

# Haskell Notes v.0

Ichi Kanaya

2025

## 0.1 変数

変数  $x$  に値を代入するには次のようにする.\*<sup>1</sup>

$$x = 1 \tag{1}$$

変数という呼び名に反して、変数の値は変えられない。そこで変数に値を代入するとは呼ばずに、変数名に値を**束縛**するという。

変数の値がいつでも変化しないことを**参照透過性**と呼ぶ。プログラマーが変数の値を変化させたい理由はユーザー入力、ループ、例外、内部状態、大域ジャンプ、継続を扱いたいからであろう。しかし、後に見るようにループ、例外、内部状態、大域ジャンプ、継続に変数の破壊的代入は必要ない。ユーザー入力に関しても章を改めて取り上げる。

本書では変数名を原則 1 文字として、イタリック体で表し、 $w, x, y, z$  のような  $n$  以降のアルファベットを使う。

## 0.2 関数

関数  $f$  は次のように定義できる.\*<sup>2</sup>

$$fx = x + 1 \tag{2}$$

ここに  $x$  は関数  $f$  の引数である。引数は括弧でくるまない。

本書では関数名を原則 1 文字として、イタリック体で表し、 $f, g, h$  のようにアルファベットの  $f$  以降の文字を使う。ただし有名な関数につ

---

\*<sup>1</sup> Haskell では `x = 1` と書く。

\*<sup>2</sup> Haskell では `f x = x+1` と書く。

いてはローマン体で表し、文字数も2文字以上とする。たとえば  $\sin$  などの三角関数や指数関数がそれにあたる。

変数  $x$  に関数  $f$  を適用する場合は次のように書く。<sup>\*3</sup>

$$z = fx \quad (3)$$

関数  $f$  が引数をふたつ取る場合は、次のように書く。<sup>\*4</sup>

$$z = fxy \quad (4)$$

なお  $fxy$  は  $(fx)y$  と解釈される。前半の  $(fx)$  は1引数の関数とみなせる。

## 0.3 ラムダ

関数とは、変数名に束縛されたラムダ式である。ラムダ式は次のように書く。<sup>\*5</sup>

$$f = \lambda x \mapsto x + 1 \quad (5)$$

本書では無名変数  $\diamond$  を用いた以下の書き方も用いる。<sup>\*6</sup>

$$f = (\diamond + 1) \quad (6)$$

$$= \lambda x \mapsto x + 1 \quad (7)$$

---

<sup>\*3</sup> Haskell では  $z = f\ x$  と書く。

<sup>\*4</sup> Haskell では  $z = f\ x\ y$  と書く。

<sup>\*5</sup> Haskell では  $f = \lambda x \rightarrow x+1$  と書く。

<sup>\*6</sup> 無名変数は Haskell には無いが、代わりに「セクション」という書き方ができる。式  $(\diamond + 1)$  は Haskell では  $(+1)$  と書く。

## 0.4 ローカル変数

関数内でローカル変数を使いたい場合は以下のように行う.\*<sup>7</sup>

$$z = \text{let } \{y = 1\} \text{ in } x + y \quad (8)$$

ローカル変数の定義は次のように後置できる.\*<sup>8</sup>

$$z = x + y \text{ where } \{y = 1\} \quad (9)$$

## 0.5 クロージャ

ラムダ式を返す関数は、ラムダ式内部に値を閉じ込めることができる。

$$f n = \lambda x \mapsto n + x \quad (10)$$

関数  $f$  に引数  $n$  を与えると、新たな 1 引数関数が得られる。例を挙げる。

$$n = 3 \quad (11)$$

$$g = f n \quad (12)$$

この例では、関数  $g$  の中に値  $n = 3$  が閉じ込められているため  $g1$  は 4 と評価される。値を閉じ込めたラムダ式をクロージャと呼ぶ。

---

\*<sup>7</sup> Haskell では  $z = \text{let } \{y = 1\} \text{ in } x+y$  と書く。let 節内の式がひとつの場合、中括弧は省略可能である。式が複数になる場合は ; で区切る。

