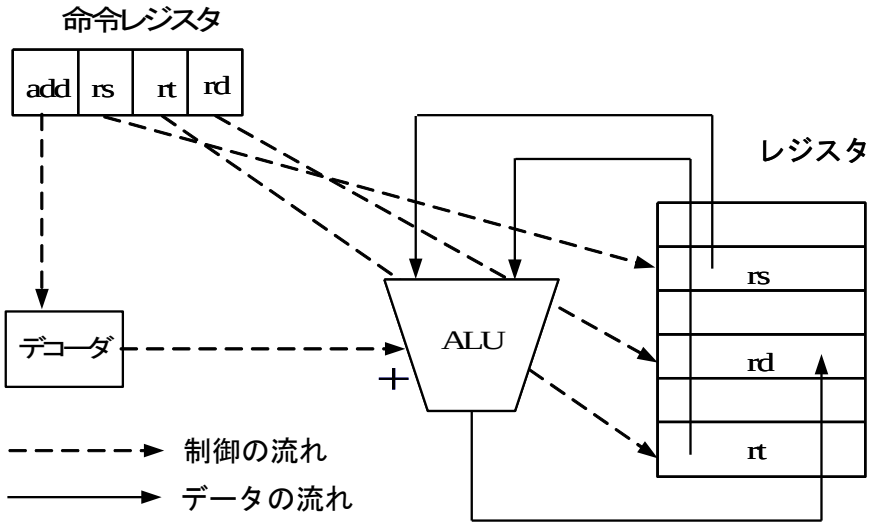
表 3.1 算術演算命令

	整数演算命令		浮動小数点演算命令
	R型	I型	R型
加算	add	addi	fadd
減算	sub	subi	fsub
乗算	mul	muli	fmul
除算	div	divi	fdiv
剰余	rem	remi	
絶対値	abs		fabs
算術左シフト	sla		
算術右シフト	sra		

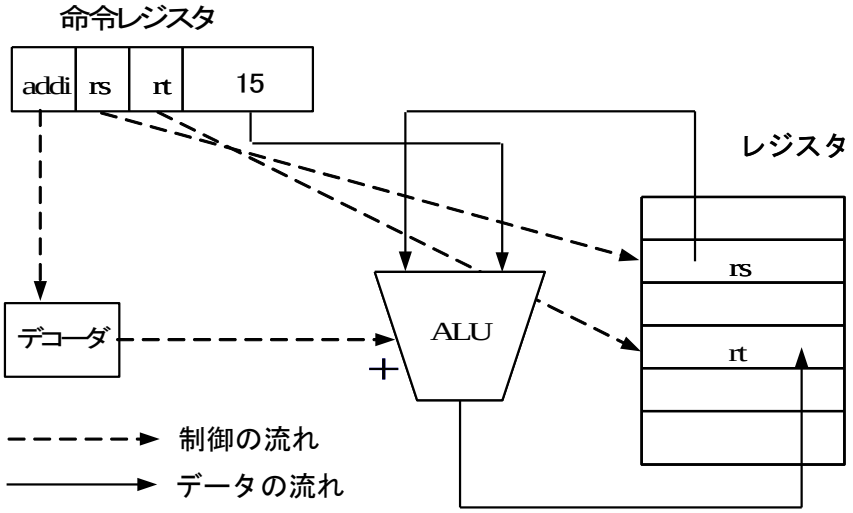
表 3.2 論理演算命令

	R型	I型
論理積	and	andi
論理和	or	ori
否定	not	
NOR	nor	nori
NAND	nand	nandi
排他的論理和	xor	xori
EQUIV	eq	eqi
論理左シフト	sll	
論理右シフト	srl	

