アセンブリ言語

プログラム課題：電卓コンパイラ

情報工学系
権藤克彦

概要

- 電卓コンパイラを作り，ソースコードとレポートを提出.
  - C言語を使用.
  - 情報工学科電子計算機室（CSC）での動作が基本.
  - 次のファイル中のテストケースを使う.
    - testcase*.txt　（テストケースのデータ）
    - test*.csh　　（テスト実行用のシェルスクリプト）

- 〆切は11月22日（金）17:00.
  - プログラムは未完成でも提出可（レポートをきちんと書く）
  - 締切厳守．遅刻レポートは一切受け取らない.
    - 提出締切時刻ぎりぎりを狙わないこと．1秒でも遅れたら不受理.
  - T2SCHOLA上で提出し，レポート受理もT2SCHOLA上で確認.
    - トラブル時はメールかSlackで連絡

電卓コンパイラ

- 内容：電卓コンパイラ（Cプログラム）を作成.
  - 入力＝電卓の入力（の文字列表現）.
  - 出力＝計算を実行するアセンブリコード.

電卓コンパイラ

1+2x3=

入力

```
.data
L_fmt:
    .ascii "%d¥n¥0"
.text
.globl _main
_main:
    pushq %rbp
    movq  %rsp, %rbp
    movl  $0, %eax
    movl  $0, %ecx
    movl  $0, %ebx
    imull $10, %ebx
  (略)
```

電卓

```
% gcc foo.s
% ./a.out
9
```

コンパイル＆実行

出力.
1+2x3を計算する
アセンブリコード.

電卓コンパイラと電卓の仕様（ポイント）

- カッコは使えない．演算の優先順位無し．
  - 例：1+2*3= の答えは，7ではなく，9が正しい．
- 電卓はアセンブリコード中でprintfを呼び出して計算結果を標準出力に（最後の結果だけ）出力．
- 電卓コンパイラは複数の数字キーの入力をまとめてアセンブリコードに出力してはダメ．
  - 例：「1」「2」「3」という入力を123と出力してはダメ．
    - Cコード中で 123 を計算するのもダメ．
  - 例：「−」「３」という入力を−3と出力してはダメ．
- 電卓はオーバーフローしたら「E」を表示して終了．
  - 32ビット符号あり整数で．（浮動小数点数は扱わない）
- 電卓はメモリー機能をサポートする．
  - M+，M-，CM，RM．

電卓の仕様

- 電卓の動作を細かく精密に説明するのは面倒＆退屈.
- この課題ではテストケース一式を電卓の仕様とする.

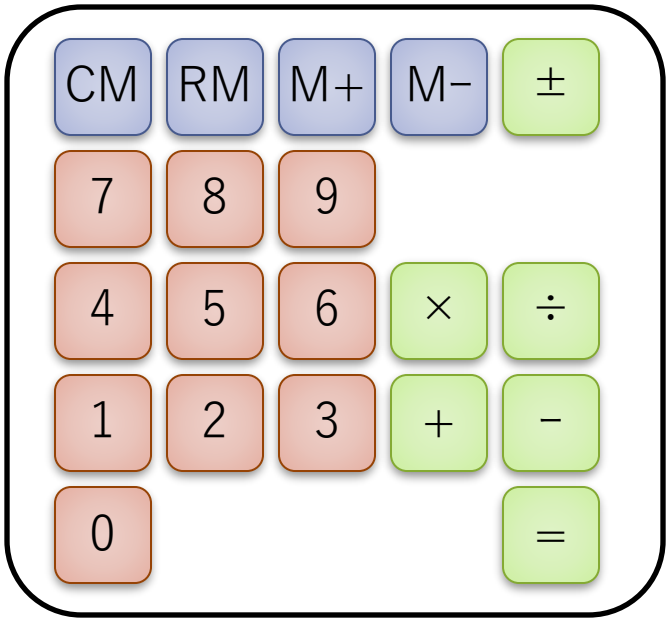
- テストケース
  - プログラムの入力と，その入力に対する正しい出力のペア.

testcase1.txt

```
'1+2=',3
'1+2*3=',9
'12+34*56=',2576
'12S+34=',22
'2147483648=',E
'2147483648S=',E
'2147483647+1=',E
```

