

工学部専門科目

「プログラミング言語」 SICP
第4章 ~ 超言語的抽象 ~
その1

五十嵐 淳

igarashi@kuis.kyoto-u.ac.jp

京都大学 大学院情報学研究科
通信情報システム専攻

June 9, 2015

今日のメニュー

4.1 The Metacircular Evaluator

4.1.1 The Core of the Evaluator

4.1.2 Representing Expressions

4.1.3 Evaluator Data Structures

4.1.4 Running the Evaluator as a Program

4.1.5 Data as Programs

4.1.6 Internal Definitions

4.1.7 Separating Syntactic Analysis from Execution

Metalinguistic Abstraction

問題領域に応じた**新しい言語**を作って抽象化

- どんなプログラミング言語も「万能」ではない
- 問題領域に応じた抽象化機構が必要

本章の内容

core Scheme (とその変種) の evaluator (評価器) を作って改造する

“The evaluator, which determines the meaning of expressions in a programming language, is just another program.”

⇒ **Programs as Data!**

中身に入る前に

ごく簡単な言語

$$\begin{aligned} \langle \text{式} \rangle &::= \langle \text{整数} \rangle \\ &| (+ \langle \text{式} \rangle \langle \text{式} \rangle) \\ &| (- \langle \text{式} \rangle \langle \text{式} \rangle) \end{aligned}$$

のインタプリタ $\text{eval}(\langle \text{式} \rangle)$ を考えよう

式の例: 4, (+ 1 3), (+ (- 3 1) 5)

eval の定義

e を式, i を整数とする.

$$\boxed{\text{eval}(e) = i}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{eval}(i) \\ \text{eval}((+ e_1 e_2)) \\ \text{eval}((- e_1 e_2)) \end{array} \right. = \begin{array}{l} i \\ \text{eval}(e_1) \text{ と } \text{eval}(e_2) \text{ の和} \\ \text{eval}(e_1) \text{ と } \text{eval}(e_2) \text{ の差} \end{array}$$

ポイント

- 入力プログラムは単なるリスト
 - ▶ $(+ 1 2)$ は3要素のリスト
- 入力の形に関する場合分けと部分式の取り出し
- 部分式に対する再帰的な `eval` の呼び出し
- 解釈される言語のプリミティブ ($+$ や $-$) を, 解釈する言語の概念 (和, 差) に帰着する

4.1 The Metacircular Evaluator

- metacircular: 定義する・される言語が等しい
- 基本方針は 3.2 節の式の評価モデル
- 核となる (相互再帰) 関数: eval と apply
- 式のデータ表現 (4.1.2 節)
 - ▶ 式の種類を調べる関数: assignment?, if?, ...
 - ▶ 部分式を取り出す関数: assignment-variable, assignment-value, if-predicate, if-consequent, ...
 - ▶ 式を作る関数: make-procedure, make-if
 - ★ 背景黄色 で書くので, 具体的な定義はひとまず気にしないでよい

eval と apply の定義

- eval

- ▶ 引数: 評価対象の式 `exp` と環境 (変数とその値の情報) `env`
- ▶ 返値: `exp` を `env` の下で評価した結果 (の値)
- ▶ 式の形で場合分け、関数呼出式の場合は関数部・引数部を評価して `apply` を呼び出す
 - ⇒ 式の種類が増えると `eval` の再定義が必要 (cf. Ex.4.3)

- apply

- ▶ 引数: 手続きとその引数 (の値)
- ▶ 返値: 手続きを引数に適用した結果 (の値)
- ▶ 仮引数と実引数の関連情報を環境に追加して関数本体を評価する (`eval` を呼び出す)


```
(define (eval exp env)
  (cond ;; exp の種類で場合分け
        ((self-evaluating? exp) ...)
        ((variable? exp) ...)
        ((quoted? exp) ...)
        ((assignment? exp) ...)
        ((definition? exp) ...)
        ((if? exp) ...)
        ((lambda? exp) ...)
        ((begin? exp) ...)
        ((cond? exp) ...)
        ((application? exp) ...)
        (else (error ...))))
```

```

(define (eval exp env)
  (cond ...
    ((application? exp) ;; 関数適用の形ならば
     ;; 関数部 (operator) と引数 (operands) の
     ;; 評価結果を apply に渡す
     (apply (eval (operator exp) env)
             (list-of-values (operands exp) env)))
    ...))
(define (list-of-values exps env)
  (if (no-operands? exps) '()
      (cons (eval (first-operand exps) env)
            (list-of-values
              (rest-operands exps) env))))

