計算機構成論 第8回
―命令の実行(2)―

大連理工大学・立命館大学 国際情報ソフトウェア学部

大森 隆行

講義内容

- 命令の実行
  - コンパイラ
  - アセンブラ
  - リンカ
  - ローダ
- Cプログラムからアセンブリコードへの変換
  - swap, sortを例に

C言語での開発

main.c

```
int main(){
 ...
 printf("Hello");
 ...
 proc();
 ...
}
```

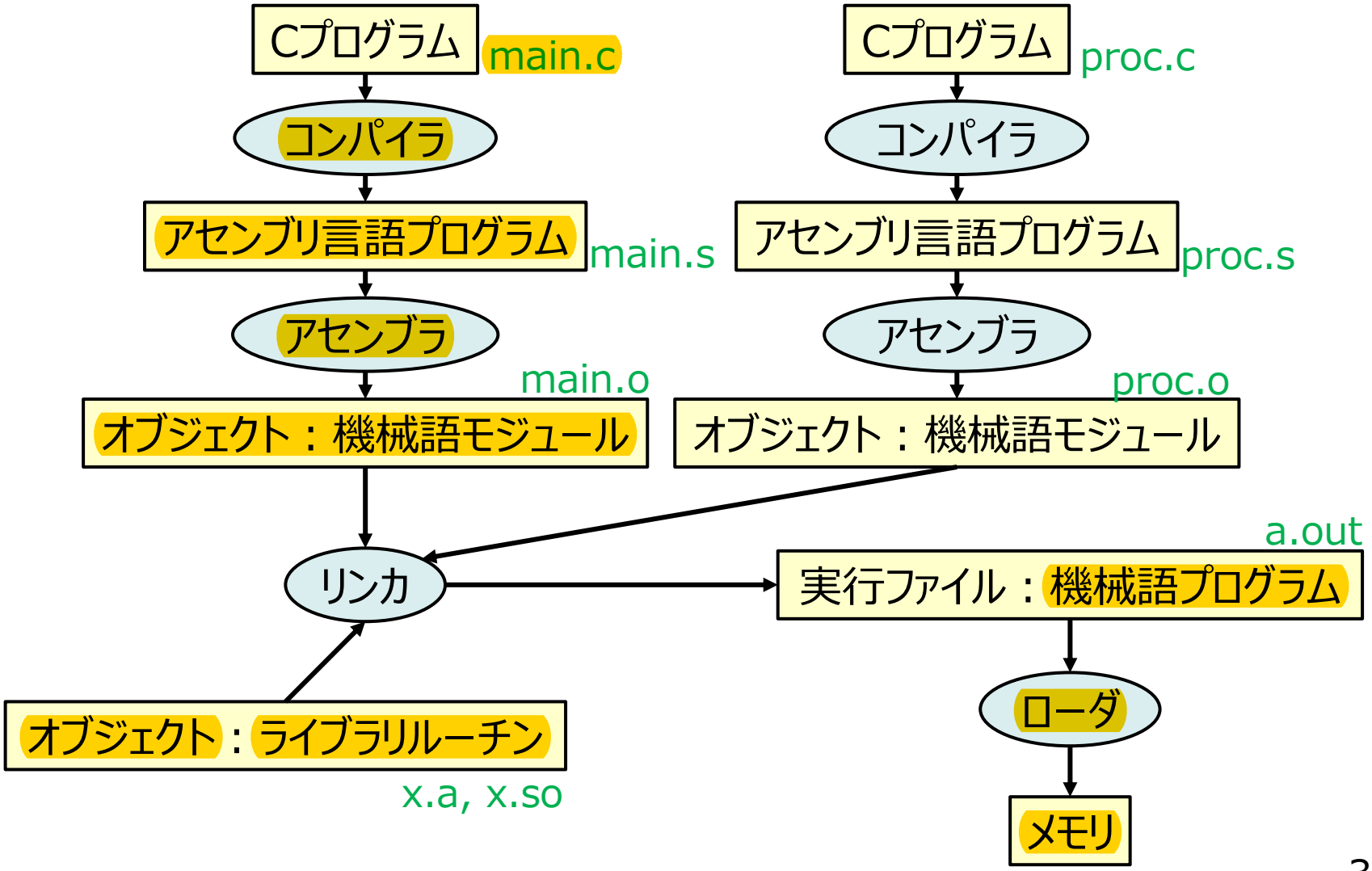
標準ライブラリ

proc.c

```
void proc(){
 ...
 ...
 ...
}
```

- C言語でのプログラム開発では、複数のファイルを使うのが一般的
- 標準ライブラリも使用
  - stdio.h, stdlib.h 等々

Cプログラムが起動するまで



コンパイラ

- ソースコードをアセンブリコードに変換
  - 機械が解釈できるコードを
    シンボル(記号)で表したもの
  - (基本的に)機械語と一対一変換可能
  - アセンブリコードには擬似命令が
    含まれることがある
    - 擬似命令：アセンブリ言語の命令セットには
      含まれないが、簡便化のため用意されている命令
      e.g., blt (branch less than),
      move (レジスタ間のデータコピー)

講義内容

- 命令の実行
  - コンパイラ
  - アセンブラ
  - リンカ
  - ローダ
- Cプログラムからアセンブリコードへの変換
  - swap, sortを例に

アセンブラ

- アセンブリコードを機械語に変換
  - オブジェクトファイルに出力 (後述)