「1+2=」という入力に対して，
「3」と出力するのが正しいことを示す.
（この書式はこの課題が勝手に定めたもの）

想定する電卓のキー

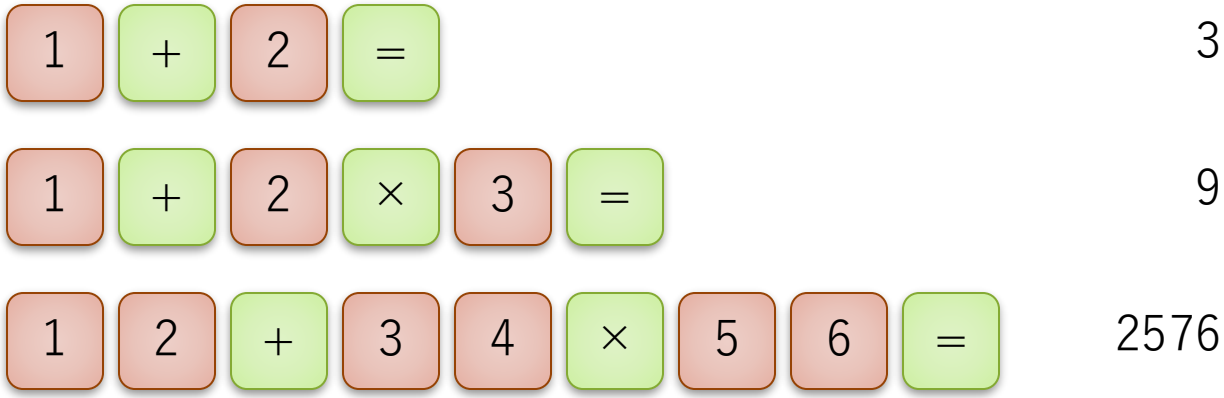


電卓キーの文字表現

CM	C (clear memory)
RM	R (recall memory)
M+	P (memory plus)
M−	M (memory minus)
±	S (sign inversion)
×	*
÷	/

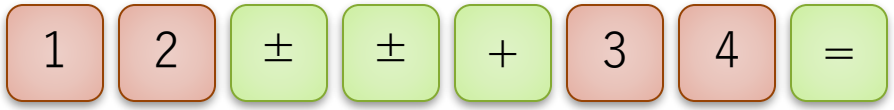
それ以外はそのまま

計算例（1）：普通の計算

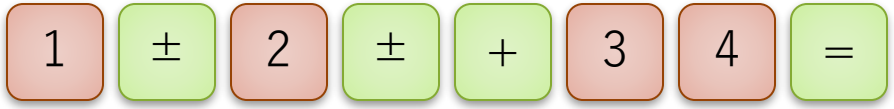


計算例（2）：符号キー

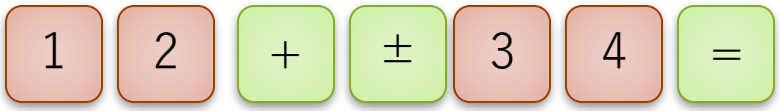
22



46



46

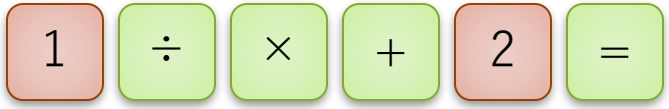


46

計算例（３）：演算キー

連続する演算キーは後のものが有効.

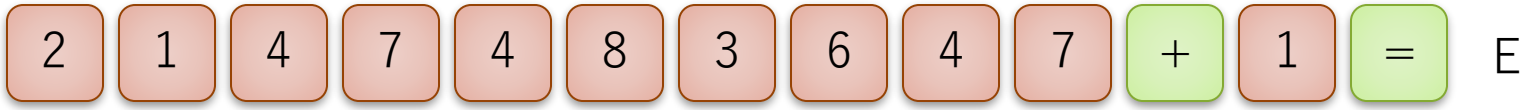
3



3

無効な演算キーはアセンブリコードに
出力しなくて良い.