算術論理演算命令の動作例

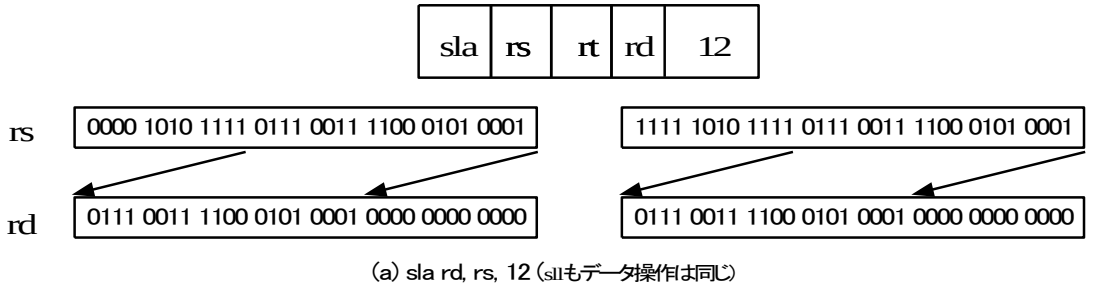


(a) add rd, rs, rt



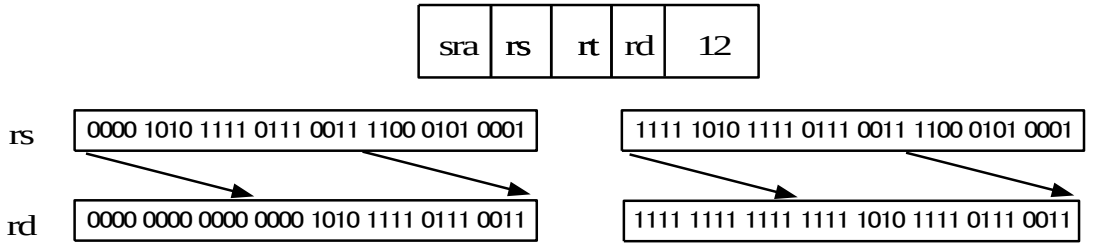
(b) addi rt, rs, 15

シフト命令

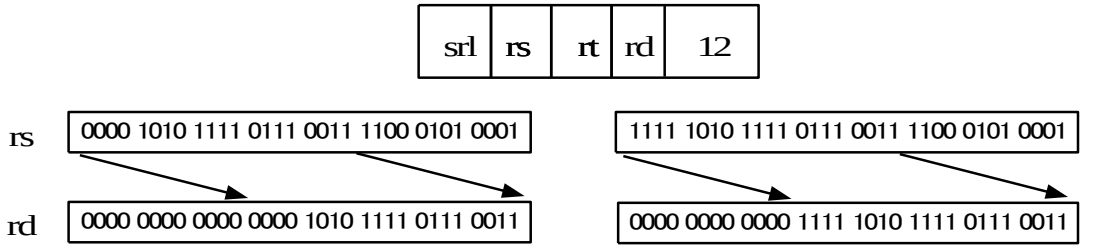


(a) sla rd, rs, 12 (sllもデータ操作は同じ)

ia32の場合



(b) sra rd, rs, 12



(c) srl rd, rs, 12

図 3.7 シフト命令

データ移動命令

表 3.3　データ移動命令

移動量	メモリ ⇒ レジスタ		レジスタ ⇒ メモリ	
64ビット	ld	load double word	sd	store double word
32ビット	lw	load word	sw	store word
16ビット	lh	load half word	sh	store half word
8ビット	lb	load byte	sb	store byte