```

関数適用式の評価 (3.2節より)

環境 A のもとでの関数適用式 $(e_0 e_1 \dots e_n)$ の値:

- A のもとでの e_i の値を v_i とする
- 関数閉包 v_0 の中身の環境を B , パラメータを x_1, \dots, x_n とする
 - ▶ v_0 が関数閉包でなかったり, パラメータの数が n でない場合はエラー
- 束縛 $x_i: v_i$ から成る新しいフレームを作り, B を指すようにする. この環境を C とする
- C のもとで関数閉包の本体式 e の値を求めたものが, 関数適用式全体の値

```
(define (apply procedure arguments)
  (cond ;; procedure の種類で場合分け
        ((primitive-procedure? procedure)
         ;; プリミティブ手続き
         ...)
        ((compound-procedure? procedure)
         ;; ユーザ定義手続き
         ...)
        (else
         (error ...))))
```

```
(define (apply procedure arguments)
  (cond ...
    ((compound-procedure? procedure)
     ;; ユーザ定義手続き
     (eval-sequence ;; 関数本体の式を評価
      (procedure-body procedure)
      ;; 仮・実引数情報で拡張した環境下で
      (extend-environment
       (procedure-parameters procedure)
       arguments
       (procedure-environment procedure))))
    (else
     (error ...))))
```

```
(define (eval-sequence exps env)
  ;; 式のリストを前から評価して最後の式の値を返す
  (cond ((last-exp? exps)
         (eval (first-exp exps) env))
        (else (eval (first-exp exps) env)
                (eval-sequence
                 (rest-exps exps) env))))
```

4.1.2 Representing Expressions

定義される言語の構文 (BNF 定義)

```
〈式〉 ::= 〈定数〉 | 〈変数〉 | 〈引用〉  
        | 〈代入〉 | 〈定義〉 | 〈ラムダ〉  
        | 〈条件式〉 | 〈逐次実行〉  
        | 〈関数適用〉 | 〈cond 式〉  
〈定数〉 ::= 〈数値定数〉 | 〈文字列定数〉  
〈変数〉 ::= 〈シンボル〉  
〈引用〉 ::= (quote 〈式〉)  
〈代入〉 ::= (set! 〈変数〉 〈式〉)  
〈定義〉 ::= (define 〈変数〉 〈式〉)  
        | (define (〈変数〉 〈変数〉...〈変数〉)  
            〈式〉...〈式〉)
```

〈ラムダ〉 ::= (lambda (〈変数〉...〈変数〉)
 〈式〉...〈式〉)
〈条件式〉 ::= (if 〈式〉 〈式〉 〈式〉)
〈逐次実行〉 ::= (begin 〈式〉...〈式〉)
〈関数適用〉 ::= (〈式〉 〈式〉...〈式〉)
〈cond 式〉 ::= (cond 〈節〉...〈節〉)
〈節〉 ::= (〈条件〉 〈式〉...〈式〉)
 | (else 〈式〉...〈式〉)
〈条件〉 ::= 〈式〉

(cond で else 節は最後に来なければならない, という条件は無視している.)

式の構造を表現するための関数

- 式を作る関数: `make-procedure`, `make-if`
- 式の種類を調べる関数: `assignment?`, `if?`, ...
- 部分式を取り出す関数: `assignment-variable`,
`assignment-value`, `if-predicate`,
`if-consequent`, `if-alternative`, ...
 - ▶ 定義 (`define`) のための関数は読み替えを行う

```
(define (<変数0> <変数1> ... <変数n>)  
  <式1> ... <式m>)  
      ↓ 読み替え
```

```
(define <変数0>  
  (lambda (<変数1> ... <変数n>) <式1> ... <式m>))
```

Derived expressions

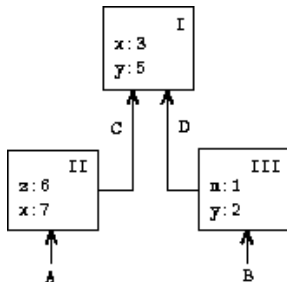
より単純な機能の組み合わせで表された複合的機能を持つ式:

- より単純な機能の組み合わせに**変換**し eval に渡す
- つまり evaluator によるマクロ展開
- 先程の define の読み替えも変換の一種
- cond->if 関数: cond 式を if の繰り返しに変換

```
(define (eval exp env)
  (cond
    ...
    ((cond? exp) (eval (cond->if exp) env))
    ...))
```

