計算機科学第一（講義）

プログラム・コンパイラ・実行

脇田建

2016.9.26

講義のサポートサイト

- **https://github.com/is-prg1a/lecture**

プログラムの実行方式

プログラムの実行方式

- 直接実行方式（気合いで頑張る）
- コンパイラを用いた直接実行方式 (C, C++など)
- インタプリタを用いた解釈実行方式 (JavaScript, Ruby, Pythonなど)
- 仮想命令コンパイラと仮想機械を用いた解釈実行方式 (Java, Scala など)

直接実行方式

プログラム	機械命令の列
実行の主体	ハードウェア（中央演算装置; CPU）が機械語で用意されたプログラムを直接実行
計算	命令の読み込み、解釈、実行、プログラムカウンタの更新

簡単なプログラム例 (C)

```
int simple(int a, int n) {
  for (int i = 1; i <= n; i++) {
    a = a + i;
  }
  return a;
}
```

機械命令

	変数
-4(%rbp)	a
-8(%rbp)	n
-12(%rbp)	i

ラベル	命令	命令の引数	簡単な解説
LBB0_1	**movl**	-12(%rbp), %eax	eax := rbp[-12]
	cmpl	-8(%rbp), %eax	rbp[-8] の値と eax の値を比較
	jg	LBB0_4	比較結果が > なら LBB0_4 から実行
BB#2	**movl**	-12(%rbp), %eax	eax := rbp[-12]
	addl	-4(%rbp), %eax	eax := eax + rbp[-4]
	movl	%eax, -4(%rbp)	rbp[-4] = %eax
BB#3	**movl**	-12(%rbp), %eax	eax := rbp[-12]
	addl	$1, %eax	eax := eax + 1
	movl	%eax, -12(%rbp)	rbp[-12] := eax
	jmp	LBB0_1	次はLBB0_1 から実行
LBB0_4	**...**	...	

機械命令と変数の対応

	変数
-4(%rbp)	a
-8(%rbp)	n
-12(%rbp)	i

ラベル	命令	命令の引数	簡単な解説
LBB0_1	**movl**	-12(%rbp), %eax	A := i
	cmpl	-8(%rbp), %eax	n の値と A の値を比較
	jg	LBB0_4	A > n なら LBB0_4 から実行
BB#2	**movl**	-12(%rbp), %eax	A := i
	addl	-4(%rbp), %eax	A := A + a
	movl	%eax, -4(%rbp)	a = A
BB#3	**movl**	-12(%rbp), %eax	A := i
	addl	$1, %eax	A := A + 1
	movl	%eax, -12(%rbp)	i := A
	jmp	LBB0_1	次はLBB0_1 から実行
LBB0_4	...	...	

つまり、a = i + a

つまり、i = i + 1

機械命令でのループ

	変数
-4(%rbp)	a
-8(%rbp)	n
-12(%rbp)	i

ラベル	命令	命令の引数	簡単な解説
LBB0_1	**movl**	-12(%rbp), %eax	A := i
	cmpl	-8(%rbp), %eax	n の値と A の値を比較
	jg	LBB0_4	A > n なら LBB0_4 から実行
BB#2	**movl**	-12(%rbp), %eax	A := i
	addl	-4(%rbp), %eax	A := A + a
	movl	%eax, -4(%rbp)	a = A
BB#3	**movl**	-12(%rbp), %eax	A := i
	addl	$1, %eax	A := A + 1
	movl	%eax, -12(%rbp)	i := A
	jmp	LBB0_1	次はLBB0_1 から実行
LBB0_4	...	...	

つまり、a = i + a

つまり、i = i + 1

機械命令の直接実行

- CPUの性能の限界を引き出せる.
- コンパクトなコードを生成できる可能性がある.
- 猟奇的なプログラミングもやりやすい
- ↓機械命令は，難しい．デバッグが大変.