\*<sup>8</sup> Haskell では  $z = x+y \text{ where } \{y = 1\}$  と書く。where 節内の式がひとつの場合、中括弧は省略可能である。式が複数になる場合は ; で区切る。

## 0.6 型

すべての変数、関数には**型**がある。代表的な型にはブール型、整数型、浮動小数点型、文字型がある。以降、ブール型を  $\mathbb{B}$  で、整数型を  $\mathbb{Z}$  で表す。<sup>\*9</sup>

浮動小数点型は実数全体を表現できないが、本書では実数全体を意味する  $\mathbb{R}$  で表すことにする。<sup>\*10</sup>

本書では対応する、あるいは近い数学概念がある場合、型名をブラックボード体 1 文字で書く。文字型のように対応する数学概念がない場合はボールドローマン体を用いる。文字型は **Char** とする。<sup>\*11</sup>

変数  $x$  の型が  $\mathbb{Z}$  のとき、以下のように**型注釈**を書く。<sup>\*12</sup>

$$x :: \mathbb{Z} \tag{13}$$

同じことを数学者は  $x \in \mathbb{Z}$  と書くことを好むが、記号  $\in$  は別の用途で使うため  $::$  を用いる。

1 引数関数の型は次のように注釈できる。<sup>\*13</sup>

$$f :: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z} \tag{14}$$

ここで関数  $f$  は整数型の引数をひとつとり、整数型の値を返す。

<sup>\*9</sup> Haskell ではブール型を `Bool`、整数型を `Int`、多倍長整数型を `Integer` と書く。

<sup>\*10</sup> Haskell では単精度浮動小数点型を `Float`、倍精度浮動小数点型を `Double` と書く。

<sup>\*11</sup> Haskell では Unicode 文字型を `Char` と書く。

<sup>\*12</sup> Haskell では `x :: Int` と書く。

<sup>\*13</sup> Haskell では `f :: Int -> Int` と書く。

2 引数関数の方は次のように注釈できる.\*<sup>14</sup>

$$f :: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z} \quad (15)$$

ここで関数  $f$  は整数型の引数をふたつとり、整数型の値を返す。型  $\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}$  は  $\mathbb{Z} \rightarrow (\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z})$  と解釈される。

$(\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z})$  型の関数を受け取り、 $(\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z})$  型の関数を返す関数は次の型を持つ.\*<sup>15</sup>

$$f :: (\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}) \rightarrow (\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}) \quad (16)$$

なお後半の括弧は省略可能なので

$$f :: (\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}) \rightarrow \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z} \quad (17)$$

と書いても良い。

## 0.7 リテラル

リテラルは次のように書く.\*<sup>16</sup>

$$z = 1 \quad (18)$$

---

\*<sup>14</sup> Haskell では `f :: Int -> Int -> Int` と書く。

\*<sup>15</sup> Haskell では以下のように書く。

`f :: (Int -> Int) -> (Int -> Int)`

\*<sup>16</sup> Haskell では `z = 1` と書く。

## 0.8 条件

条件分岐は次のように書く.\*<sup>17</sup>

$$z = \text{if } x > 0 \text{ then } x \text{ else } -x \quad (19)$$

条件分岐の代わりに以下のようなパターンマッチも使える.\*<sup>18</sup>

$$f = \text{case } x \text{ of } \begin{cases} 1 \rightarrow 1 \\ \_ \rightarrow 0 \end{cases} \quad (20)$$

この場合  $x \equiv 1$  ならば  $f$  は 1 を, そうでなければ  $f$  は 0 を返す. ここに  $\_$  はすべてのパターンに一致する記号である. パターンマッチは上から順に行われる.

関数定義にもパターンマッチを使える.\*<sup>19</sup>

$$\begin{cases} f1 = 1 \\ f\_ = 0 \end{cases} \quad (21)$$

関数定義には次のようにガードと呼ばれる条件を付与することがで

---

\*<sup>17</sup> Haskell では `z = if x>0 then x else -x` と書く.