- 擬似命令を実際の命令に置き換える

e.g., blt $t0, $t1, Label

→ slt $t2, $t0, $t1

bne $t2, $zero, Label

move $t0, $t1

→ add $t0, $zero, $t1

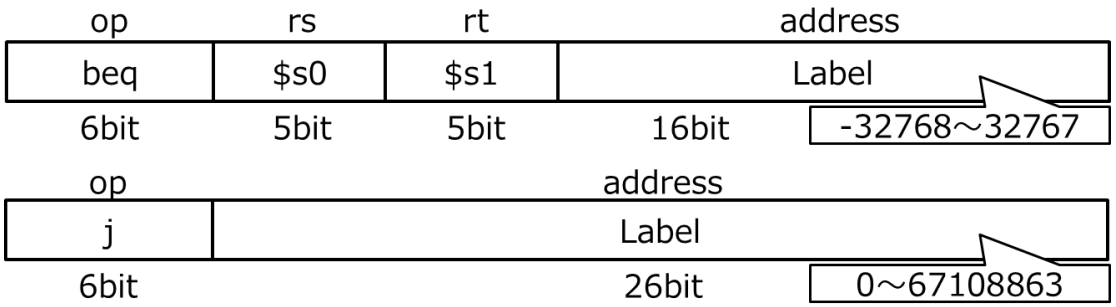
アセンブラ

- 遠くへの分岐を、分岐＋ジャンプに変換

```
beq $s0, $s1, L1
```

⇩

```
    bne $s0, $s1, L2
    j L1
L2:
```



- シンボル・テーブルの生成
  - ラベル名と命令のアドレスの対応を管理

アセンブラ

- オブジェクトファイルの生成
  - 以下の６セクションで構成 (UNIXの場合)
    - オブジェクト・ファイル・ヘッダー (object file header)
      - テキスト・セグメント、静的データ・セグメントのサイズを示す
    - テキスト・セグメント (text segment)
      - 機械語のプログラムコード
    - 静的データ・セグメント (static data segment)
      - 実行中に割り当てられるデータ
    - リロケーション情報 (relocation information)
      - プログラムをメモリにロードしたときの絶対アドレスに依存する命令語、データ語を示す
    - シンボル・テーブル (symbol table)
      - 未定義のラベルを保持(外部参照に使用)
    - デバッグ情報 (debugging information)
      - コンパイルに関する情報。デバッガ等で使用される