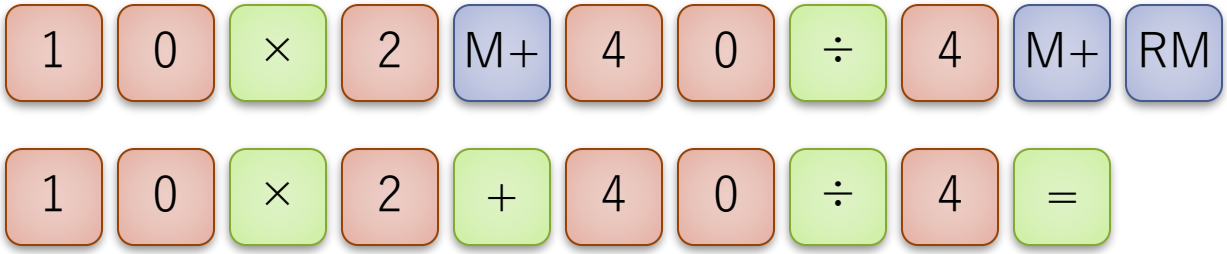
計算例（3）：オーバーフロー



E

32ビット符号あり整数として，
オーバーフローは計算結果を E と表示.

計算例（４）：メモリ機能



上は，(10*2)+(40/4) を計算.
下は，((10*2)+40)/4 を計算.

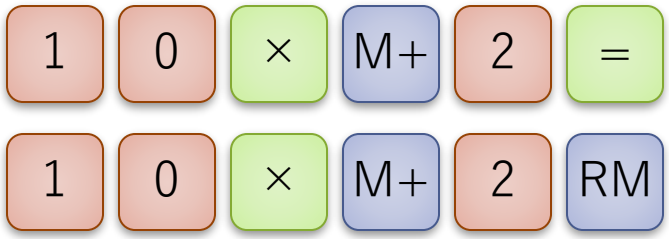
CM　メモリの値を0にセット.

RM　メモリの値を現在の計算結果にセット.

M+　現在の計算結果をメモリの値に加算.

M−　現在の計算結果をメモリの値から減算.

計算例（５）：変な入力



変なキー入力でもエラーとはしない．
（どう動作するかは電卓の実装による．）
このような入力に対する動作は（エラー以外の）任意とする．
テストケースには含めない．

ポイント（1）：4つの記憶領域（変数）

変数名	説明
num	現在，入力中の数値を保持.
acc	現在の計算結果を保持.
mem	メモリ機能で記憶する値を保持.
last_op	最後に見えた演算子を保持.

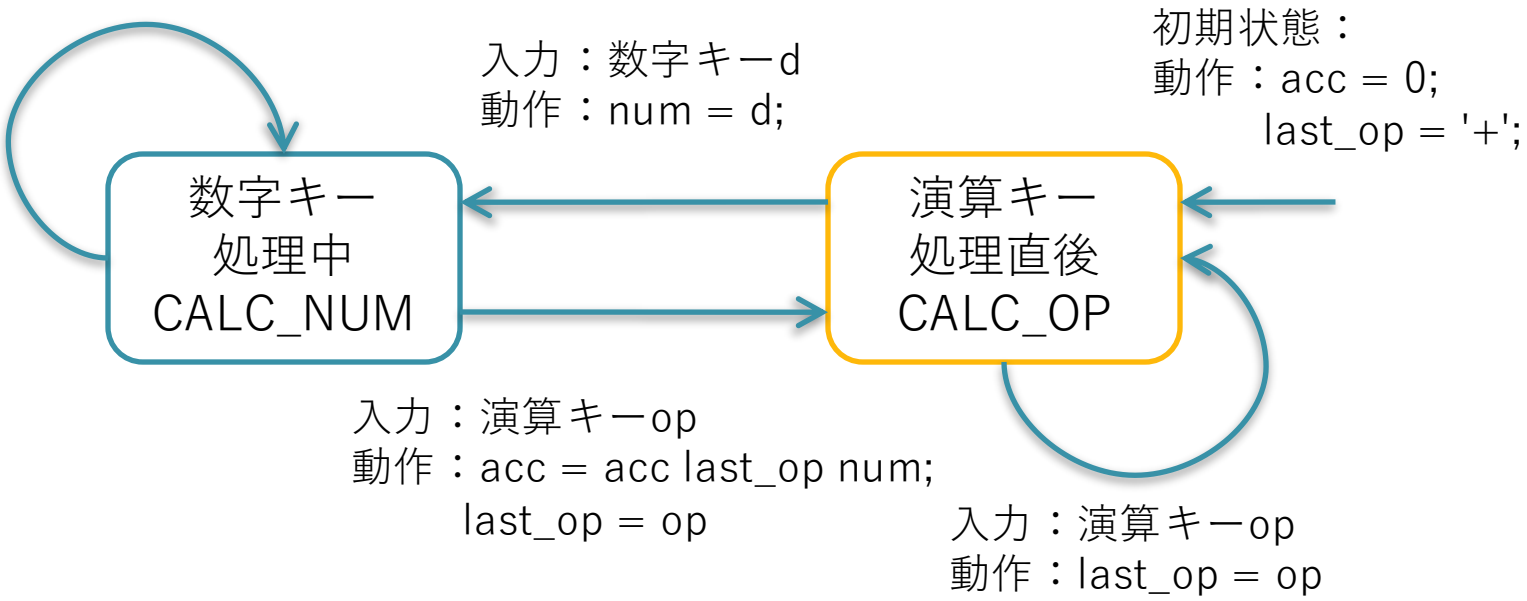
こう初期化する.
最初の入力数値の
扱いを楽にするため.