\*<sup>18</sup> Haskell では以下のように書くのが一般的である.

```
f = case x of 1 -> 1
              _ -> 0
```

\*<sup>19</sup> Haskell では次のように書く.

```
f 1 = 1
f _ = 0
```

きる.\*<sup>20</sup>

$$\begin{cases} f x \mid x > 0 = x \\ \mid \text{otherwise} = -x \end{cases} \quad (22)$$

## 0.9 関数の再帰呼び出し

関数は再帰的に呼び出せる． $n \geq 0$  を前提とすると， $n$  番目のフィボナッチ数を計算する関数 `fib` を次のように定義できる．\*<sup>21</sup>

$$\begin{cases} \text{fib } 0 = 0 \\ \text{fib } 1 = 1 \\ \text{fib } n = \text{fib } (n-1) + \text{fib } (n-2) \end{cases} \quad (23)$$

## 0.10 関数合成

関数の合成は次のように書く．\*<sup>22</sup>

$$k = g \bullet f \quad (24)$$

\*<sup>20</sup> Haskell では次のように書く．

```
f x | x > 0      = x
    | otherwise = -x
```

\*<sup>21</sup> Haskell では次のように書く．ただし Haskell には符号なし整数型がないために `n` が正であることを別に担保する必要がある．またこのコードは無駄な再帰呼び出しを行っており実用的ではない．

```
fib 0 = 0
fib 1 = 1
fib n = fib (n-1) + fib (n-2)
```

\*<sup>22</sup> Haskell では `k = g.f` と書く．



関数合成演算子  $\bullet$  は以下のように右結合する.

$$f = f_3 \bullet f_2 \bullet f_1 \quad (25)$$

$$= (f_3 \bullet f_2) \bullet f_1 \quad (26)$$

$$(27)$$

優先順位の低い関数合成演算子もあると便利である. そのために演算子  $\$$  を導入する. 例を挙げる.\*<sup>23</sup>

$$k = h \$ g \bullet f \quad (28)$$

$$= h \bullet (g \bullet f) \quad (29)$$

いま任意の関数  $f$  に対して

$$\text{id } f = f \quad (30)$$

なる関数  $\text{id}$  があり, かつ任意の関数  $f, g, h$  に対して

$$(h \bullet g) \bullet f = h \bullet (g \bullet f) \quad (31)$$

が成り立つとする. このとき関数は**モノイド**であるという.

## 0.11 タプル

複数の変数をまとめてひとつの**タプル**にすることができる. 例を挙げる.\*<sup>24</sup>

$$z = (x, y) \quad (32)$$

---

\*<sup>23</sup> Haskell では  $k = h \$ g.f$  と書く.

\*<sup>24</sup> Haskell では  $z = (x, y)$  と書く.

タプルの型は、要素の型をタプルにしたものである。例えば  $\mathbb{Z}$  が 2 個からなるタプルの型は次のようになる。<sup>\*25</sup>

$$z :: (\mathbb{Z}, \mathbb{Z}) \quad (33)$$

要素を含まないタプルを**ユニット**と呼ぶ。ユニットは次のように書く。<sup>\*26</sup>

$$z = () \quad (34)$$

ユニットの型は**ユニット型**で、型注釈を次のように書く。<sup>\*27</sup>

$$z :: () \quad (35)$$

## 0.12 リストと内包表記

ある変数がリストであるとき、その変数がリストであることを忘れないように  $x_s$  と小さく  $s$  を付けることにする。

空リストは次のように定義する。<sup>\*28</sup>

$$x_s = [] \quad (36)$$

任意のリストは次のように構成する。

$$x_s = x_0 : x_1 : x_2 : \cdots : [] \quad (37)$$

---

<sup>\*25</sup> In Haskell,  $z :: (\text{Int}, \text{Int})$ .

