

圏論原論 I

Hirokichi Tanaka

2023 年 1 月 10 日

目次

第 1 章	準備	5
1.1	集合	5
1.2	位相空間	5
1.3	二項関係・部分関数・写像（関数）	6
1.3.1	合成と結合律	6
1.4	ユニバース	7
1.5	群・準同型写像・同型写像	7
1.6	体	8
1.7	Haskell の基礎	8
1.7.1	型	8
第 2 章	圏	11
2.1	圏	11
2.1.1	情報隠蔽された対象の探究に圏論が提供する方法論	11
2.1.2	小圏・局所小圏・大圏	12
2.1.3	部分圏	12
2.1.4	双対	12
2.1.5	圏の生成	12
2.2	Haskell における圏 (Hask)	13
2.3	まとめ	13
第 3 章	関手	15
3.1	関手	15
3.1.1	反変関手	15
3.1.2	定数関手	15
3.1.3	忠実関手と充満関手	15
3.1.4	埋め込み関手	16
3.1.5	忘却関手	16
3.2	Haskell の型構築子と関手	16
3.3	2 変数の関手	18
3.4	型クラスと Hask の部分圏	19
3.5	まとめ	20
第 4 章	自然変換	21
4.1	自然変換	21

4.2	Hask における自然変換	21
4.2.1	concat	21
4.2.2	safehead	21
4.2.3	concat と safehead の垂直合成	21
4.2.4	flatten 関数	21
4.3	まとめ	21
4.4	Hask における定数関手	21
4.4.1	length 関数	21
4.5	まとめ	21
第 5 章	関手圏	23
5.1	関手圏	23
第 6 章	圏同値	25
6.1	圏同値	25
6.2	Hask における自然同型	25
6.2.1	mirror 関数	25
6.2.2	Maybe 関手と Either() 関手の間の自然同型	25
6.3	まとめ	25

学習の目安

- 1 準備 「集合とユニバース」と「二項関係・部分関数・写像（関数）」
- 2 準備 「群・準同型写像・同型写像」と「体」
- 3 圏 「圏」
- 4 圏 「Haskell における圏」
- 5 関手 「関手」と「Haskell の型構築子と関手」
- 6 関手 「2 変数の関手」と「型クラスと Hask の部分圏」
- 7 自然変換 「自然変換」
- 8 自然変換 「Hask における自然変換」
- 9 定数関手 「定数関手」
- 10 定数関手 「Hask における定数関手」
- 11 関手圏
- 12 圏同値

第 1 章

準備

1.1 集合

集合とは、ひとまず素朴に「ものの集まり」と定義される。

例 1.1. $\{1, 2, 3\}$ や $\{a, b, c\}$, 自然数全体 \mathbb{N} , 整数全体 \mathbb{Z} , 実数全体 \mathbb{R} , 複素数全体 \mathbb{C} は集合である。

... を元という。

記法 1.1. $a \in S$

定義 1.1. ... を部分集合という。

記法 1.2. $A \subset B$

定義 1.2. 元に関して順序が与えられている集合を順序集合という。順序 \prec は次で定義される。

1. $x \prec x$
2. $x \prec y, x \prec y \rightarrow x = y$
3. $x \prec y, y \prec z \rightarrow x \prec z$

定義 1.3. 集合 S が与えられたとき, S の部分集合の全体 $\mathcal{P}S = \{a : \text{set} \mid a \subset S\}$ ^{*1} を S の冪集合という。

集合を「ものの集まり」と素朴に定義することは、矛盾を孕んでいる。この矛盾を避けるための議論はのちに行う。

定義 1.4. 積集合

記法 1.3. $A \times B$

1.2 位相空間

... 面倒くさい

^{*1} 記法が未定義

1.3 二項関係・部分関数・写像（関数）

定義 1.5. 集合 A, B に対して $R \subset A \times B^{*2}$ であるとき, R は A と B の二項関係であるという.

定義 1.6. R が集合 A, B の二項関係であるとする. 各集合の元 $a \in A$ と $b \in B$ について $(a, b) \in R$ であるとき, a と b に間に R の関係があるという.