	入力	num	acc	last_op
最初の入力	1	1	0	+
	2	12	0	+
	*	12	12	*
	3	3	12	*
最後の入力	=	3	36	=

ポイント（2）：状態遷移図

1 2 + 3 4 * 5 6 =

入力：数字キーd
動作：num = num * 10 + d;



簡単のため，符号キーと
メモリキーは無しでの図.

電卓コンパイラ レベル1：calc1.c

- ここまで説明した電卓を実装する.
- ただし
  - オーバーフローは扱わなくて良い.
  - 乗算命令(imul)や除算命令(idiv)を使って良い.

- 先に calc0.c を作ることをお勧め.
  - インタプリタ版の電卓．アセンブリコードを出力せず，その場で入力に対する計算を行って結果を出力する.

```
% gcc calc1.c
% ./a.out '1+2*3=' > foo.s
% gcc –o b.out foo.s
% ./b.out
9
%
```

```
% gcc calc0.c
%  ./a.out '1+2*3='
9
```

電卓コンパイラ レベル2：calc2.c

- オーバーフローが発生したら，E を表示して，実行を終了させる.
  - Eを表示するには，アセンブリコードからprintf() を呼び出す.
  - 実行終了にはライブラリ関数 exit() を呼び出す.
    - 終了ステータスは何でも良い．（通常はゼロ以外に設定）
- ゼロ割の場合も同じエラー処理をする.
  - 除算前に除数が0か否かをチェックする.

- オーバーフローの検査コードが，オーバーフローのフラグを変更しないように注意.

注意：idiv は浮動小数点例外を出す

- idivが浮動小数点例外を出す場合
  - 0割りをした時　（こっちは扱う）
  - 商 $> 2^{31}-1$ or 商 $< -2^{31}$ の時
    - つまり，商が32ビット符号あり整数の範囲を超えた場合
    - きちんと%eaxを符号拡張して，%edxを初期化して下さい

電卓コンパイラ レベル3：calc3.c

- 乗算命令（mul, imul）や除算命令（div, idiv）を使わずに，乗算と除算を行うように変更する.
  - 注：数値入力を計算する x10 でも，乗算命令禁止