<sup>\*26</sup> Haskell では  $z = ()$  と書く。

<sup>\*27</sup> Haskell では  $z :: ()$  と書く。

<sup>\*28</sup> Haskell では  $xs = []$  と書く。

リストの型はその構成要素の型をブラケットで包んで表現する.\*<sup>29</sup>

$$x_s :: [\mathbb{Z}] \quad (38)$$

リストは次のように構成することもできる.\*<sup>30</sup>

$$x_s = [1, 2, \dots, 100] \quad (39)$$

リストの構成には**内包表記**が使える。例を挙げる.\*<sup>31</sup>

$$x_s = [x^2 \mid x \in [1, 2 \dots 100], x > 50] \quad (40)$$

リストとリストをつなぐ場合は**リスト結合演算子 #**を用いる.\*<sup>32</sup>

$$z_s = x_s \# y_s \quad (41)$$

## 0.13 マップと畳み込み

リスト  $x_s$  の各要素に関数  $f$  を適用して、その結果をリスト  $z_s$  に格納するためには次のように**マップ演算子  $\otimes$** を用いる.\*<sup>33</sup>

$$z_s = f \otimes x_s \quad (42)$$

リスト  $x_s$  の各要素を先頭から順番に 2 項演算子を適用して、その結果を得るには**畳み込み演算子**を用いる。例えば整数リストの和は次の

\*<sup>29</sup> Haskell では `xs :: [Int]` と書く。

\*<sup>30</sup> Haskell では `xs = [1, 2..100]` と書く。

\*<sup>31</sup> Haskell では次のように書く。

`xs = [x^2 | x <- [1, 2..100], x>50]`

\*<sup>32</sup> Haskell では `zs = xs ++ ys` と書く。

\*<sup>33</sup> Haskell では `zs = f `map` xs` と書く。

ように書ける.\*<sup>34</sup>

$$z = \bigcup_0^{(\diamond+\diamond)} x_s \quad (43)$$

リスト  $x_s$  が  $[x_0, x_1, \dots, x_n]$  のとき、一般に

$$\bigcup_a^{\star} x_s = a \star x_0 \star x_1 \dots x_{n-1} \star x_n \quad (44)$$

である.

畳み込み演算子には次の右結合バージョンが存在する.\*<sup>35</sup>

$$\bigcup_a^{\star} x_s = a \star (x_0 \dots (x_{n-2} \star (x_{n-1} \star x_n))) \quad (45)$$

## 0.14 Maybe

計算は失敗する可能性がある. 例えば

$$z = y/x \quad (46)$$

のときに  $x \equiv 0$  であったとしたら、この計算は失敗する. プログラムが計算を失敗した場合、たいていのプログラマは大域ジャンプを試みる. しかし大域ジャンプは変数の書き換えを行うことであるから、別の方法が望まれる. Haskell では失敗する可能性がある場合には Maybe という機構が使える.

いま関数  $f$  が引数  $x$  と  $y$  を取り、 $x \neq 0$  であるならば  $y/x$  を返すとする. もし  $x \equiv 0$  であれば失敗を意味する  $\emptyset$  (ナッシング) を返すとする.

\*<sup>34</sup> Haskell では  $z = \text{foldl1 } 0 \ (+) \ xs$  と書く.

\*<sup>35</sup> Haskell では  $\text{foldr}$  を用いる.

る．すると関数  $f$  の定義は次のようになる．

$$f y x = \text{if } x \neq 0 \text{ then } y/x \text{ else } \emptyset \dots (\text{不完全}) \quad (47)$$

残念ながら上式は不完全である．なぜならば  $x \neq 0$  のときの戻り値は数であるのに対して、 $x \equiv 0$  のときの戻り値は数ではないからである．そこで

$$\tilde{f} y x = \text{if } x \neq 0 \text{ then } \text{Just } \langle y/x \rangle \text{ else } \emptyset \quad (48)$$