コンパイラを用いた直接実行方式

- 動機：機械命令を人間が準備するのはあまりにつらい．助けて！
- コンパイラ：人間にとって理解し易いプログラミング言語（高級言語）を機械命令に翻訳するソフトウェア
  - 記述性が飛躍的に高まり，ソフトウェアの生産性が大幅に高まった
  - 最適化コンパイラの性能は年々向上しており，生成されたコードは十分な実行性能を誇る．
- 各種のコンパイラ
  - C: clang や gcc / C++: clang++ や g++ / OCaml: ocamlopt

コンパイラを用いた直接実行方式

プログラムを作成して

```
$ cat simple.c
#include <stdio.h>
int simple(int a, int n) {
  for (int i = 1; i <= n; i++) { a += i; }
  return a;
}
int main() { printf("1 + 2 + .. + 10 = %d\n", simple(0, 10)); }
```

```
$ clang -o simple simple.c
```

コンパイルして

```
$ ./simple
1 + 2 + .. + 10 = 55
```

実行

コンパイラを用いる利点

```
int simple(int a, int n) {
  for (int i = 1; i <= n; i++) {
    a = a + i;
  }
  return a;
}
```

```
        movl    %edi, -4(%rbp)
        movl    %esi, -8(%rbp)
        movl    $1, -12(%rbp)
LBB0_1:
        movl    -12(%rbp), %eax
        cmpl    -8(%rbp), %eax
        jg      LBB0_4
## BB#2:
        movl    -12(%rbp), %eax
        addl    -4(%rbp), %eax
        movl    %eax, -4(%rbp)
        ...
```

- メモリ配置 (-4(%rbp)) → 変数名 (a)
- ラベル (LBB0_4) → 制御構造 (**for** や **return**)
- 最適化コンパイラを利用するとかなりの実行性能が期待できる

インタプリタを用いた実行方式

- 動機：「プログラム作成，コンパイル，実行」の繰り返しは面倒．すぐに実行したい．
- インタプリタ：プログラムを読み取り，意味を解釈しながら，その場で実行するプログラム
  - プログラム断片を徐々に入力し，少しずつ実行できるので，わかりやすい．
- 各種のインタプリタ
  - matlab, ocaml, perl, python, R, ruby, scala, Scheme (gauche, rabbit)

インタプリタを用いた実行例

```
$ scala
Welcome to Scala version 2.11.7 (Java
HotSpot(TM) 64-Bit Server VM, Java
1.8.0_25).
Type in expressions to have them
evaluated.
Type :help for more information.
```

```
scala> def simple(a: Int, n: Int): Int = {
     |   def aux(a: Int, i: Int): Int = {
     |    if (i > n) a else aux(a + i, i + 1)
     |  }
     |    aux(a, 1);
     |  }

simple: (a: Int, n: Int)Int

scala> simple(0, 10)
res1: Int = 55

scala> simple(0, 30)
res2: Int = 465
```

参考：Scalaのインタプリタにファイルを読み込む方法

```
$ scala
```

Scalaのインタプリタの起動

```
Welcome to Scala version 2.11.8 (Java HotSpot(TM) 64-Bit Server VM, Java 1.8.0_25).
Type in expressions to have them evaluated.
Type :help for more information.

scala> :load simple.scala
Loading simple.scala...
defined object Simple

scala> Simple.simple(0, 10)
res0: Int = 55
```

Scalaファイル (simple.scala) の読み込み

simple.scala で定義されている
simple 関数の呼び出し

インタプリタの働き

- 入力されたプログラムの構文解析
  - 構文エラーの指摘

```
scala> (+ a 1)
<console>:1: error: ')' expected but
integer literal found.
(+ a 1)
     ^
```

- プログラムの意味の解釈
  - 意味に関するエラーの指摘

```
scala> b + 1
<console>:11: error: not found:
value b
      b + 1
      ^
```

- プログラムの意味にしたがって評価・実行
- 実行結果の出力

```
scala> simple(0, 10)
res7: Int = 55
```

仮想機械を用いた実行方式

- バイトコードコンパイラ
  - バイトコード（仮想命令）⇔ネイティブコード（機械命令の別名）
  - やや抽象度の高い命令（バイトコード）を準備する．
- 仮想機械：バイトコード列を解釈・実行する処理系
  - バイトコードのインタプリタ（仮想CPUの真似をするソフトウェアと見做せる．ネイティブコンパイラでの実行より10〜20倍遅い）
  - JIT (Just-in-time) コンパイラ：バイトコード断片の仮想命令を解釈・実行しながら，対応するネイティブコードを蓄えておく．次に同じ断片が実行するときには，保存したネイティブコードを実行することで，高速に実行する．