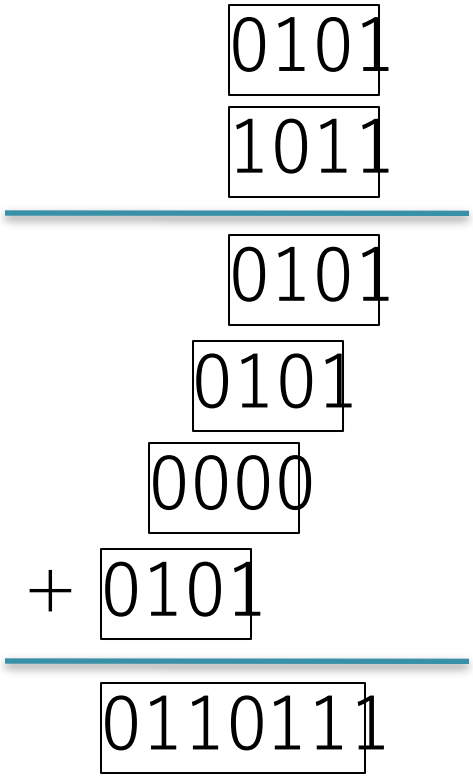
- 加減算やシフト命令を組み合わせて実現する.
- （簡単のため）オーバーフローやゼロ割のチェックは不要.

課題コード	行数
calc0.c	148
calc1.c	176
calc2.c	213
calc3.c	327

参考：権藤が作った
コード量

10進数の筆算と同じ

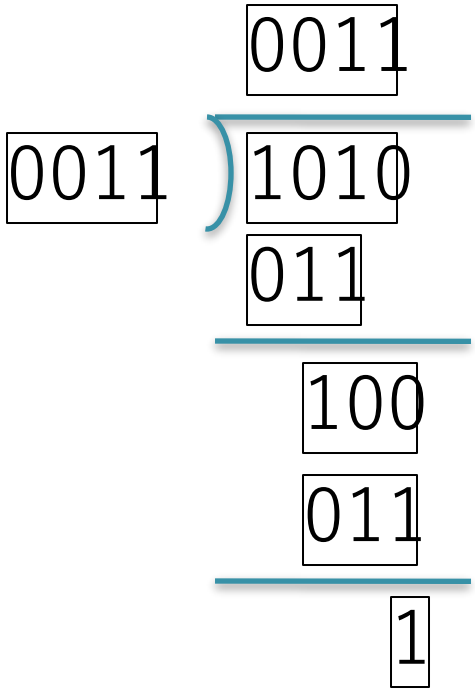
加算とシフトで，乗算を計算



5*11=55の計算

- ヒント
  - ローテート命令（rcr）を使って，かける数を下位ビットから1ビットずつ処理.
  - かけられる数は左に1ビットずつシフトする.
  - 負の数を扱うには，まず絶対値同士の乗算を求めておき，最後に符号を調整.
    - 注：この方法だと，表現できる最小の負数を扱えない．これは考えなくて良い.（符号なし整数を使えば扱える）
  - m*n を「mをn回足す」で実現すると実行速度が遅すぎるので禁止

減算とシフトで，除算を計算



10/3=3･･･1の計算

- ヒント
  - 左シフト命令（shl）を使って，割られる数を上位ビットから1ビットずつ別レジスタに格納.
  - その別レジスタ ≧ 割る数ならば，商に1をたてて引き算する.
  - 負の数の処理は前ページと同じ.
    - 最小の負数の扱いも同じ.

%rsp の 16バイト境界制約に注意

- call命令の実行時に
  「%rspの値は16の倍数」を満たすことが必要.
- %rsp の値を適宜，調整する.
  - 分かっていても，うっかり間違えやすい.

```
pushq %rbp
movq  %rsp, %rbp
# ここで16の倍数
...
popq %rbp
retq
```

return address (%rip)と
旧%rbp の合計で 16バイト

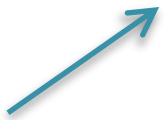
```
# ここで16の倍数
leaq L_fmt(%rip), %rdi
movslq %eax, %rsi
call  _printf
```

たまたまこの例では調整が不要だった.
第 6 引数まではレジスタ渡しのため.
%rdi = 第 1 引数
%rsi = 第 2 引数

提出方法

- T2SCHOLAの課題から提出.

- 提出物一式（後スライド参照）をtarで1つのファイルに固めて，アップロードすること.
  - 学籍番号と同じディレクトリを作り，そこに送るファイルをすべてコピーする.
    % mkdir 23B12345
    % cp ファイル名 23B12345
  - tar で1つのファイルにまとめる.
    % tar cvzf 23B12345.tgz 23B12345



このファイルを
アップロード.