とする．ここに  $\text{Just } \langle y/x \rangle$  は数  $y/x$  から作られる、Maybe で包まれた数である．

整数型  $\mathbb{Z}$  を Maybe で包む場合は  $?\langle\mathbb{Z}\rangle$  と書く．Maybe で包まれた型を持つ変数は  $x_?$  のように小さく  $?$  をつける．例を挙げる．<sup>\*36</sup>

$$x_? :: ?\langle\mathbb{Z}\rangle \quad (49)$$

Maybe で包まれた型を持つ変数は、値を持つか  $\emptyset$  (ナッシング) であるかのいずれかである．値をもつ場合は

$$x_? = \text{Just } \langle 1 \rangle \quad (50)$$

のように書く．<sup>\*37</sup>

Maybe 変数が値を持たない場合は

$$x_? = \emptyset \quad (51)$$

と書く．<sup>\*38</sup>

<sup>\*36</sup> Haskell では `xm :: Maybe Int` と書く．

<sup>\*37</sup> Haskell では `xm = Just 1` と書く．

<sup>\*38</sup> Haskell では `xm = Nothing` と書く．

## 0.15 Maybe に対する計算

Maybe 変数に、非 Maybe 変数を受け取る関数を適用することは出来ない。そこで特別な演算子  $\textcircled{S}$  を用いる。<sup>\*39</sup>

$$z? = (\diamond + 1) \textcircled{S} x? \quad (52)$$

ここに演算子  $\textcircled{S}$  は

$$\text{Just} \langle fx \rangle = f \textcircled{S} \text{Just} \langle x \rangle \quad (53)$$

$$\emptyset = f \textcircled{S} \emptyset \quad (54)$$

と定義される。

## 0.16 型パラメタ

型をパラメタとして扱うことができる。任意の型を  $\mathbf{a}$  と、ボールド体小文字で書く。ある型  $\mathbf{a}$  の引数を取り、同じ型を返す関数の型は次のように書ける。<sup>\*40</sup>

$$f :: \mathbf{a} \rightarrow \mathbf{a} \quad (55)$$

**型パラメタ**には制約をつけることができる。型の集合を**型クラス**と呼び、フラクチュール体で書く。たとえば数を表す型クラスは  $\mathfrak{Num}$  である。型パラメタ  $\mathbf{a}$  が型クラス  $\mathfrak{Num}$  に属するとき、上述の関数  $f$  の型注釈は次のようになる。<sup>\*41</sup>

$$f :: \mathfrak{Num} \supset \mathbf{a} \Rightarrow \mathbf{a} \rightarrow \mathbf{a} \quad (56)$$

---

<sup>\*39</sup> Haskell では  $zm = (+1) \langle \$ \rangle xm$  と書く。

<sup>\*40</sup> Haskell では  $f :: \mathbf{a} \rightarrow \mathbf{a}$  と書く。

<sup>\*41</sup> Haskell では  $f :: \mathfrak{Num} \mathbf{a} \Rightarrow \mathbf{a} \rightarrow \mathbf{a}$  と書く。

型クラスは型に制約を与える.

**TK.**  $\text{Num } a \Rightarrow x :: a$  ならば  $x$  が持つべき演算子.

**TK.** 型クラスの例.

## 0.17 関手

型  $\mathbf{a}$  のリストの変数は

$$x_s :: [\mathbf{a}] \quad (57)$$

という型注釈を持つ. 型  $\mathbf{a}$  型の Maybe の変数は

$$x_? :: ? \llbracket \mathbf{a} \rrbracket \quad (58)$$

という型注釈を持つ.

普段遣いの関数

$$f :: \mathbf{a} \rightarrow \mathbf{a} \quad (59)$$

をリスト変数  $x_s$  に適用する場合は

$$z_s = f \otimes x_s \quad (60)$$

とする. 同じく関数  $f$  を Maybe 変数  $x_?$  に適用する場合は

$$z_? = f \circledcirc x_? \quad (61)$$

とする.