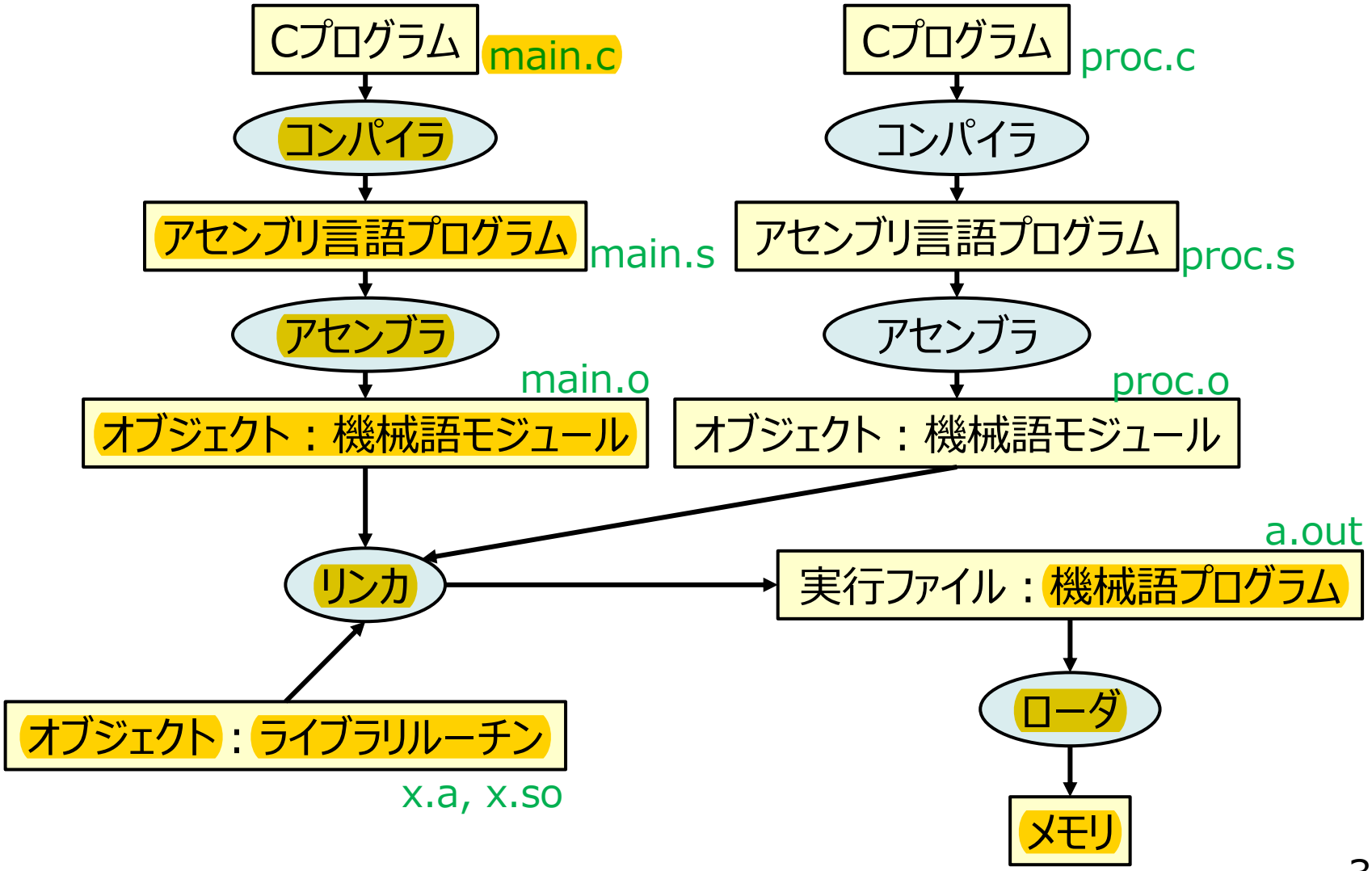
講義内容

- 命令の実行
  - コンパイラ
  - アセンブラ
  - リンカ
  - ローダ
- Cプログラムからアセンブリコードへの変換
  - swap, sortを例に

リンカ

- それぞれ個別にコンパイル、アセンブルされたプログラムをつなぎ合わせて、1つの実行可能なオブジェクトファイルを作る
  - 大規模なプログラムの全体をコンパイルし直す必要がなくなる
  - ライブラリのような再利用性の高いものを後からリンクする
  - 外部参照を解決(e.g., 他のファイルにあるラベル名)
  - メモリ上のプログラムの配置を決定
    - 絶対アドレシング(ベース相対アドレシングでないもの)のアドレスを調整(relocation)