提出物一式の確認

- 固めたファイルが正しく解凍できるかチェックする

```
% cp 23B12345.tgz /tmp        別ディレクトリにコピー
% cd /tmp
% tar xvzf 23B12345.tgz       解凍・展開
% cd 23B12345
% ls
calc1.c calc2.c calc3.c report.pdf
%
```

提出物

ファイル分割しない

- プログラム（ソースコードのみ，各ファイル1つで）
  - calc1.c：電卓コンパイラ レベル1
  - calc2.c：電卓コンパイラ レベル2
  - calc3.c：電卓コンパイラ レベル3
- レポート
  - report.txt，report.md または report.pdf
    （図が必要な場合は PDF形式の report.pdf中に含めること）

コンパイルにオプションが必要な場合は，
Makefile を書いて提出することを推奨.

提出してはいけないもの

- バイナリファイル（a.out，*.o）
- 昔のソースコード，バックアップファイル（*~）
- winmail.dat （Outlook 使いの人は要注意）
- その他，レポートに関係ないファイル．

レポートに書く内容

無駄にダラダラ長い文章は減点.
ページ稼ぎ禁止.
ソースコード引用は最低限に.
内容が少ないものも減点.

- 次のことをアピールする文章を（簡潔に）書く.
  - 「私はこの課題を深く理解して，しっかり取り組んだ」
  - 「私は様々な試行錯誤をし，様々な工夫もした」

情報少ないと「分かってないな」とこちらは判断

- 書くことの例
  - 設計上の取捨選択とその理由・結果.
  - より良いテストケースの提案と説明
  - 何をどこまで作ったか．既知のバグ（もしあれば）.
  - 改良や拡張すべき点とその方法.
  - 議論（考察）.
  - 感想（採点外）.

単に「プログラムをきれいに直したい」
と書くだけでは，議論として意味がない.

レポートはラブレターと同じ💘

- 短いと
  - 読んでも全然面白くない
  - 本当にこの課題，ちゃんと（自分で）考えてやったの？
- 長いと
  - 読むのが大変，でも中身が薄いし面白くない
  - ページ稼ぎだけで，課題への愛が感じられない
- 面白くするには
  - 読みやすく簡潔な説明，後で詳細を書く
    - 新聞の「見出し」と「本文」
  - 図表（手書きでもOK），例を使う
  - 卒論の執筆・発表や就活のESで非常に大事なテクニック

入力と出力のお約束

- こちらで自動テストするために必要.
- 守らなかった場合は減点します.

- 電卓コンパイラは入力を argv[1] から受け取る.
- 電卓コンパイラはアセンブリコードを標準出力に出力する.
- 電卓は標準出力に計算結果（と改行）だけを出力する.

```
% gcc calc1.c
% ./a.out '1+2*3=' > foo.s
% gcc –o b.out foo.s
% ./b.out
9
%
```

簡易自動テスト test1.csh, test2.csh（１）

- 提出プログラムを自動的にテストする簡易ツール.
- もし良ければ，提出前に使ってください.

- 使い方：
  - 電卓コンパイラをコンパイルする．実行可能ファイル名はa.outにする.
  - おなじディレクトリに，test*.csh，testcase*.txt をコピー.
  - chmod +x test*.csh
  - ./test.csh

```
% ./test1.csh
'1+2=', 3, bad result!! 4
num = 6, bad = 1
%
```

テストケース6個中,
1つエラーがあったことを報告.