バイトコードコンパイラと仮想機械

言語	コンパイラ	仮想機械	基盤
Java	javac	Java Virtual Machine (JVM)	あらゆる環境
Scala	scalac	Java Virtual Machine (JVM)	あらゆる環境
C++/C#/Basic/ F# など	それぞれのコンパイラ	Microsoft 共通中間言語 (CIL)	.NET Framework
Java的な…	javac	Dalvik Virtual Machine ※最新のAndroidは使ってない	< Android 5.0

仮想機械を用いた実行例

$ **cat simple.scala**

プログラムを作成

```
object Simple {
  def simple(a: Int, n: Int): Int = {
    def aux(a: Int, i: Int): Int = {
      if (i > n) a else aux(a + i, i + 1)
    }
    aux(a, 1);
  }

  def main(arguments: Array[String]) {
    println("1 + 2 + ... + 10 = " +
      simple(0, 10))
  }
}
```

$ **scalac simple.scala**

コンパイル: Simple.class, Simple$.class

$ **scala Simple**

```
1 + 2 + ... + 10 = 55
```

実行と結果の印字

仮想機械を用いる利点

- 可搬性 (portability): コンパイルしたプログラムを異なるアーキテクチャの機械で実行できる．OS (Android, iOS, Linux/OS X, UNIX, Windows, zOS) にもアーキテクチャ(ARM, AMD64, x86/x64, POWER)にも依存しない実行方式.

- JITを利用すると，思いの外，高性能

どうしたことでしょう

Scalaのバイトコードは実は．．．

- $ **scalac simple.scala**
- $ **ls**
  Makefile　Simple.class　simple.c　simple.scala
  Simple$.class　simple　simple.s
- $ **file *.class**
  Simple$.class: **compiled Java class data**, version 50.0 (Java 1.6)
  Simple.class: **compiled Java class data**, version 50.0 (Java 1.6)
- **java -cp /home/wakita/brew/opt/scala/libexec/lib/scala-library.jar:. Simple**
  1 + 2 + ... + 10 = 55

バイトコードコンパイラと仮想機械

言語	コンパイラ	仮想機械	基盤
Java	javac	Java Virtual Machine (JVM)	あらゆる環境
Scala	scalac	Java Virtual Machine (JVM)	あらゆる環境
VB .NET / C++/C# / F# / J# / JScript / PowerShell など	それぞれのコンパイラ	Microsoft 共通中間言語 (CIL)	.NET Framework
Java的な…	javac	Dalvik Virtual Machine ※最新のAndroidは使ってない	< Android 5.0

多言語 → 共通仮想機械 (Microsoft)

プログラミング言語

Visual Basic .NET | C++ | C# | F# | J# | JScript | PowerShell

コンパイル

中間言語 — 共通中間言語 (CIL; Common Intermediate Language)

仮想実行基盤 — .NET Framework

実行基盤 — 演算装置 (Microprocessor)

多言語 → 共通仮想機械 (JVM)