Cプログラムが起動するまで



(例) リンカの働き

※赤の箇所はリンク過程で更新されるデータ

ProcA.o

ヘッダー	名前	ProcA
	テキスト・サイズ	100 16
	データ・サイズ	20 16

テキスト・セグメント	アドレス	命令
	0	`lw $a0, 0($gp)`
	4	`jal 0`
	…	…

静的データセグメント	アドレス	データ
	0	(x)
	…	…

リロケーション情報	アドレス	命令タイプ	依存関係
	0	lw	x
	4	jal	ProcB
	…	…	

シンボルテーブル	ラベル	アドレス
	x	-
	procB	-
	…	…

ProcB.o

ヘッダー	名前	ProcB
	テキスト・サイズ	200 16
	データ・サイズ	30 16

テキスト・セグメント	アドレス	命令
	0	`sw $a1, 0($gp)`
	4	`jal 0`
	…	…

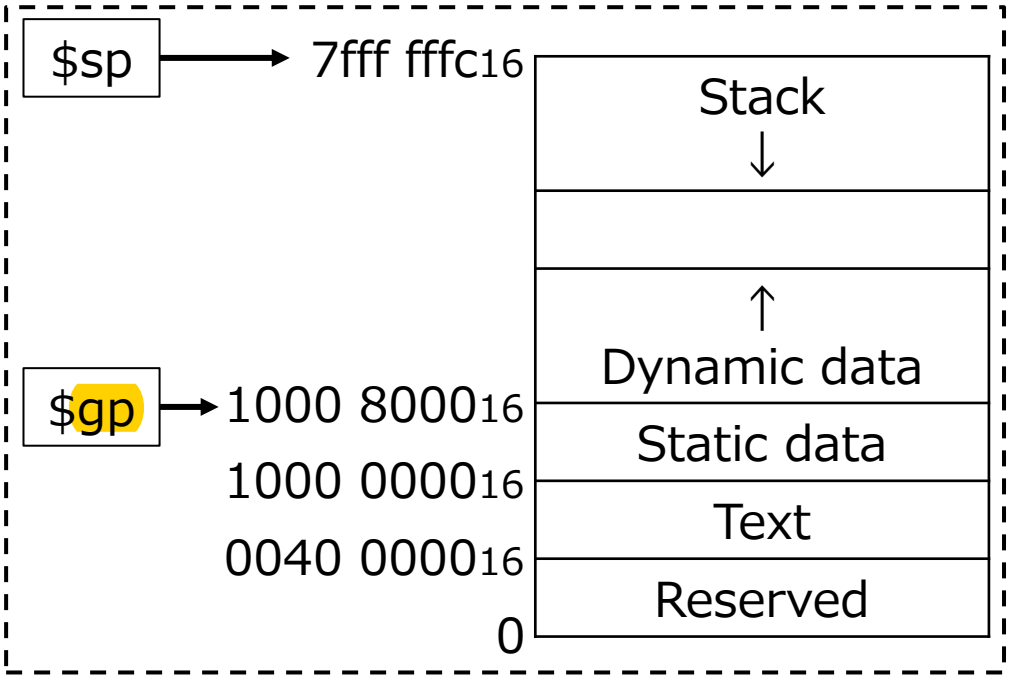
静的データセグメント	アドレス	データ
	0	(y)
	…	…

リロケーション情報	アドレス	命令タイプ	依存関係
	0	sw	y
	4	jal	ProcA
	…	…	

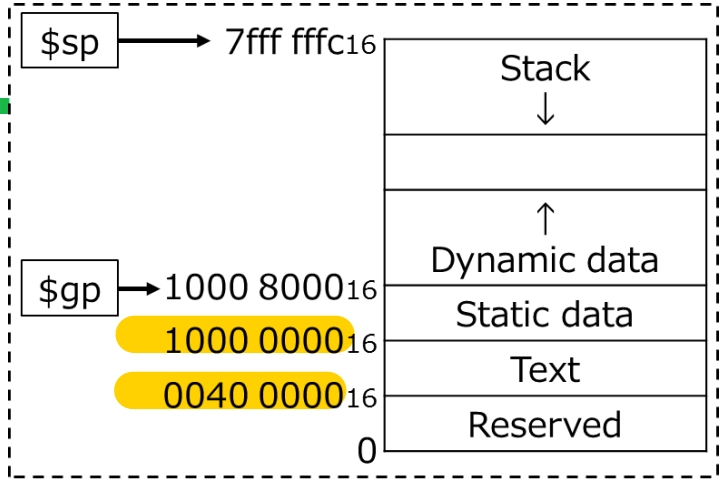
シンボルテーブル	ラベル	アドレス
	y	-
	procA	-
	…	…

(例) リンカの働き

実際のメモリ上の配置(仮定)



(例) リンカの働き



Linked.o

ヘッダー	テキスト・サイズ	300 16
	データ・サイズ	50 16

テキスト セグメント	アドレス	命令
	$0040\ 0000_{16}$	lw $a0, 8000_{16}($gp)
	$0040\ 0004_{16}$	jal $40\ 0100_{16}$
	…	…
	$0040\ 0100_{16}$	sw $a1, 8020_{16}($gp)
	$0040\ 0104_{16}$	jal 40 0000_{16}
	…	