©Shuichi Sakai

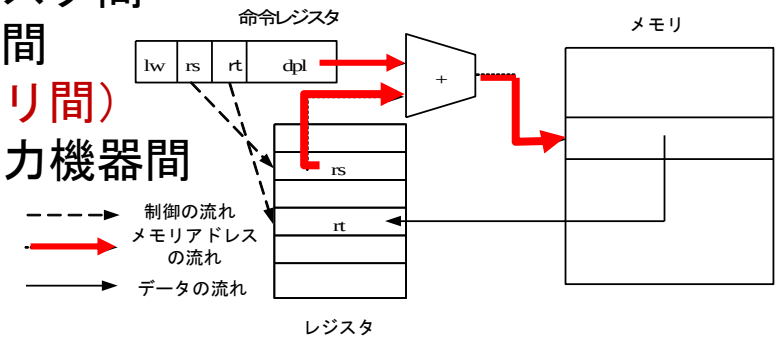
データ移動命令

レジスタレジスタ間

メモリレジスタ間

（メモリ・メモリ間）

メモリと入出力機器間



©Shuichi Sakai

メモリ＝＞レジスタ

Load 命令

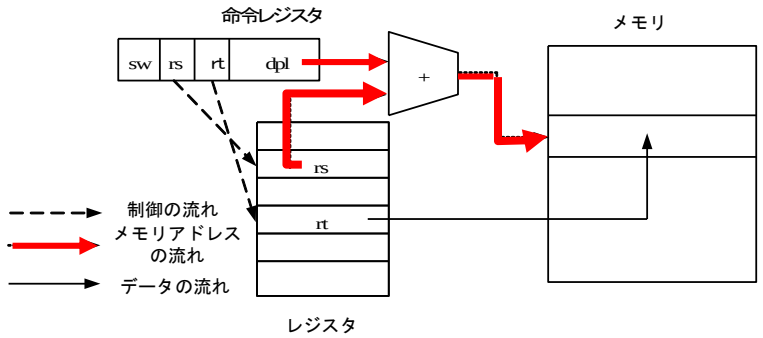
(a) lw rt dpl(rs)

レジスタ＝＞メモリ

Store命令

（メモリ＝＞メモリ間

Move命令）



©Shuichi Sakai

(b) sw rt dpl(rs)

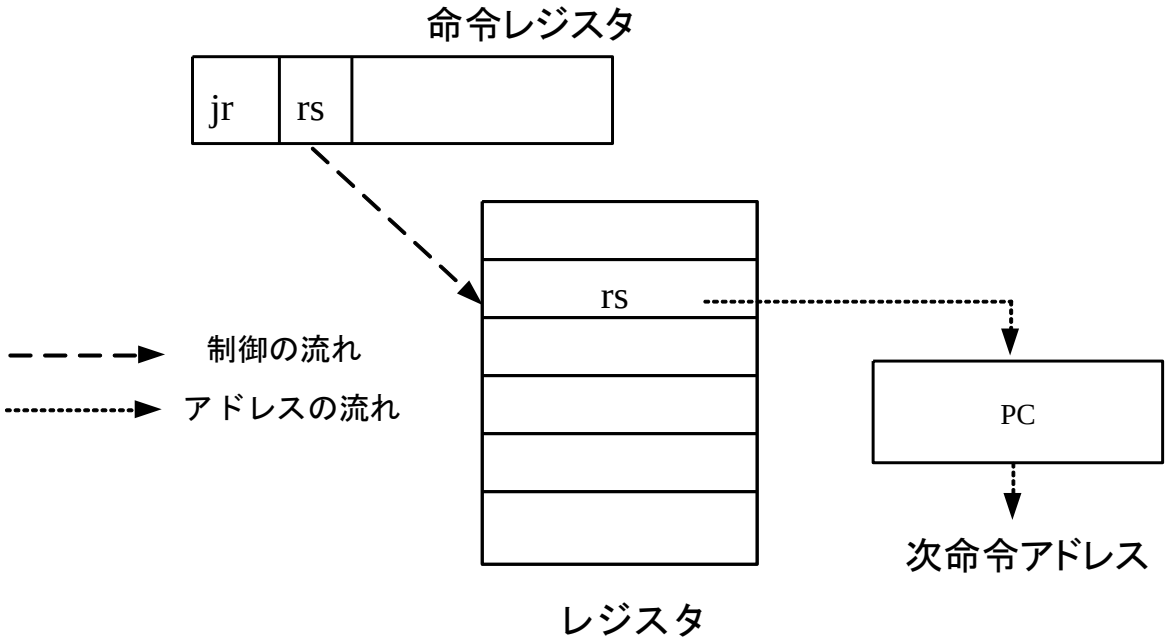
図 3.8　データ移動命令の動作

分岐命令(1)： 無条件分岐命令

表 3.4　無条件分岐命令

命令	意味	形式	アセンブリ言語の表現	動作
j	jump	A	j addr	pc ← addr
jr	jump register	R	jr rs	pc ← (rs)
jal	jump and link	A	jal addr	r31 ← (pc) +4; pc ← addr