記法 1.4. a と b の間に R の関係があることを aRb と表す.

定義 1.7. 全射

定義 1.8. R が集合 A, B の二項関係であるとする. 任意の $a \in A$ について, とある $b \in B$ が一意に存在して aRb となるとき, R は A から B への写像であるという.

記法 1.5. A から B への写像である f を $f: A \rightarrow B$ で表す.

注意 1.1. 以下では, 「関数」と「写像」を同じ意味で用いる.

定義 1.9. R が集合 A, B の二項関係であるとする.

任意の $a \in A$ について $b, b' \in B$ が存在し,

$$aRb \wedge aRb' \Rightarrow b = b'$$

が成り立つとき, R は A から B への部分関数という.

命題 1.1. 関数は部分関数である. これは定義より明らかである.

命題 1.2. 部分関数は二項関係である. これは定義より明らかである.

1.3.1 合成と結合律

定義 1.10. 集合 A, B, C に対する 2 つの写像 $f: A \rightarrow B$ と $g: B \rightarrow C$ について, その合成写像 $g \circ f: A \rightarrow C$ を

$$(g \circ f)(a) = g(f(a))$$

で定義する. ここで a は A の元である.

定義 1.11. 部分関数の合成

定義 1.12. 二項関係の合成を次で定義する

...

命題 1.3. 二項関係の合成は結合律を満たす

注意 1.2. 一般に, 結合律とは...

命題 1.4. 写像の合成は結合律を満たす. すなわち, 集合 A, B, C, D に対する 3 つの写像 $f: A \rightarrow B, g: B \rightarrow C, h: C \rightarrow D$ について

$$(h \circ g) \circ f = h \circ (g \circ f)$$

*2 積集合が未定義...

が成り立つ.

命題 1.5. 部分関数の合成は結合律を満たす.

定義 1.13. 単射

定義 1.14. 全射

1.4 ユニバース

内包原理とは「集合 S の元 x に対して true か false を返す関数 $\varphi : S \rightarrow \{\text{true}, \text{false}\}$ が与えられたとき, 新たな集合 $\{x \in S \mid \varphi(x) = \text{true}\}$ を構成できる」という集合が満たすべき性質のことをいう.

ここまで, 集合を「ものの集まり」と素朴に定義してきたが, 次のような集合 R を内包原理に基づいて構成しようすると矛盾が生じる.*3

$$R = \{x \mid x \notin x\}$$

もし $R \in R$ であると仮定すると, R の定義により $R \notin R$ となる. 他方, $R \notin R$ と仮定すると, R の定義より $R \in R$ となってしまう.

このような矛盾が発生しないようにするため, ユニバースという概念を導入する.

定義 1.15. 以下の性質を満たす U を**ユニバース**という.

1. x が y の元であり, かつ y が U の元ならば, x は U の元である.
2. x が U の元であり, かつ y が U の元ならば, $\{x, y\}$ は U の元である.
3. x が U の元ならば, 冪集合 $\mathcal{P}x$ が U の元であり, かつ $\cup x$ も U の元である
4. $w = \{0, 1, 2, \dots\}$ は U の元である.
5. $f : a \rightarrow b$ が全射*4で, a が U の元であり, かつ b が U の部分集合ならば, b は U の元である

定義 1.16. ユニバースの元を**小集合**という.

注意 1.3. ユニバースは小集合の全体である.

命題 1.6. ユニバースは小集合ではない

定義 1.17. a と b が小集合のとき関数 $f : a \rightarrow b$ を**小関数**という.

定義 1.18. ユニバースの部分集合を**クラス**という.

命題 1.7. ユニバース U はクラスである.

定義 1.19. 小集合でないクラスを**真のクラス**という.

命題 1.8. ユニバース U は真のクラスである.

1.5 群・準同型写像・同型写像

定義 1.20. 集合 G と二項演算 $\mu : G \times G \rightarrow G$ が以下の条件を満たすとき (G, μ) を**群**という

*3 ラッセルのパラドックスと呼ばれる

*4 未定義...