静的データ セグメント	アドレス	データ
	$1000\ 0000_{16}$	(x)
	…	…
	$1000\ 0020_{16}$	(y)
	…	…

ProcA.o

ヘッダー	名前	ProcA
	テキスト・サイズ	10016
	データ・サイズ	2016

テキスト・セグメント	アドレス	命令
	0	lw $a0, 0($gp)
	4	jal 0
	…	…

静的データ セグメント	アドレス	データ
	0	(x)
	…	…

リロケーション情報	アドレス	命令タイプ	依存関係
	0	lw	x
	4	jal	ProcB
	…	…	

シンボル テーブル	ラベル	アドレス
	x	-
	procB	-
	…	…

ProcB.o

ヘッダー	名前	ProcB
	テキスト・サイズ	20016
	データ・サイズ	3016

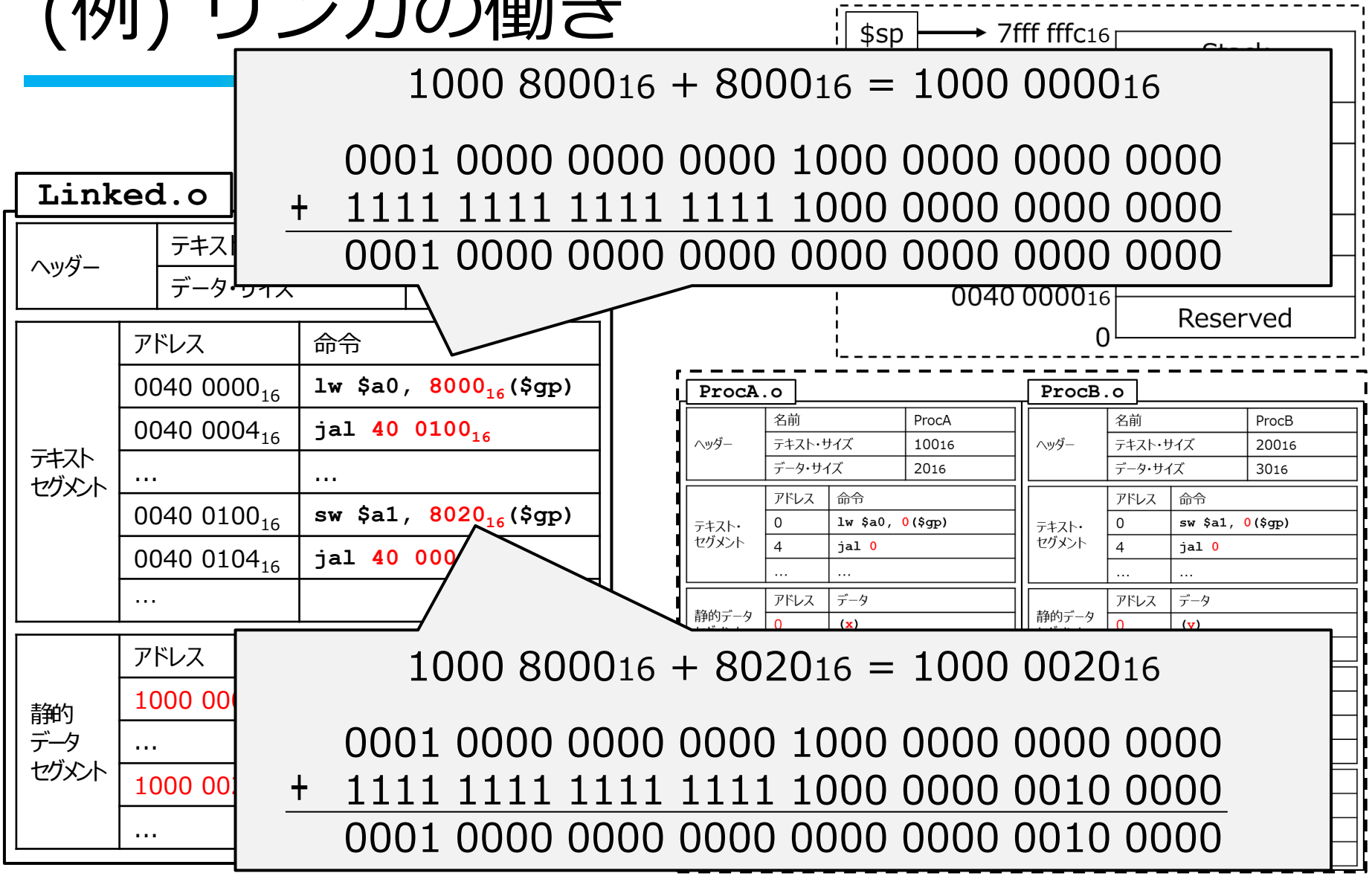
テキスト・セグメント	アドレス	命令
	0	sw $a1, 0($gp)
	4	jal 0
	…	…