プログラミング言語

Java | Jython (JVM版 Python) | JRuby (JVM版 Ruby) | Scala

コンパイル

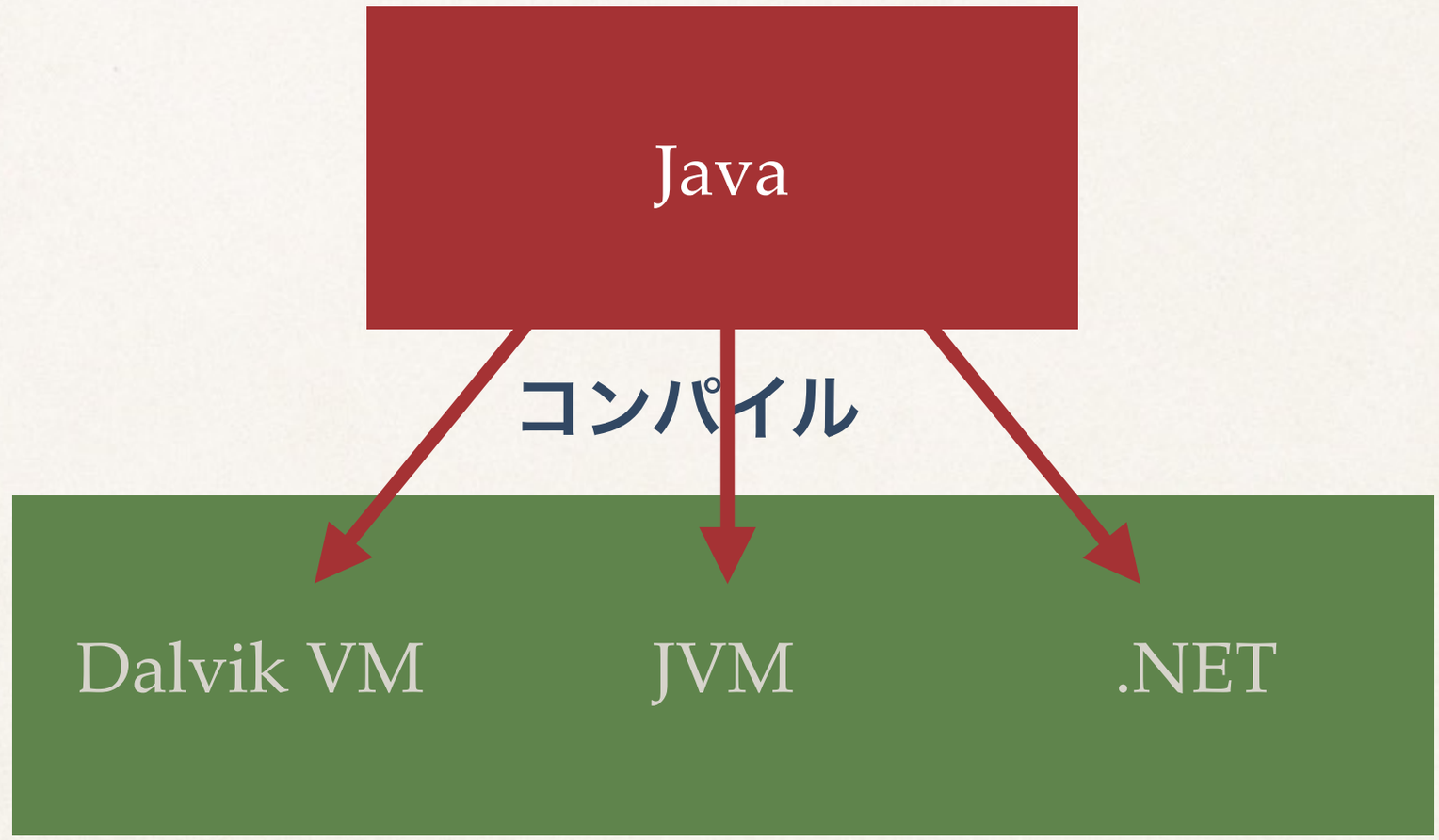
中間言語 — Java Bytecode

仮想実行基盤 — Java 仮想機械 (JVM; Java Virtual Machine)

実行基盤 — 演算装置 (Microprocessor)

同一言語 → 多様な実行環境

プログラミング言語



sbt – Scala の開発環境

プログラムの開発ステップ

1. プログラムを書く
2. コンパイル：文法エラーや意味エラーに出会ったらステップ1へ
3. 実行：実行時エラーに出会ったらステップ1へ
4. テスト：テストに失敗したら、頭を冷してからステップ1へ
5. 完成！

Scala開発の風景 – 各ステップでどんな作業をしているか考えて下さい

- scalac simple.scala

```
simple.scala:1: error: expected class or object
definition
 def simple(a: Int, n: Int): Int = {
 ^
simple.scala:8: error: expected class or object
definition
 def main(arguments: Array[String]) {
 ^
two errors found
```

- scalac simple.scala

```
simple.scala:4: warning: a pure expression
does nothing in statement position; you may
be omitting necessary parentheses
    if (i > n) a else aux(a + i, i + 1)
               ^
simple.scala:6: error: type mismatch;
 found   : Unit
 required: Int
   aux(a, 1);
       ^
one warning found
one error found
```

- scalac simple.scala
- scala Simple

1 + 2 + ... + 10 = 14

- scalac simple.scala
- scala Simple

1 + 2 + ... + 10 = 55

Scala開発の風景 – 各ステップでどんな作業をしているか考えて下さい

- **scalac simple.scala**
- **scalac simple.scala**
- **scalac simple.scala**
- **scala Simple**
- **scalac simple.scala**
- **scala Simple**