簡易自動テスト test1.csh, test2.csh（２）

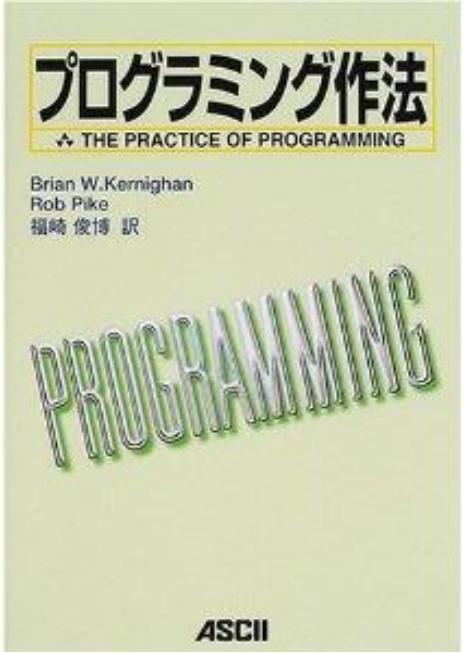
- 配布のtest.tgzの解凍方法
  - tar xvzf test.tgz

- testcase1.txt は通常の計算のテストケース.
  - test1.csh はtestcase1.txt を使ってテスト.
  - calc1.c と calc3.c テスト用.
- testcase2.txt はオーバーフローのテストケース.
  - test2.csh はtestcase2.txt を使ってテスト.
  - calc2.c テスト用.

プログラムの書き方

- 他人が読みやすく理解しやすいプログラムを書く.

- 定石：
  - きれいにインデント（字下げ）する.
  - 分かりやすい変数名をつける.
  - 良いコメントを書く ← 超大事
  - モジュール化する.



参考書：プログラミング作法
http://www.amazon.co.jp/dp/4756136494

カンニングはダメ

研究者としての倫理
社会的立場の自覚
つまらないことで人生を棒に振らない

- アイデアレベルでの議論はＯＫ（推奨）.
- でもソースコードを見るのはカンニングと見なす.
- 警告：剽窃チェッカーを使います.
  見せた方も同罪.

権藤への質問は大歓迎

- 見せない努力も必要.
  - ソースコードを不用意に印刷して放置しない.
  - ソースコードを表示したまま，席を離れない.
  - ファイルやディレクトリの他人の読み取りを不許可にする.
  - 議論する際にソースコード（疑似コード）を使わない.
  - デバッグを助けてもらう時もソースコードは見せない.
  - Github等でパブリックに公開しない.

その他の注意（1）

- 情報工学科計算機室（CSC）の使用
  - 他の授業や演習を行っていない時間だけ使用すること.
  - その他，CSCの利用規則を遵守すること.
  - 違反した場合は厳罰を科す.

- リスク管理をすること.
  - 〆切りギリギリを狙わない.
    - 根拠無く「〆切一週間前からやろう」などと思わない.
  - 風邪，停電，学会発表，CSCの保守など，
    課題に取り組めない事態はいくらでもありうる.
  - パソコンが壊れても遅刻提出は認めない←バックアップ必須
  - 自己責任で，早めに課題に取り組み提出すること.
  - リスク管理は社会人に必要な重要なスキル.

その他の注意（2）

- つまずいたら質問すること
  - 一人で悩むと，１～２週間すぐ過ぎてしまう（時間の無駄）
  - 質問上手になろう，他人の質問に答えてあげよう
- レポートをちゃんと書く
  - レポートが貧弱だと大減点.
    せっかくプログラム頑張ったのが無駄に.
- コンパイラの警告は全て潰す
  - むしろ，gcc –Wall オプションでより厳しくチェック
  - コンパイラ警告が出るコードは減点

```
calc1.c:156:9: warning: expression result unused [-Wunused-value]
      *p++;
```

ヒント(1/4)

- 一桁の加減算のみの実装のインタプリタ版
  - 例：5 + 3
  - 例：5 – 2

- num1, num2 は最終的には一般化して num だけにする.
- argv の使い方が分からない人はC言語を要復習.