リストも Maybe も元の型  $\mathbf{a}$  から派生しており, 関数適用のための特別な演算子を持つことになる. そこで, リストや Maybe は**関手**という

型クラスに属する，型パラメタを伴う型であるとする．関手の型クラスを  $\mathfrak{F}unctor$  で表す．関手型クラスの  $\mathbf{a}$  型の変数を次のように型注釈する．<sup>\*42</sup>

$$x_* :: \mathfrak{F}unctor \supset \mathbf{f} \Rightarrow \mathbf{f} \langle \mathbf{a} \rangle \quad (62)$$

型クラス  $\mathfrak{F}unctor$  に属する型は  $\textcircled{S}$  演算子を持たねばならない．演算子  $\textcircled{S}$  は次の形を持つ．<sup>\*43</sup>

$$z_* = f \textcircled{S} x_* \quad (63)$$

演算子  $\textcircled{S}$  の型は次のとおりである．

$$\diamond \textcircled{S} \diamond :: (\mathbf{a} \rightarrow \mathbf{b}) \rightarrow \mathbf{f} \langle \mathbf{a} \rangle \rightarrow \mathbf{f} \langle \mathbf{b} \rangle \quad (64)$$

もし変数  $x_*$  の型がリストであれば

$$\textcircled{S} = \otimes \quad (65)$$

であると解釈する．

関手は次の関手則に従う．

$$\text{id} \textcircled{S} x_* = \text{id} x_* \quad (66)$$

$$(g \bullet f) \textcircled{S} x_* = ((g \textcircled{S}) \bullet (f \textcircled{S})) x_* \quad (67)$$

$$= g \textcircled{S} (f \textcircled{S} x_*) \quad (68)$$

Function of parametric type with functor class:<sup>\*44</sup>

$$f :: \mathfrak{F}unctor \supset \mathbf{f} \Rightarrow \mathbf{a} \rightarrow \mathbf{f} \langle \mathbf{a} \rangle \quad (69)$$

<sup>\*42</sup> Haskell では  $xm :: Functor \mathbf{f} \Rightarrow \mathbf{f} \mathbf{a}$  と書く．

<sup>\*43</sup> In Haskell,  $zm = \mathbf{f} \langle \$ \rangle xm$ .

<sup>\*44</sup> In Haskell,  $\mathbf{f} :: Functor \mathbf{f} \Rightarrow \mathbf{a} \rightarrow \mathbf{f} \mathbf{a}$ .



Example function application:<sup>\*45</sup>

$$z_* = (\diamond + 1) \circledast^{\text{Just}} \langle x \rangle \quad (70)$$

## 0.18 関手としての関数

$$f :: \mathbf{q} \rightarrow \mathbf{r} \quad (71)$$

Function as a functor:<sup>\*46</sup>

$$f :: (\diamond \rightarrow \mathbf{r}) \mathbf{q} = (\diamond \rightarrow \mathbf{r}) \llbracket \mathbf{q} \rrbracket \quad (72)$$

Thus,

$$f_2 \bullet f_1 \equiv f_2 \circledast f_1 \quad (73)$$

$$\text{id} \bullet f = \text{id} f = f \quad (74)$$

$$(h \bullet g) \bullet f = ((h \bullet) \bullet (g \bullet)) f \quad (75)$$

$$= h \bullet (g \bullet f) \quad (76)$$

## 0.19 アプリカティブ関手

Pure:<sup>\*47</sup>

$$z_* = * \langle x \rangle \quad (77)$$

---

<sup>\*45</sup> In Haskell, `zm = (+1) <$> Just x`.

<sup>\*46</sup> In Haskell, `f :: ((->) r) q`.

<sup>\*47</sup> In Haskell, `zm = pure x`.