静的データ セグメント	アドレス	データ
	0	(y)
	…	…

リロケーション情報	アドレス	命令タイプ	依存関係
	0	sw	y
	4	jal	ProcA
	…	…	

シンボル テーブル	ラベル	アドレス
	y	-
	procA	-
	…	…

(例) リンカの働き


$sp
7fff fffc16
0040 000016
Reserved
0
1000 800016 + 800016 = 1000 000016
0001 0000 0000 0000 1000 0000 0000 0000
+ 1111 1111 1111 1111 1000 0000 0000 0000
0001 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
Linked.o
ヘッダー
テキスト
データ・サイズ
テキスト セグメント
アドレス
命令
0040 0000$_{16}$ lw $a0, 8000$_{16}$($gp)
0040 0004$_{16}$ jal 40 0100$_{16}$
… …
0040 0100$_{16}$ sw $a1, 8020$_{16}$($gp)
0040 0104$_{16}$ jal 40 000
…
静的 データ セグメント
アドレス
1000 00
…
1000 00
…
ProcA.o
ヘッダー
名前 ProcA
テキスト・サイズ 10016
データ・サイズ 2016
テキスト・セグメント
アドレス 命令
0 lw $a0, 0($gp)
4 jal 0
… …
静的データ
アドレス データ
0 (x)
ProcB.o
ヘッダー
名前 ProcB
テキスト・サイズ 20016
データ・サイズ 3016
テキスト・セグメント
アドレス 命令
0 sw $a1, 0($gp)
4 jal 0
… …
静的データ
アドレス データ
0 (y)
1000 800016 + 802016 = 1000 002016
0001 0000 0000 0000 1000 0000 0000 0000
+ 1111 1111 1111 1111 1000 0000 0010 0000
0001 0000 0000 0000 0000 0000 0010 0000

講義内容

- 命令の実行
  - コンパイラ
  - アセンブラ
  - リンカ
  - ローダ
- Cプログラムからアセンブリコードへの変換
  - swap, sortを例に

ローダ

- リンク後のオブジェクトファイルをメモリに読み込む
- main関数を実行する環境を用意
- 最初の命令を呼び出す

- 動的にリンクされるライブラリ(DLL: dynamically linked library)
  - 呼び出すためのダミールーチンのみ用意して、必要になったときに、必要な命令をテキスト領域に配置する

確認問題

- 次の各文は、それぞれ何について説明したものか答えよ
  - ソースコードをアセンブリコードに変換するソフトウェア
  - アセンブリコードを機械語に変換するソフトウェア
  - 複数の機械語のコードをつなぎあわせて
    1つのオブジェクトファイルを作るソフトウェア
- 次の各項目は、オブジェクトファイルを構成する
  6つのセクションに保持されるものを示している。
  それぞれ、どのセクションか答えよ
  - テキスト・セグメント、静的データ・セグメントのサイズ
  - 機械語のプログラムコード
  - 実行中に割り当てられるデータ
  - プログラムをメモリにロードしたときの
    絶対アドレスに依存する命令語、データ語
  - 未定義のラベル
  - デバッガ等で使用されるコンパイルに関する情報

(a) 静的データ・セグメント
(b) リロケーション情報
(c) オブジェクト・ファイル・ヘッダ
(d) シンボル・テーブル
(e) デバッグ情報
(f) テキスト・セグメント

講義内容

- 命令の実行
  - コンパイラ
  - アセンブラ
  - リンカ
  - ローダ
- Cプログラムからアセンブリコードへの変換
  - swap, sortを例に

Cプログラムからアセンブリコードへの変換

- 以下のC言語のソースコードをアセンブリコードに直せ。

```
void swap(int v[], int k){
 int t;
 t = v[k];
 v[k] = v[k+1];
 v[k+1] = t;
}
```