サブルーチンコール用



分岐命令(2):条件分岐命令

表 3.5　条件分岐命令

命令	意味	形式	アセンブリ言語の表現	動作
beq	branch on equal	I	beq rs, rt, dpl	rs = rt ならば pc = (pc) +4+dpl
bne	branch on not equal	I	bne rs, rt, dpl	rs<>rt ならば pc = (pc) +4+dpl
blt	branch on less than	I	blt rs, rt, dpl	rs<rt ならば pc = (pc) +4+dpl
ble	br. on less than or eq.	I	ble rs, rt, dpl	rs<=rt ならば pc = (pc) +4+dpl

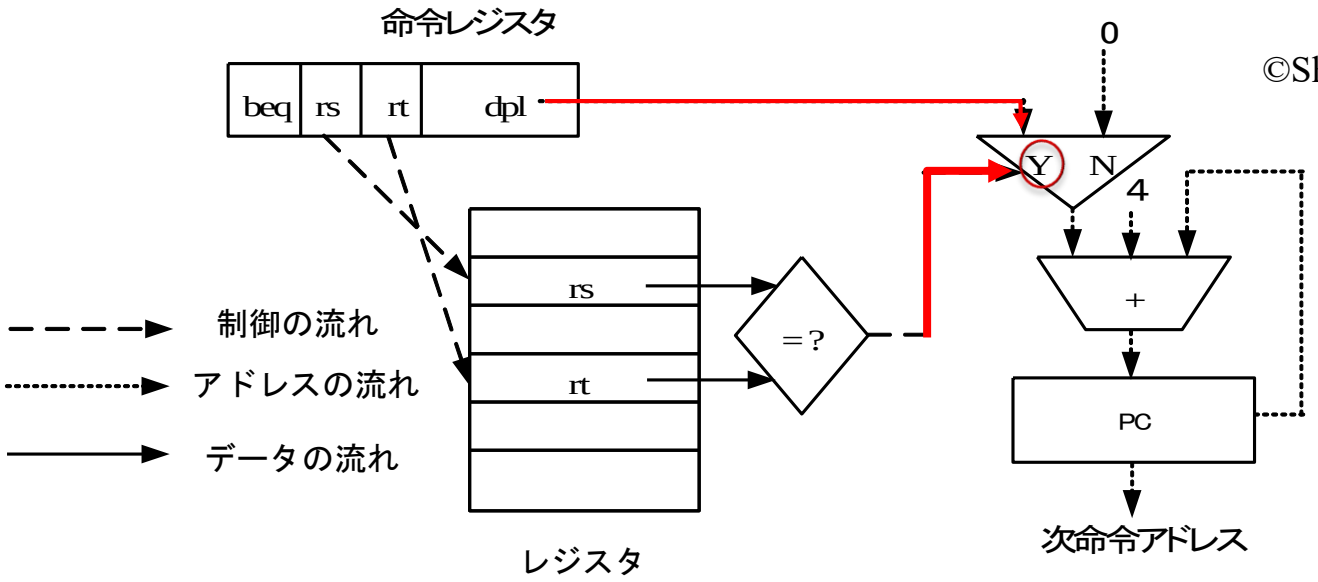


図 3.10　条件分岐命令の動作

分岐命令(2):条件分岐命令

表 3.5　条件分岐命令

命令	意味	形式	アセンブリ言語の表現	動作
beq	branch on equal	I	beq rs, rt, dpl	rs = rt ならば pc = (pc) +4+dpl
bne	branch on not equal	I	bne rs, rt, dpl	rs<>rt ならば pc = (pc) +4+dpl
blt	branch on less than	I	blt rs, rt, dpl	rs<rt ならば pc = (pc) +4+dpl
ble	br. on less than or eq.	I	ble rs, rt, dpl	rs<=rt ならば pc = (pc) +4+dpl