Applicative map:<sup>\*48</sup>

$$z_{\star} = f_{\star} \otimes x_{\star} \quad (78)$$

where

$$f_{\star} :: \mathbf{f} \llbracket \mathbf{a} \rightarrow \mathbf{b} \rrbracket \quad (79)$$

Applicative style:<sup>\*49</sup>

$$z_{\star} = \star \langle \diamond + \diamond \rangle \otimes x_{\star} \otimes y_{\star} \quad (80)$$

or<sup>\*50</sup>

$$z_{\star} = (\diamond + \diamond) (\mathbb{S}) x_{\star} \otimes y_{\star} \quad (81)$$

or

$$z_{\star} = \llbracket f x_{\star} y_{\star} \rrbracket \quad (82)$$

## 0.20 モナド

Returning *List*.

$$\cdot \quad (83)$$

Returning *Maybe*:<sup>\*51</sup>

$$f :: \mathbb{Z} \rightarrow ? \llbracket \mathbb{Z} \rrbracket \quad (84)$$

$$f x = \text{Just} \langle x \rangle \quad (85)$$

---

<sup>\*48</sup> In Haskell,  $zm = f \langle * \rangle xm$ .

<sup>\*49</sup> In Haskell,  $zm = \text{pure } (+) \langle * \rangle xm \langle * \rangle ym$ .

<sup>\*50</sup> In Haskell,  $zm = (+) \langle \$ \rangle xm \langle * \rangle ym$  or  $zm = \text{liftA2 } (+) xm ym$ .

<sup>\*51</sup> In Haskell,  $f :: \text{Int} \rightarrow \text{Maybe Int}$  and  $f x = \text{Just } x$ .

Returning *monad*:

$$f :: \mathbb{Z} \rightarrow^{\mathbf{m}} \langle \mathbf{a} \rangle \quad (86)$$

$$fx = {}^* \langle x \rangle \quad (87)$$

Returning monadic value:<sup>\*52</sup>

$$f :: \mathbf{Monad} \supset \mathbf{m} \Rightarrow \mathbf{a} \rightarrow^{\mathbf{m}} \langle \mathbf{a} \rangle \quad (88)$$

Monadic function binding:<sup>\*53</sup>

$$z_* = x_* \multimap f_1 \multimap f_2 \quad (89)$$

where

$$f_1 :: \mathbb{Z} \rightarrow^? \langle \mathbb{Z} \rangle \quad (90)$$

$$f_2 :: \mathbb{Z} \rightarrow^? \langle \mathbb{Z} \rangle. \quad (91)$$

Function binding of monadic function and non-monadic function:<sup>\*54</sup>

$$z_* = x_* \multimap f \multimap g' \quad \text{where } \{g'w = {}^* \langle gw \rangle\} \quad (92)$$

where

$$f :: \mathbb{Z} \rightarrow^? \langle \mathbb{Z} \rangle \quad (93)$$

$$g :: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}. \quad (94)$$

---

<sup>\*52</sup> In Haskell, `f :: Monad m => a -> m a`.

<sup>\*53</sup> In Haskell, `zm = xm >>= f1 >>= f2`.

<sup>\*54</sup> In Haskell,

```
zm = xm >>= f >>= g'
  where g' w = pure (g w)
```

Another solution is:

$$z_{\star} = (g^{\star} \bullet f) \dashv\!\!\!\rightarrow x_{\star} \quad (95)$$

where  $g^{\star}$  means `liftM g` in Haskell.<sup>\*55</sup>

## 0.21 種

$$\star \rightarrow \star \quad (96)$$

## 0.22 Data

Data:<sup>\*56</sup>

$$\text{data Suit} = \text{Spade} \vee \text{Heart} \vee \text{Club} \vee \text{Diamond} \quad (97)$$

Data with parameters:<sup>\*57</sup>

$$\text{data V}^2 = V^2 \{x :: \mathbb{Z}, y :: \mathbb{Z}\} \quad (98)$$

---

<sup>\*55</sup> In Haskell, `zm = (liftM g . f) xm`.