レジスタ割り付け：
$a0:v $a1:k
$t0:t

```
swap:
 sll $t1, $a1,  (1)   #$t1 = k*4
 add $t1, (2),  (3)   #$t1 = &(v[k])
 lw  $t0, ( 4 )       #t = v[k]
 lw  $t2, ( 5 )       #$t2 = v[k+1]
 sw  $t2, ( 6 )       #v[k] = $t2
 sw  $t0, ( 7 )       #v[k+1] = t
 jr  $ra              #return
```

Cプログラムからアセンブリコードへの変換

- 以下のC言語のソースコードをアセンブリコードに直せ。

```
void sort(int v[], int n){
 int i, j;
 for(i=0; i<n; i++){
  for(j=i-1; j>=0 && v[j]>v[j+1]; j--){
   swap(v,j);
}}}
```

```
$a0:v $a1:n
$s0:i $s1:j
```

- 手順
  - ①レジスタの退避
  - ②引数の退避
  - ③外側のループ
  - ④内側のループ
  - ⑤swap呼出
  - ⑥内側のループ
  - ⑦外側のループ
  - ⑧レジスタ復元～

Cプログラムからアセンブリコードへの変換

- 以下のC言語のソースコードをアセンブリコードに直せ。

```
void sort(int v[], int n){
 int i, j;
 for(i=0; i<n; i++){
  for(j=i-1; j>=0 && v[j]>v[j+1]; j--){
   swap(v,j);
}}}
```

①レジスタの退避
②引数の退避
③外側のループ
④内側のループ
⑤swap呼出
⑥内側のループ
⑦外側のループ
⑧レジスタ復元～

```
sort:
 addi $sp, $sp, -20
 sw   $ra, 16($sp)
 sw   $s3, 12($sp)
 sw   $s2, 8($sp)
 sw   $s1, 4($sp)
 sw   $s0, 0($sp)
```

$a0:v $a1:n
$s0:i $s1:j

$spを必要なだけ進めて、
手続き内で使用するレジスタ
の値を退避

Cプログラムからアセンブリコードへの変換

- 以下のC言語のソースコードをアセンブリコードに直せ。

```
void sort(int v[], int n){
 int i, j;
 for(i=0; i<n; i++){
  for(j=i-1; j>=0 && v[j]>v[j+1]; j--){
   swap(v,j);
}}}
```

①レジスタの退避
②引数の退避
③外側のループ
④内側のループ
⑤swap呼出
⑥内側のループ
⑦外側のループ
⑧レジスタ復元～

```
move $s2, $a0
move $s3, $a1
```

swap(v, j) (5行目)で実引数を設定するときにa0, a1を使用するので、値をコピーしておく

$a0:v $a1:n
$s0:i $s1:j
$s2:v $s3:n

Cプログラムからアセンブリコードへの変換

- 以下のC言語のソースコードをアセンブリコードに直せ。

```
void sort(int v[], int n){
 int i, j;
 for(i=0; i<n; i++){
  for(j=i-1; j>=0 && v[j]>v[j+1]; j--){
   swap(v,j);
}}}
```

①レジスタの退避
②引数の退避
③外側のループ
④内側のループ
⑤swap呼出
⑥内側のループ
⑦外側のループ
⑧レジスタ復元～

```
 move $s0, $zero
for1tst:
 slt  $t0, $s0, $s3
 beq  $t0, $zero, exit1
```

i=0

i<n が満たされなければexit1へジャンプ

$a0:v $a1:n
$s0:i $s1:j
$s2:v $s3:n

Cプログラムからアセンブリコードへの変換

- 以下のC言語のソースコードをアセンブリコードに直せ。

```
void sort(int v[], int n){
 int i, j;
 for(i=0; i<n; i++){
  for(j=i-1; j>=0 && v[j]>v[j+1]; j--){
   swap(v,j);
}}}
```

```
 addi $s1, $s0, -1
for2tst:
 slti $t0, $s1, 0
 bne  $t0, $zero, exit2
 sll  $t1, $s1, 2
 add  $t2, $s2, $t1
 lw   $t3, 0($t2)
 lw   $t4, 4($t2)
 slt  $t0, $t4, $t3
 beq  $t0, $zero, exit2
```

j=i-1

j<0であれば、exit2へ

$t1=j*4
$t2=&(v[j])

$t3=v[j]
$t4=v[j+1]