4.1.3 評価器が内部で使うデータ構造

- 真偽値: シンボル `false` が偽, それ以外は真
- 手続き値:
 - ▶ `(procedure <仮引数リスト> <本体> <環境>)`
 - ▶ プリミティブ関数は後述
- 環境: 変数とその値の関係を保持したフレームの列



環境操作のインターフェース

- `the-empty-environment`
 - … 空の環境 (前頁フレーム I の指す「親」環境)
- `(lookup-variable-value <変数> <環境>)`
 - … <環境> から <変数> の値を取ってくる
 - ▶ `(lookup-variable-value 'y A) ⇒ 5`
- `(extend-environment <変数列> <値列> <環境>)`
 - ⇒ <環境> に <変数列> と <値列> からなる新しいフレームを追加した新しい環境を返す
 - ▶ `(extend-environment '(z y) '(2 4) A) ⇒`

- (define-variable! <変数> <値> <環境>)
... <環境> 中の最初のフレームに変数束縛を追加
 - ▶ (define-variable! 'y 4 A) ⇒

- (set-variable-value! <変数> <値> <環境>)
... <環境> 中の <変数> の値を <値> に更新
 - ▶ (set-variable-value! 'y 8 A) ⇒

環境のデータ構造

ここでの (単純だがあまり効率のよくない) 実装方法:

- 環境 = フレームのリスト
- フレーム = (同じ長さの) 変数リストと値リストのペア

```
(define (make-frame variables values)
  (cons variables values))
(define (extend-environment vars vals base-env)
  (if (= (length vars) (length vals))
      (cons (make-frame vars vals) base-env)
      ... ;; エラー処理
  ))
```

4.1.4 評価器を走らせる

- 初期環境の定義
- プリミティブ手続きの実現
- Read-Eval-Print Loop (REPL)

初期環境の定義

プリミティブ手続き・真偽値を空の環境に追加

```
(define (setup-environment)
  (let ((initial-env
        (extend-environment
         (primitive-procedure-names)
         (primitive-procedure-objects)
         the-empty-environment)))
    (define-variable! 'true true initial-env)
    (define-variable! 'false false initial-env)
    initial-env))
```


プリミティブ手続きの実現 (1/2)

手続き値の表現:

- (procedure 〈仮引数リスト〉 〈本体〉 〈環境〉)

プリミティブ手続きの実現 (1/2)

手続き値の表現:

- (procedure <仮引数リスト> <本体> <環境>)
- (primitive <Scheme プリミティブ>)
 - ▶ initial-env は primitive-procedures (名前とそれが指す手続きのペアのリスト) から作る

```
(define primitive-procedures
  (list (list 'car car)
        (list 'cdr cdr)
        ...
  ))
```

プリミティブ手続きの実現 (2/2)

```
(define (apply procedure arguments)
  (cond ((primitive-procedure? procedure)
        (apply-primitive-procedure procedure
                                     arguments))
        ...))

(define (apply-primitive-procedure proc args)
  (apply-in-underlying-scheme
   (primitive-implementation proc) args))
```

プリミティブ手続きの実現 (2/2)

```
(define apply-in-underlying-scheme apply)
(define (apply procedure arguments)
  (cond ((primitive-procedure? procedure)
        (apply-primitive-procedure procedure
                                     arguments))
        ...))
(define (apply-primitive-procedure proc args)
  (apply-in-underlying-scheme ;; 元々の apply!
    (primitive-implementation proc) args))
```

定義の順番に注意!!

プリミティブ手続きの実現 (3/2)

apply の再定義を避ける別のやり方:

```
(define (my-apply procedure arguments)
  (cond ((primitive-procedure? procedure)
        (apply-primitive-procedure procedure
                                     arguments))
        (...)))

(define (apply-primitive-procedure proc args)
  (apply ;; 元々の apply!
        (primitive-implementation proc) args))
```

Read-Eval-Print Loop

関数 driver-loop:

- ① 入力プロンプトを出力
- ② read でキーボードから式を読み込む
- ③ eval で大域環境のもとで評価
 - ▶ 環境は評価中に書き換わる可能性あり
- ④ 結果を出力
- ⑤ 最初に戻る

宿題：

- Ex. 4.4, 4.6, 4.11 (締切 6/23(火) 16:30)
 - ▶ 講義の web page に教科書のコードあり
- レポートには
 - ▶ 考え方の説明
 - ▶ プログラムリストと考え方の対応
 - ▶ 実行例を示すこと
- レポート (pdf) とプログラムファイルを提出システムを通じて提出
- 友達に教えてもらったなら、その人の名前を明記
- web は出典を明記 (「同じ」回答は減点)