<sup>\*56</sup> In Haskell,

```
data Suit = Spade | Heart | Club | Diamond
```

<sup>\*57</sup> In Haskell,

```
data V2 = V2 { x :: Int, y :: Int}
```

```
or data V2 = V2 Int Int.
```

## 0.23 型クラスとインスタンス

### 0.24 IO

IO example:<sup>\*58</sup>

$$\text{main} = \text{getLine} \multimap \text{print} \gg * \langle 0 \rangle \quad (99)$$

### 0.25 Do 構文

Do notation:<sup>\*59</sup>

$$z_* = \text{do} \{x' \leftarrow x_*; y' \leftarrow y_*; f x'; g y'\} \quad (100)$$

### 0.26 モノイド則

型  $\mathbf{a}$  の変数  $x, y, z$  について, 特別な変数  $i :: \mathbf{a}$  および二項演算子  $\circ$  があり

$$i \circ x = x \quad (101)$$

$$(x \circ y) \circ z = x \circ (y \circ z) \quad (102)$$

であるとき, 組み合わせ  $(\mathbf{a}, i, \circ)$  をモノイドと呼ぶ.

---

<sup>\*58</sup> In Haskell, `main = getLine >>= print >> return 0.`

<sup>\*59</sup> In Haskell, `z = do {x' <- x; y' <- y; f x'; g y'}.`

同じ型から同じ型への 1 引数関数を改めて  $\mathbf{a} \rightarrow \mathbf{a}$  で表し, 特別な変数  $i$  を関数  $\text{id}$ , 二項演算子を  $\bullet$  とすると以下の関係が成り立つ.

$$\text{id} \bullet f = f \quad (103)$$

$$(h \bullet g) \bullet f = h \bullet (g \bullet f) \quad (104)$$

そこで組み合わせ  $(\mathbf{a} \rightarrow \mathbf{a}, \text{id}, \bullet)$  はモノイドであると言える.

他に, 組み合わせ  $(\mathbb{Z}, 0, +)$  や  $(\mathbb{Z}, 1, \times)$  もモノイドである.

## 0.27 関手則

関手のマップ演算子  $\textcircled{\$}$  は以下の規則に従う.

$$\text{id} \textcircled{\$} x_{\star} = \text{id} x_{\star} \quad (105)$$

$$(g \bullet f) \textcircled{\$} x_{\star} = ((g \textcircled{\$}) \bullet (f \textcircled{\$})) x_{\star} \quad (106)$$

$$= g \textcircled{\$} (f \textcircled{\$} x_{\star}) \quad (107)$$

## 0.28 アプリカティブ関手則

アプリカティブ関手のマップ演算子  $\otimes$  は以下の規則に従う.

$$^* \langle \text{id} \rangle \otimes x_{\star} = x_{\star} \quad (108)$$

$$^* \langle f \rangle \otimes ^* \langle x \rangle = ^* \langle fx \rangle \quad (109)$$

$$f_{\star} \otimes ^* \langle x \rangle = ^* \langle \diamond \$ x \rangle \otimes f_{\star} \quad (110)$$

$$^* \langle \diamond \bullet \diamond \rangle \otimes h_{\star} \otimes g_{\star} \otimes f_{\star} = h_{\star} \otimes (g_{\star} \otimes f_{\star}) \quad (111)$$

## 0.29 モナド則

モナドのマッピング演算子  $\heartsuit$  は以下の規則に従う.

$$\tilde{f} \heartsuit^* \langle x \rangle = \tilde{f}x \quad (112)$$

$$^* \langle \diamond \rangle \heartsuit x_* = x_* \quad (113)$$

$$\tilde{g} \heartsuit (\tilde{f} \heartsuit x_*) = (\tilde{g} \heartsuit \tilde{f}) \heartsuit x_* \quad (114)$$

次のクライスリスターすなわち

$$\tilde{f}^\star = (\tilde{f} \heartsuit \diamond) \quad (115)$$

を用いると, モナド則は次のように書き換えられる.

$$(\tilde{f}^\star)^* \langle x \rangle = \tilde{f}x \quad (116)$$

$$(^* \langle \diamond \rangle^\star) x_* = x_* \quad (117)$$

$$\tilde{g}^\star (\tilde{f}^\star x_*) = (\tilde{g}^\star \tilde{f})^\star x_* \quad (118)$$