1. 結合法則
2. 単位元の存在
3. 逆元の存在

定義 1.21. 準同型写像

定義 1.22. 同型写像

定義 1.23. 二項演算について常に $ab = ba$ が成り立つ群を **アーベル群** という.*5

定義 1.24. 位相空間 X と自然数 n に対して次の手続きで決定されるアーベル群 $H_n(X)$ を n 次 **ホモロジー群** と呼ぶ

...

定義 1.25. 可換群

1.6 体

定義 1.26. 以下の条件を満たす集合を**体**という.

1. 加法について可換群になっている. すなわち, 加法について閉じていて, 単位元と逆元が存在する.
2. 乗法について可換群になっている. すなわち, 乗法について閉じていて, 単位元と逆元が存在する.
3. 加法と乗法について分配法則が成り立つ.

体では四則演算が可能である

1.7 Haskell の基礎

関数型プログラミング言語 Haskell では圏論的な視点からライブラリが構築されている.

1.7.1 型

定義済みの型

Haskell には標準ライブラリに `Int`, `Integer`, `Char`, `Float`, `Double`, `Bool` などの型が定義済みである.

新型定義

定義済みの型をもとにタプル, リストあるいは `Maybe` のような型構築子によって新たな型を無限に作り出すことができる.

例 1.2. `[Integer]`, `Maybe Int`, `(Int, [Char])` などはずべて *Haskell* の型である.

データ型

```
1 data Color = Red | Green | Blue
```

*5 ちゃんとかけ

データ型は型クラス `Show` を付与することにより出力が可能となる.

```
1 data Color = Red | Green | Blue deriving Show
```

型クラス

```
1 class Foo a where
2     foo :: a -> String
3 instance Foo Bool where
4     foo True  = "Bool:␣True"
5     foo False = "Bool:␣False"
6 instance Foo Int where
7     foo x = "Int:␣" ++ show x
8 instance Foo Char where
9     foo x = "Char:␣" ++ [x]
10
11 main = do
12     putStrLn $ foo True      -- Bool: True
13     putStrLn $ foo (123::Int) -- Int: 123
14     putStrLn $ foo 'A'       -- Char: A
```

`Foo` 型クラスは任意の型 (`a`) を受け取り、`String` を返却するメソッド `foo` を持っている. `instance` を用いてそれぞれの型が引数に指定された場合の処理を実装している.

第2章

圏

2.1 圏

定義 2.1. 対象の集合 Obj と射の集合 Mor からなり、以下の演算が定義されているものを圏という。

1. 射 $f \in \text{Mor}$ には始域 $\text{dom} f$ および終域 $\text{cod} f$ となる対象がそれぞれ一意に定まる^{*1}
2. $\text{dom} g = \text{cod} f$ を満たす射 $f, g \in \text{Mor}$ に対して、合成射 $g \circ f : \text{dom} f \rightarrow \text{cod} g$ が一意に定まる
3. 射の合成は結合律を満たす。すなわち、対象 $A, B, C, D \in \text{Obj}$ についての射の列 f, g, h が与えられたとき

$$h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f$$

が成り立つ。

4. 任意の対象 $A \in \text{Obj}$ について、次の条件を満たす恒等射 $1_A : A \rightarrow A$ が存在する^{*2}
条件：任意の射の組 $f : A \rightarrow B, g : B \rightarrow A$ に対して $f \circ 1_A = f$ かつ $1_A \circ g = g$

定義 2.2. 同型射と逆射

記法 2.1. 圏 \mathcal{C} の対象 A, B に対して $f : A \rightarrow B$ となる射の全体を $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(A, B)$ で表す。

命題 2.1. ある射の逆射は存在すれば、一意に定まる

2.1.1 情報隠蔽された対象の探究に圏論が提供する方法論

オブジェクト指向プログラミングでは、「知らせる必要のない情報は隠蔽しておくほうが安全である」という情報隠蔽の考え方が重要視される。これに対して、圏論は、対象がもつ情報が隠蔽されている状況下で、射のみから対象について探究するという方法論を提供する。