プログラミング作業は、コンパイル、実行、テストの連続（たくさんタイピングしなくてはいけない）

しかも、scalac の実行は時間がかかる

bashの便利な機能

- コマンド実行履歴機能：↑キー、↓キー
  - 以前実行したコマンドの再実行
- コマンド行編集機能：**Ctrl-a**, **Ctrl-b (← キー)**, **Ctrl-f (→ キー)**, **Ctrl-e**
  - コマンド入力中の小さな間違いを素早く修正するのに便利
- コマンド再実行：**!**
  - **!!** – 直前に実行したコマンドの再実行
  - **!sc** – コマンド実行履歴のなかで "sc" で始まるコマンドを探し、それを実行

さらに便利な sbt (Scala build tool)

- Scala の開発環境（地味だけれど、とてもいい）
  - Scalaプログラムのビルド（コンパイル & 統合）
    - 必要な Scala パッケージの自動インストール
    - 継続的コンパイル、継続的テスト
    - Scala インタプリタとの統合
    - Java のサポート
- 実はみなさんはすでに使っています。

sbtの利用

```
gmac01:lx01 wakita$ sbt

[info] Loading project definition from /home/wakita/classes/cs1/lx01/project
[info] Set current project to lecture (in build file:/home/wakita/classes/cs1/lx01/)
> compile
[info] Updating {file:/home/wakita/classes/cs1/lx01/}root...
[info] Resolving jline#jline;2.12.1 ...
[info] Done updating.
[info] Compiling 1 Scala source to /home/wakita/tmp/sbt/cs1g/lecture/scala-2.11/classes...
[success] Total time: 7 s, completed 2016/09/26 14:02:51

> run
[info] Running Simple
1 + 2 + ... + 10 = 55
[success] Total time: 0 s, completed 2016/09/26 14:02:54

> exit
```

sbt の起動

[info] Set current project to cs1-lx00a (in build file:/Users/wakita/tmp/lx00a/)

run コマンドでコンパイル＆実行

> **run**

[info] Compiling 1 Scala source to /Users/wakita/tmp/cs1f/scala-2.11/classes...
[error] /Users/wakita/tmp/lx00a/src/lx00-a.scala:2: expected class or object definition
[error] def simple(a: Int, n: Int): Int = {
[error] ^

[error] /Users/wakita/tmp/lx00a/src/lx00-a.scala:9: expected class or object definition
[error] def main(arguments: Array[String]) {
[error] ^
[error] two errors found
[error] (compile:compileIncremental) Compilation failed
[error] Total time: 2 s, completed 2015/10/06 6:11:54

文法エラーだ！

プログラムを修正して、再実行

> **run**

[info] Running Simple
[info] 1 + 2 + ... + 10 = 14

計算間違い

[success] Total time: 0 s, completed 2015/10/06 6:12:03

プログラムを修正して、再実行

> **run**

[info] Compiling 1 Scala source to /Users/wakita/tmp/cs1f/scala-2.11/classes...
[info] Running Simple
[info] 1 + 2 + ... + 10 = 55
[success] Total time: 3 s, completed 2015/10/06 6:12:15

不精者のための sbt

- "run" を何度も入力するのが面倒じゃ
- コマンド履歴（↑と↓）を使って下さい
- ↑と↓を入力するのも面倒じゃ
- なんというワガママ
- そういうアンタに "~run" コマンド