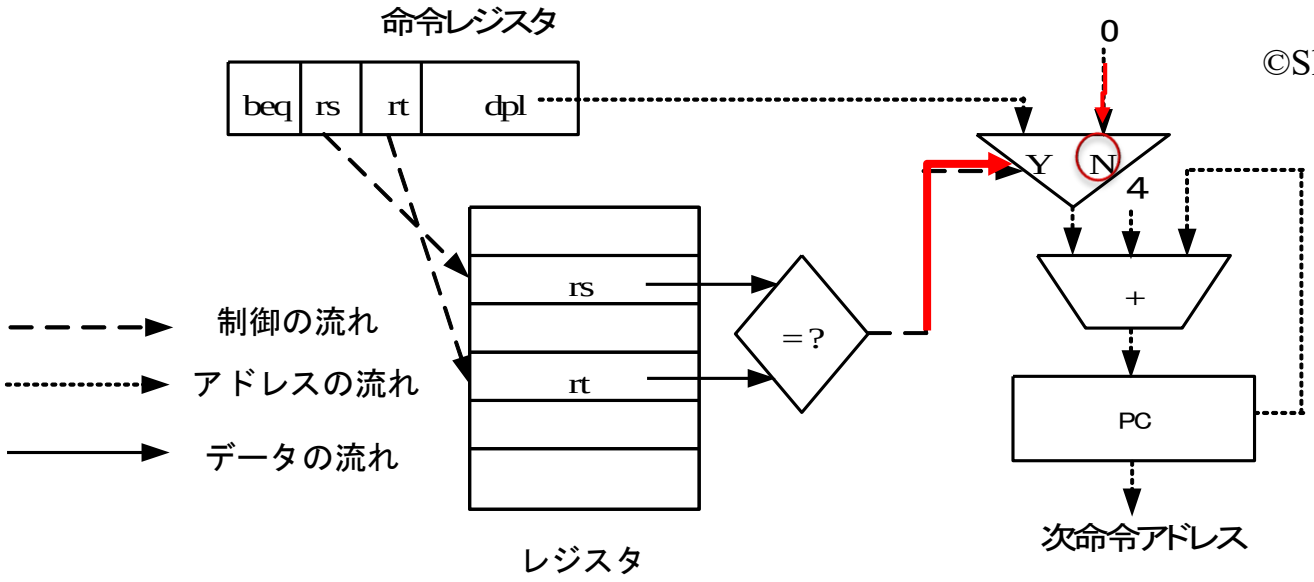


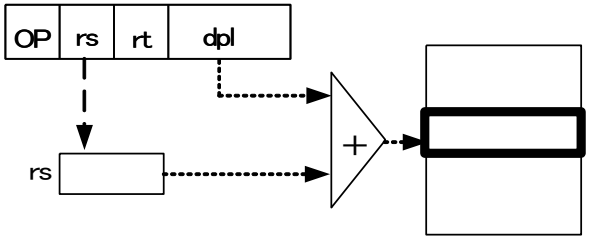
図 3.10　条件分岐命令の動作

アドレシング

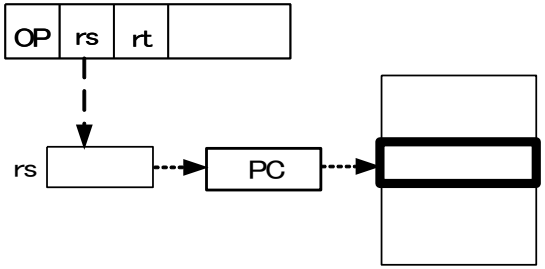
表 3.6 アドレシング

アドレシング方式	命令の例（アセンブリ言語）	生成されるアドレス
即値アドレシング	addi rt, rs, imm	（直接値 imm を生成）
ベース相対アドレシング	lw rt, dpl（rs）	（rs） + dpl
レジスタ・アドレシング	j rs	（rs）
PC 相対アドレシング	beq rs, rt, dpl（分岐するとき）	（pc）+4+dpl