例 2.1. どのような要素をもつかわからない集合 A について写像 $f : A \rightarrow A$ が定義されていて $f \circ f \circ f$ が恒等写像になるとする。このとき A が3つの要素 a_1, a_2, a_3 をもつと仮定することができ、

$$f(a_1) = a_2, f(a_2) = a_3, f(a_3) = a_1$$

というように、これらの要素が写像 f によって回転していると考えることができる。

^{*1} $\text{dom} f = A \in \text{Obj}(\mathcal{C}), \text{cod} f = B \in \text{Obj}(\mathcal{C})$ のとき $f : A \rightarrow B$ とかく。

^{*2} 恒等写 1_A は一意に定まるので、定義に一意性を加えても問題ない。

2.1.2 小圏・局所小圏・大圏

定義 2.3. 対象の集合, 射の集合がともに小集合である圏を**小圏**という.

例 2.2. 順序集合は小圏である.

定義 2.4. すべての対象の組 A, B に対して $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(A, B)$ が小集合である圏 \mathcal{C} を**局所小圏**という.

定義 2.5. 小圏でない圏を**大圏**という.

例 2.3. すべての小集合を対象とし, それらの間の写像を射とする圏 Set は大圏である.

例 2.4. すべての群を対象とし, それらの間の準同型写像を射とする圏 Grp は大圏である.

例 2.5. すべてのアーベル群を対象とし, それらの間の準同型写像を射とする圏 Ab は大圏である.

例 2.6. すべての位相空間を対象とし, それらの間の連続写像^{*3}を射とする圏 Top は大圏である.

例 2.7. ある体 k に対して, すべての k 次線形空間^{*4}を対象とし, それらの間の k 次線形写像^{*5}を射とする圏 Vect_k は大圏である.

2.1.3 部分圏

定義 2.6. 圏 \mathcal{A} が圏 \mathcal{B} に対して, 以下の3条件を満たすとき, \mathcal{A} は \mathcal{B} の**部分圏**であるという.

1. $\text{Obj}(\mathcal{A})$ が $\text{Obj}(\mathcal{B})$ の部分集合である.
- 2.
- 3.

例 2.8. 圏 Ab ^{*6}は圏 Grp ^{*7}の部分圏である.

2.1.4 双対

定義 2.7. 任意の圏 \mathcal{C} に対して, 対象が \mathcal{C} と同じで, 射の向きが \mathcal{C} と反対になっている圏を**双対圏**という.

記法 2.2. 圏 \mathcal{C} の双対圏を \mathcal{C}^{op} と表す.

注意 2.1. 双対の原理

2.1.5 圏の生成

自明な圏

非自明な圏

*3 未定義?

*4 未定義?

*5 未定義?

*6 ref

*7 ref

命題 2.2. 集合 A に対して写像 $f : A \rightarrow A$ を定める. このとき, 対象の集合 $\text{Obj} = \{A\}$ と, 射の集合 $\text{Mor} = \{1_A, f\}$ からなる圏を得ることができる. ここで, 射 1_A は A についての恒等射である.

証明. $\text{dom} f = \text{cod} f$ であるから, 合成射 $f \circ f$ を定めることができる. このとき $f \circ f = 1_A$ もしくは $f \circ f = f$ である.

$f \circ f = 1_A$ ならば...

...

となる. 一方, $f \circ f = 1_A$ ならば...

...

となる. 以上より, いずれの場合も, 射の合成が結合律を満たすことがわかる. したがって $f \circ f = 1_A$ と定めても $f \circ f = f$ と定めても圏を生成することができる. \square

命題 2.3. 集合 A に対して写像 $f : A \rightarrow A$ を定め, 正の整数 n に対して $f^n = \underbrace{f \circ f \circ \cdots \circ f}_n$ とする. このとき, 対象の集合 $\text{Obj} = \{A\}$ と, 射の集合 $\text{Mor} = \{1_A, f, f^2, \dots, f^n, \dots\}$ からなる圏を得ることができる. ここで, 射 1_A は A についての恒等射である.