*p++ は *(p++)と同じ

sample0.c

```
#include <stdio.h>
int main (int argc, char *argv [])
{
    char last_op, *p = argv [1];
    int  num1, num2, acc;

    num1    = *p++ - '0';
    last_op = *p++;
    num2    = *p++ - '0';
    switch (last_op) {
    case '+':
        acc = num1 + num2;
        break;
    case '-':
        acc = num1 - num2;
        break;
    }

    printf ("%d¥n", acc);
}
```

```
% gcc -o sample0 sample0.c
% ./sample0 "5+3"
8
% ./sample0 "5-2"
3
%
```

sample1.c

ヒント(2/4)

- 一桁の加減算のみの実装のコンパイラ版
- エスケープ文字に注意.
  - ¥¥ は ¥ を印字.
  - ¥" は " を印字.
  - ¥t はタブ（字下げ）を印字.
  - %% は % を印字.
- 文字列定数中では改行禁止.
  - 悪い例：
    ".data¥n
    L_fmt:¥n"
  - 複数の連続する文字列定数はコンパイル時に１つに合体.

```
#include <stdio.h>
int main (int argc, char *argv []) {
    char last_op, *p = argv [1];
    printf (".data¥n"
            "L_fmt:¥n"
            "¥t.ascii ¥"%%d¥¥n¥¥0¥"¥n"
            ".text¥n"
            ".globl _main¥n"
            "_main:¥n"
            "¥tpushq %%rbp¥n"
            "¥tmovq  %%rsp, %%rbp¥n");

    printf ("¥tmovl  $%c, %%ecx¥n", *p++);
    last_op = *p++;
    printf ("¥tmovl  $%c, %%edx¥n", *p++);
    switch (last_op) {
    case '+':
        printf ("¥taddl  %%edx, %%ecx¥n");
        break;
    case '-':
        printf ("¥tsubl  %%edx, %%ecx¥n");
        break;
    }
    printf ("¥tmovb $0, %%al¥n"
            "¥tleaq L_fmt(%%rip), %%rdi¥n"
            "¥tmovslq %%ecx, %%rsi¥n"
            "¥tmovb $0, %%al¥n"
            "¥tcall  _printf¥n"
            "¥tleave¥n"
            "¥tret¥n");
}
```

ヒント(3/4)

```
% gcc -o sample1 sample1.c
% ./sample1 "5+3" > foo.s
% gcc foo.s
% ./a.out
8
% ./sample1 "5-2" > foo2.s
%  gcc foo2.s
%  ./a.out
3
%
```

%ebxはcallee-saveなので
%ebxを使うなら %rbxを要退避

foo.s

```
.data
L_fmt:
    .ascii "%d¥n¥0"
.text
.globl _main
_main:
    pushq %rbp
    movq  %rsp, %rbp
    movl  $5, %ecx
    movl  $3, %edx
    addl  %edx, %ecx
    movb $0, %al        ← 不要
    leaq L_fmt(%rip), %rdi
    movslq %ecx, %rsi
    movb $0, %al
    call  _printf
    leave
    ret
```

%al は隠しパラメタ（ベクトルレジスタの使用個数）
なので，0を入れておく．

ヒント(4/4)

- オススメ(1)：callee-saveレジスタは使わない
  - main関数でcallee-saveレジスタを退避せずに上書きすると，main関数からリターン後にクラッシュすることがある（クラッシュしないこともある！）
- オススメ(2)：main関数からリターンせずにリターン直前に exit関数をcallして実行終了する
  - 正しく結果を出力できても，その後でクラッシュするともったいないから.
- オススメ(3)：コメントも出力する
  - 例：printf ("4: # loop exit¥n");
- calc1～3ではCコードでnumやaccを計算してはダメ
  - オーバーフローやゼロ割の検知もCコードでやってはダメ

Linux版 calc を作る注意点（1）

- 関数エピローグとプロローグをLinux用に変更
  - gcc –S の出力を真似する
  - でも endbr64 は使わなくてOK
- 関数名の頭のアンダースコア（_）は不要

- レポート中に「Linux環境を使用」と明示すること
  - 例：Linux Ubuntu 20.04 LTS (64bit)

Linux版 calc を作る注意点（2）

- Linux版 foo.s
- PLTは procedure linkage tableの略

```
.data
L_fmt:
    .ascii "%d¥n¥0"
.text
.globl main
.type   main, @function
main:
    pushq %rbp
    movq  %rsp, %rbp
    movl  $5, %ecx
    movl  $3, %edx
    addl  %edx, %ecx
    movb $0, %al
    leaq L_fmt(%rip), %rdi
    movslq %ecx, %rsi
    movb $0, %al
    call  printf@PLT
    leave
    ret
.size   main, .-main
```