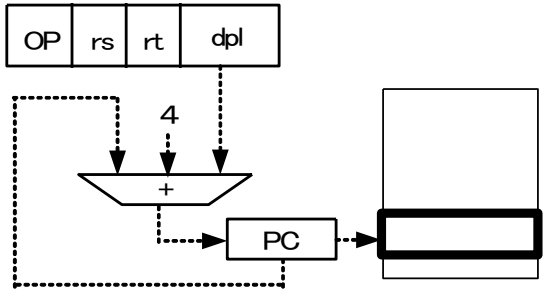
(a) 即値アドレシング



(b) ベースアドレシング



(c) レジスタアドレシング



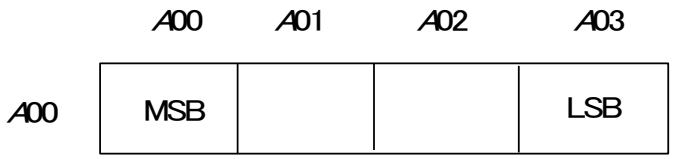
(d) PC相対アドレシング

図 3.11　アドレシング

バイトアドレシングとエンディアン

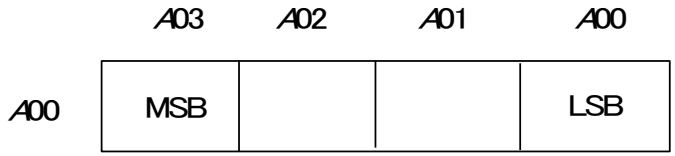
◆バイトアドレシング：　アドレシングの単位を「語」ではなく「バイト」とするアドレシング
普通のメモリアドレシングはバイトアドレシング

◆エンディアン：　語の中のバイトの配列順を定めたもの



A00に最上位バイトが入り、A01, A02, A03の順で下位バイトが入る

(a) ビッグエンディアン



A03に最上位バイトが入り、A02, A01, A00の順で下位バイトが入る

(b) リトルエンディアン

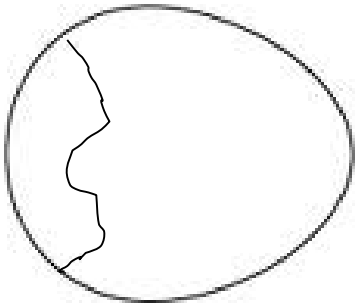
MSB: Most Significant Byte （最上位バイト）、LSB: Least Significant Byte （最下位バイト）

図 3.12 ビッグエンディアンとリトルエンディアン

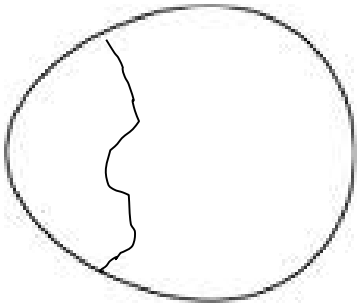
ビッグエンディアンとリトルエンディアン

- 『ガリバー旅行記』「小人国」から
  - リリパット国： ゆで卵は大きい端(Big End)から割る ⇒ Big Endian
  - ブレフスキュ国:ゆで卵は小さい端(Little End)から割る ⇒ Little Endian