証明.

\square

命題 2.4. 集合 A, B に対して, 写像 $f : A \rightarrow B$ と $g : B \rightarrow A$ を定める. このとき, 対象の集合 $\text{Obj} = \{A, B\}$ と射の集合 $\text{Mor} = \{1_A, 1_B, f, g, f \circ g\}$ からなる圏を得ることができる. ここで, 射 $1_A, 1_B$ はそれぞれ A, B についての恒等射である.

証明.

\square

生成系

生成元

関係

定義 2.8. 圏の積を次で定義する

命題 2.5. 圏の積は圏である.

2.2 Haskell における圏 (Hask)

すべての Haskell の型を対象とし, それらの間の関数を射とする圏 Hask は小圏である.

注意 2.2. Haskell において, 型 A, B に対して, 型構築子によってつくられる $A \rightarrow B$ は 1 つの型となる.

2.3 まとめ

第 3 章

関手

3.1 関手

定義 3.1. 圏 \mathcal{A} の対象 $\text{Obj}(\mathcal{A})$ から圏 \mathcal{B} の対象 $\text{Obj}(\mathcal{B})$ への関数を \mathcal{A} から \mathcal{B} への対象関数という.

定義 3.2. 射関数

定義 3.3. 圏 \mathcal{A}, \mathcal{B} に対する対称関数と射関数の組を \mathcal{A} から \mathcal{B} への関手という.

例 3.1. 順序を保存する写像

例 3.2. n 次ホモロジー関手

例 3.3.

例 3.4.

3.1.1 反変関手

定義 3.4. 圏 A^{op} から圏 B への関手を圏 A から圏 B への反変関手という.

例 3.5.

記法 3.1.

注意 3.1.

3.1.2 定数関手

定義 3.5. 定数関手

3.1.3 忠実関手と充満関手

定義 3.6. 忠実

定義 3.7. 充満

定義 3.8. 充満忠実

定義 3.9. 充満部分圏

例 3.6. ... 充満忠実である.

例 3.7. ... 忠実だが充満でない

例 3.8. 充満だが忠実でない

例 3.9. 複素数...

...

... 忠実だが充満でない. (例 1.30)

3.1.4 埋め込み関手

3.1.5 忘却関手

3.2 Haskell の型構築子と関手

List 関手

Haskell における型構築子 `[]` は任意の型 `A` に対して型 `[A]` を対応させる. これは, `Hask` から `Hask` への対称関数とみなせる. 型 `A` と型 `B` および関数 `f :: A -> B` が与えられとき `map f :: [A] -> [B]` が決定される.

...

型構築子 `[]` は **List 関手**と呼ばれる

Maybe 関手

Haskell における型構築子 `Maybe` は...

...

型構築子 `Maybe` は **Maybe 関手**と呼ばれる.

Tree 関手

一般に木構造を生成する型構築子は関手にできる. これを **Tree 関手**と呼ぶ.

```

1 module Tree where
2 import Data.Char
3
4 data Tree a = Empty | Node a (Tree a) (Tree a)
5
6 instance (Show a) => Show (Tree a) where
7     show x = show1 0 x
8
9 show1 :: Show a => Int -> (Tree a) -> String
10 show1 n Empty = ""
11 show1 n (Node x t1 t2) =
12     show1 (n+1) t2 ++
13     indent n ++ show x ++ "\n" ++

```

```

14     show1 (n+1) t1
15
16 indent :: Int -> String
17 indent n = replicate (n*4) ' '
18
19 instance Functor Tree where
20     fmap f Empty = Empty
21     fmap f (Node x t1 t2) =
22         Node (f x) (fmap f t1) (fmap f t2)
23
24 -- test data
25 tree2 = Node "two" (Node "three" Empty Empty)
26         (Node "four" Empty Empty)
27 tree3 = Node "five" (Node "six" Empty Empty)
28         (Node "seven" Empty Empty)
29 tree1 = Node "one" tree2 tree3
30
31 string2int :: String -> Int
32 string2int "one"    = 1
33 string2int "two"    = 2
34 string2int "three"  = 3
35 string2int "four"   = 4
36 string2int "five"   = 5
37 string2int "six"    = 6
38 string2int "seven"  = 7
39 string2int _        = 0
40
41 tree0 = fmap string2int tree1
42
43 {- suggested tests
44 fmap (map toUpper) tree1
45 fmap string2int tree1
46 fmap length tree1
47 -}
48
49 {- another possible instance of Show
50 show1 :: Show a => Int -> (Tree a) -> String
51 show1 n Empty = indent n ++ "E"
52 show1 n (Node x t1 t2) =
53     indent n ++ show x ++ "\n" ++
54     show1 (n+1) t1 ++ "\n" ++
55     show1 (n+1) t2