$t3≦$t4であればexit2へ

①レジスタの退避
②引数の退避
③外側のループ
④内側のループ
⑤swap呼出
⑥内側のループ
⑦外側のループ
⑧レジスタ復元～

$a0:v $a1:n
$s0:i $s1:j
$s2:v $s3:n

Cプログラムからアセンブリコードへの変換

- 以下のC言語のソースコードをアセンブリコードに直せ。

```
void sort(int v[], int n){
 int i, j;
 for(i=0; i<n; i++){
  for(j=i-1; j>=0 && v[j]>v[j+1]; j--){
   swap(v,j);
}}}
```

①レジスタの退避
②引数の退避
③外側のループ
④内側のループ
⑤swap呼出
⑥内側のループ
⑦外側のループ
⑧レジスタ復元～

```
 move $a0, $s2
 move $a1, $s1
 jal  swap
```

引数を設定して、
swap呼び出し

$a0:v $a1:n
$s0:i $s1:j
$s2:v $s3:n

Cプログラムからアセンブリコードへの変換

- 以下のC言語のソースコードをアセンブリコードに直せ。

```
void sort(int v[], int n){
 int i, j;
 for(i=0; i<n; i++){
  for(j=i-1; j>=0 && v[j]>v[j+1]; j--){
   swap(v,j);
}}}
```

①レジスタの退避
②引数の退避
③外側のループ
④内側のループ
⑤swap呼出
⑥内側のループ
⑦外側のループ
⑧レジスタ復元～

```
 addi $s1, $s1, -1
 j    for2tst
```

j--して
内側ループの条件
判定へ戻る

$a0:v $a1:n
$s0:i $s1:j
$s2:v $s3:n

Cプログラムからアセンブリコードへの変換

- 以下のC言語のソースコードをアセンブリコードに直せ。

```
void sort(int v[], int n){
 int i, j;
 for(i=0; i<n; i++){
  for(j=i-1; j>=0 && v[j]>v[j+1]; j--){
   swap(v,j);
}}}
```

①レジスタの退避
②引数の退避
③外側のループ
④内側のループ
⑤swap呼出
⑥内側のループ
⑦外側のループ
⑧レジスタ復元～

```
exit2:
 addi $s0, $s0, 1
 j    for1tst
```

i++して
外側ループの条件
判定へ戻る

$a0:v $a1:n
$s0:i $s1:j
$s2:v $s3:n

Cプログラムからアセンブリコードへの変換

- 以下のC言語のソースコードをアセンブリコードに直せ。

```
void sort(int v[], int n){
 int i, j;
 for(i=0; i<n; i++){
  for(j=i-1; j>=0 && v[j]>v[j+1]; j--){
   swap(v,j);
}}}
```

①レジスタの退避
②引数の退避
③外側のループ
④内側のループ
⑤swap呼出
⑥内側のループ
⑦外側のループ
⑧レジスタ復元～

```
exit1:
 lw   $s0, 0($sp)
 lw   $s1, 4($sp)
 lw   $s2, 8($sp)
 lw   $s3, 12($sp)
 lw   $ra, 16($sp)
 addi $sp, $sp, 20
 jr   $ra
```

レジスタ復元

呼び出し元へ戻る

```
sort:
 addi $sp, $sp, -20
 sw   $ra, 16($sp)
 sw   $s3, 12($sp)
 sw   $s2, 8($sp)
 sw   $s1, 4($sp)
 sw   $s0, 0($sp)
 move $s2, $a0
 move $s3, $a1
 move $s0, $zero
for1tst:
 slt  $t0, $s0, $s3
 beq  $t0, $zero, exit1
 addi $s1, $s0, -1
for2tst:
 slti $t0, $s1, 0
 bne  $t0, $zero, exit2
 sll  $t1, $s1, 2
 add  $t2, $s2, $t1
 lw   $t3, 0($t2)
 lw   $t4, 4($t2)
 slt  $t0, $t4, $t3
 beq  $t0, $zero, exit2
 move $a0, $s2
 move $a1, $s1
 jal  swap
 addi $s1, $s1, -1
 j    for2tst
exit2:
 addi $s0, $s0, 1
 j    for1tst
exit1:
 lw   $s0, 0($sp)
 lw   $s1, 4($sp)
 lw   $s2, 8($sp)
 lw   $s3, 12($sp)
 lw   $ra, 16($sp)
 addi $sp, $sp, 20
 jr   $ra
```

参考文献

- コンピュータの構成と設計 上 第5版
  David A.Patterson, John L. Hennessy 著、
  成田光彰 訳、日経BP社
- 山下茂 「計算機構成論 1 」講義資料