※ プロテスタントとカトリック、あるいは英仏の諍いをたとえたもの。スイフトにとっては、「くだらない諍い！」



ビッグエンディアン



リトルエンディアン

ガリバーとエンディアン

ゼロレジスタと定数の生成

- ゼロレジスタ
  - 恒常的に”0”が入っているレジスタ（定数）
  - この授業ではr0がゼロレジスタとする

addi r1, r0, 28

（a） 定数の生成（16 ビット）

addi r1, r0, 0101010101010101

sla r1 r1 16

ori r1, r1, 0000000011111111

（b） 定数の生成（32 ビット）

eq r1 r0 r1

（c） ビット反転

図 3.13　ゼロレジスタによる定数の生成とビット反転

サブルーチン

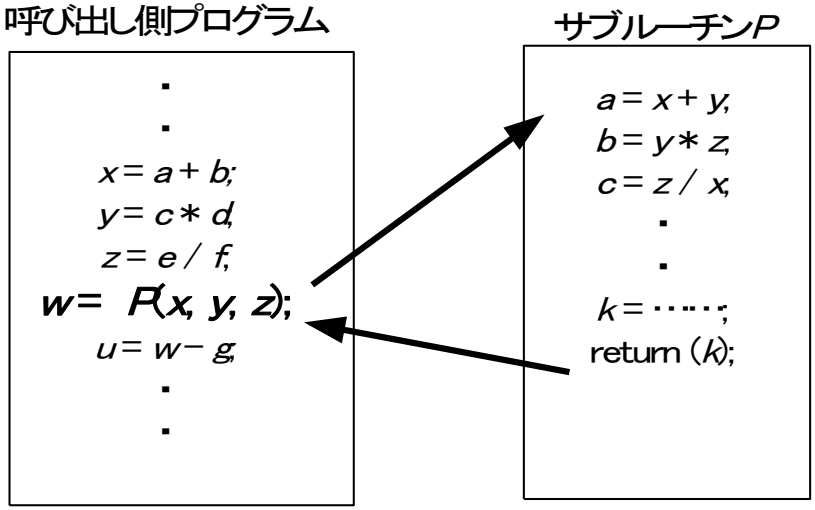
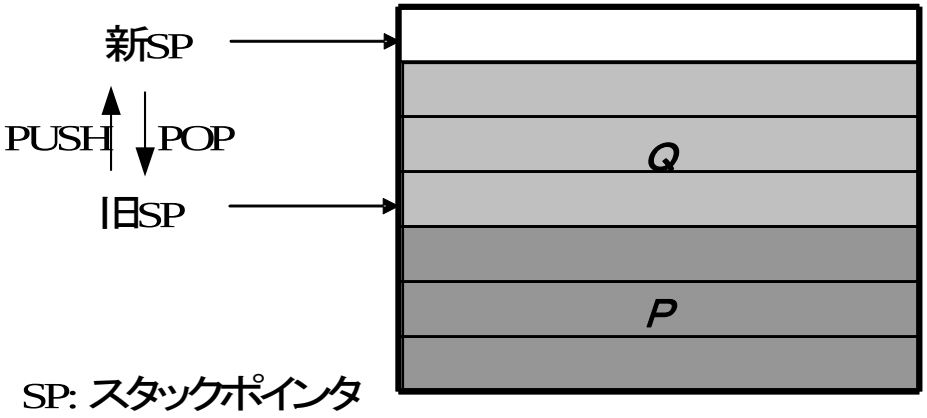


図 3.14 サブルーチンの基本形

(1) レジスタ値の待避
(2) 戻り番地（次の命令番地）の待避
(3) サブルーチンの先頭番地へのジャンプ
(4) サブルーチン本体の実行
(5) 戻り番地へのジャンプ
(6) レジスタ値の復帰
(7) もとの命令列の実行再開