```

```

56 -}
57
58 {- original instance
59 instance (Show a) => Show (Tree a) where
60     show x = show1 0 x
61
62 show1 :: Show a => Int -> (Tree a) -> String
63 show1 n Empty = ""
64 show1 n (Node x t1 t2) =
65     indent n ++ show x ++ "\n" ++
66     show1 (n+1) t1 ++
67     show1 (n+1) t2
68 -}

```

3.3 2変数の関手

Hom 関手

```

1  {- defined in default startup environment
2  class Functor f where
3      fmap :: (a -> b) -> f a -> f b
4
5  instance Functor ((->) r) where
6      fmap = (.)
7
8  instance Functor ((,) a) where
9      fmap f (x,y) = (x, f y)
10 -}
11
12 class Contra f where
13     pamf :: (a -> b) -> f b -> f a
14
15 newtype Moh b a = Moh {getHom :: a -> b}
16
17 instance Contra (Moh b) where
18     pamf f (Moh g) = Moh (g . f)
19
20 newtype Riap b a = Riap {getPair :: (a,b)}
21
22 instance Functor (Riap b) where
23     fmap f (Riap (x,y)) = Riap (f x,y)
24

```

```

25 {- suggested tests
26 fmap (\x -> x*x) (\x -> x + 1) 10 == 121
27 getHom (pamf (\x -> x*x) (Moh (\x -> x + 1))) 10 == 101
28
29 fmap (\x -> x*x) (10,10) == (10,100)
30 getPair (fmap (\x -> x*x) (Riap (10,10))) == (100,10)
31 -}

```

3.4 型クラスと Hask の部分圏

```

1  import Tree
2  import Flatten
3
4  iSort :: Ord a => [a] -> [a]
5  iSort xs =
6      foldr ins [] xs
7      where
8          ins x [] = [x]
9          ins x (y:ys)
10             | x <= y    = x:y:ys
11             | otherwise = y: ins x ys
12
13  list2tree :: Ord a => [a] -> Tree a
14  list2tree xs =
15      foldl sni Empty xs
16      where
17          sni = flip ins
18          ins x Empty    = Node x Empty Empty
19          ins x (Node y t1 t2)
20             | x <= y    = Node y (ins x t1) t2
21             | otherwise = Node y t1 (ins x t2)
22
23  iSort2 :: Ord a => [a] -> [a]
24  iSort2 = flatten . list2tree
25
26 {- suggested tests
27 map (\x -> x*2) . iSort $ [1,5,3,4,2]
28 iSort . map (\x -> x*2) $ [1,5,3,4,2]
29 -}

```

3.5 まとめ

第 4 章

自然変換

4.1 自然変換

定義 4.1. 自然変換

定義 4.2. ホモトピー

4.2 Hask における自然変換

4.2.1 concat

4.2.2 safehead

4.2.3 concat と safehead の垂直合成

4.2.4 flatten 関数

4.3 まとめ

定義 4.3.

4.4 Hask における定数関手

4.4.1 length 関数

4.5 まとめ

第 5 章

関手圏

5.1 関手圏

定義 5.1. 自然同型

第 6 章

圏同値

6.1 圏同値

定義 6.1. 圏同値

6.2 Hask における自然同型

6.2.1 mirror 関数

6.2.2 Maybe 関手と Either() 関手の間の自然同型

6.3 まとめ

aa