- sbt

sbt セッションを通して実行したのは最初の ~run コマンドだけ

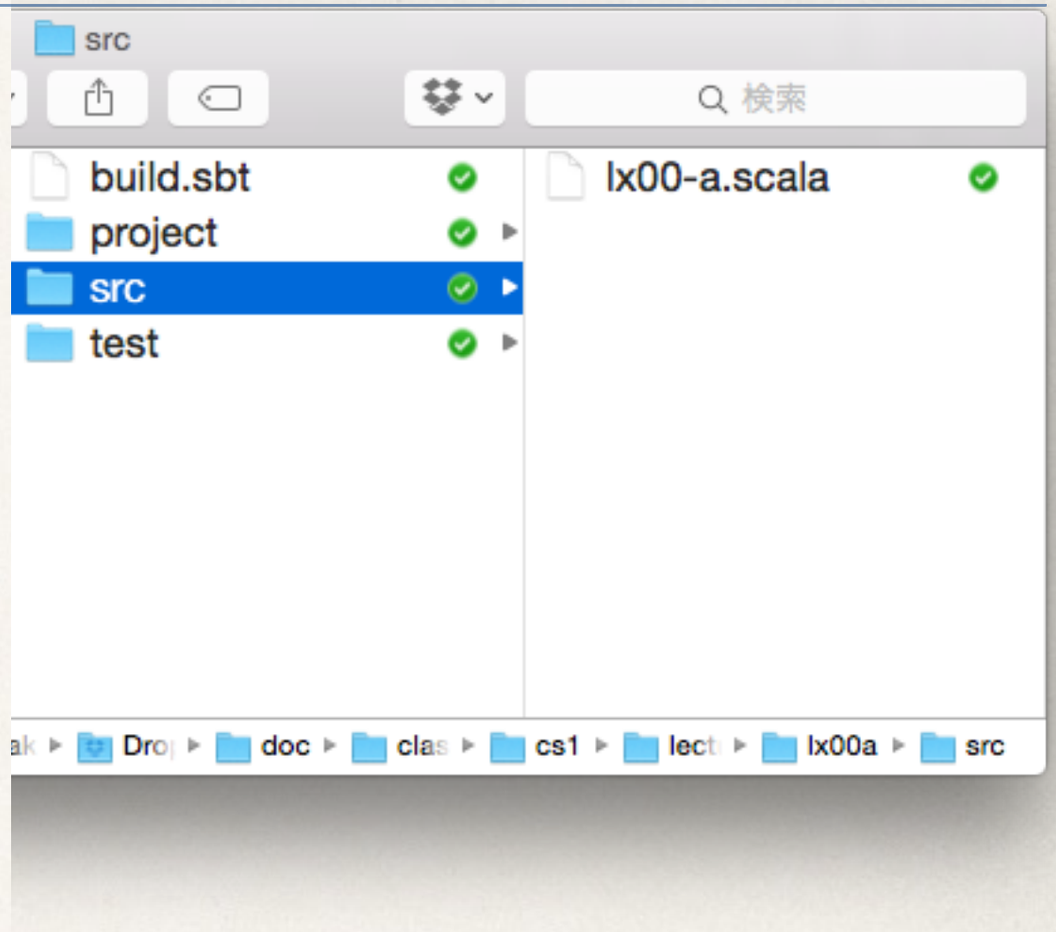
```
[info] Set current project to cs1-lx00a (in build file:/Users/wakita/tmp/lx00a/)
> ~run
[info] Compiling 1 Scala source to /Users/wakita/tmp/cs1f/scala-2.11/classes...
[error] /Users/wakita/tmp/lx00a/src/lx00-a.scala:2: expected class or object definition
[error]   def simple(a: Int, n: Int): Int = {
[error]   ^
[error] /Users/wakita/tmp/lx00a/src/lx00-a.scala:9: expected class or object definition
[error]   def main(arguments: Array[String]) {
[error]   ^
[error] two errors found
[error] (compile:compileIncremental) Compilation failed
[error] Total time: 2 s, completed 2015/10/06 6:27:08
1. Waiting for source changes... (press enter to interrupt)
[info] Compiling 1 Scala source to /Users/wakita/tmp/cs1f/scala-2.11/classes...
[info] Running Simple
[info] 1 + 2 + ... + 10 = 14
[success] Total time: 3 s, completed 2015/10/06 6:27:19
2. Waiting for source changes... (press enter to interrupt)
[info] Compiling 1 Scala source to /Users/wakita/tmp/cs1f/scala-2.11/classes...
[info] Running Simple
[info] 1 + 2 + ... + 10 = 55
[success] Total time: 1 s, completed 2015/10/06 6:27:30
3. Waiting for source changes... (press enter to interrupt)
```

プログラムを修正すると
自動的にコンパイル＆実行

継続的実行をやめるときは
enter

sbt の利用方法

- 作業用のフォルダを準備する
  - **build.sbt**
    プロジェクトの設定
  - **src**
    プログラムを保存するディレクトリ
  - **test**
    テストを保存するディレクトリ
  - **project**
    sbtが勝手に作る



次回，小テスト

- 本日の前半の内容（プログラムの実行方式）について復習して下さい