図 3.15 サブルーチンの手順

スタックによるサブルーチンの実現



スタック

スタック
＝　LIFO型メモリ

LIFO = Last In First Out

P→ *Q*→ *R*の順でサブルーチンが呼ばれたとき

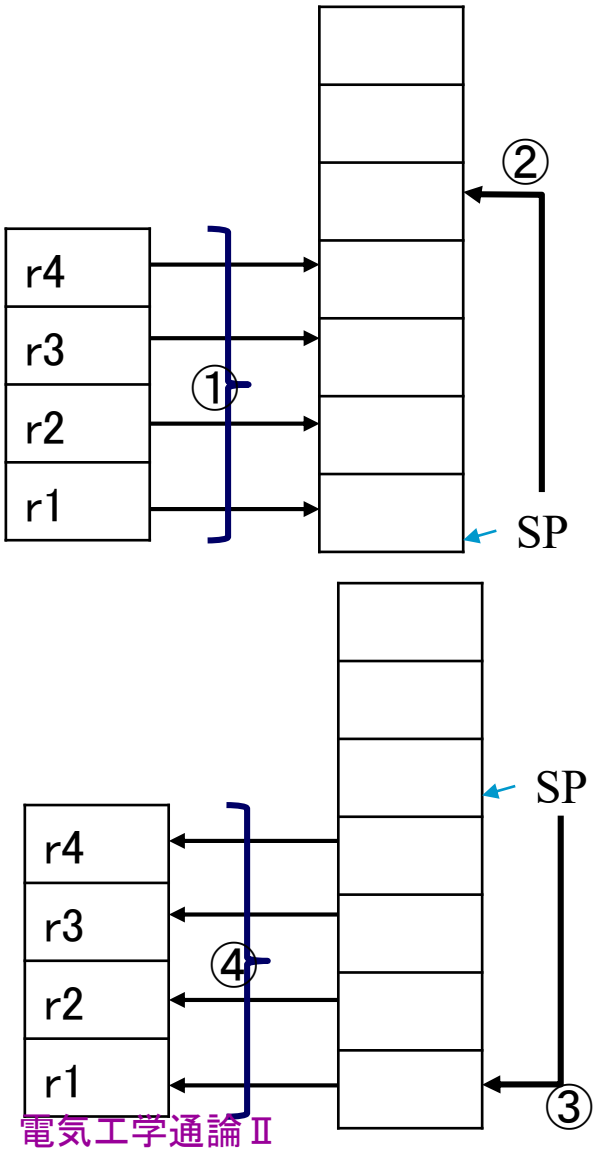
図 3.16 スタックとサブルーチン

```
sw r1, 0(sp)          sub sp sp 4
add sp sp 4           lw r1, 0(sp)
```

(a) プッシュ　　(b) ポップ

図 3.17 スタック操作のプログラム

サブルーチンのプログラム




```
①  swr1 0(sp)        ;   レジスタ値の待避（必要なだけ）始め
   swr2 4(sp)
   .....
   swrk 4k(sp)       ;   レジスタ値の待避終わり
②  add sp 4k+4
   jal address
③  sub sp 4k+4
④  lwr1 0(sp)        ;   レジスタ値の復帰始め
   lwr2 4(sp)
   .....
   lwrk 4k(sp)       ;   レジスタ値の復帰終わり
   もとの仕事の続き
   ..............
```



```
address:  ......        サブルーチン本体
          ......
          ......
          jr  r31
```

図 3.18　サブルーチンのアセンブラプログラム

RISCとCISC

- プロセッサの分類
  - RISC： Reduced Instruction Set Computer
  - CISC: Complex Instruction Set Computer

	RISC	CISC
命令数	少ない	多い
命令形式	一語固定長	可変長
個々の命令動作 (アドレシングモード)	単純	複雑
レジスタ数	多い	少ない
例	Sun Sparc MIPS R10000 IBM PowerPC Comaq Alpha	Intel X86 Motorola M68000

RISC vs. CISC

- 歴史的な考察
  - CISCが先にあった（1960年代頃～）
    - レジスタは高価
    - 命令の種類（特にアドレッシングの種類）は多数あればユーザの要求に応えられると考えられた
  - CISCへの反省
    - じっさいの計算では、ほとんどが単純な命令
    - 複雑な命令
      - コンパイラが出力するのが難しい
      - 単純な命令の組合せで実現可能
  - RISCの発案と展開
    - 1980年代の潮流： Cocke (IBM, Turing Award Winner), Patterson(UCB), Hennessy(Stanford)ら
    - 「RISCはCISCより速い」は真実！
    - IntelにおいてもCISC命令をRISCに解釈し直して実行している