

§4. 写像

写像は集合と同様に現代数学において必要不可欠な概念である.

定義 4.1 X, Y を集合とし, X の任意の元に対して, Y のある元を対応させる規則 f があたえられているとする. このことを

$$f: X \rightarrow Y$$

と表し, f を X から Y への写像または X で定義された Y への写像, X を f の定義域または始域, Y を f の値域または終域という. $Y \subset \mathbf{R}, \mathbf{C}$ のときは f をそれぞれ実数値関数, 複素数値関数ともいう. また, 実数値関数, 複素数値関数を単に関数ともいう.

写像 f によって $x \in X$ に対して $y \in Y$ が対応するとき, $y = f(x)$ と表す. このとき, y を f による x の像, x を f による y の原像または逆像という.

注意 4.1 写像によって x に対して y が対応することを $x \mapsto y$ と表す.

以下では, 簡単のため, 写像に対する定義域, 値域はともに空ではない場合を考える.

例 4.1 問題 1.6 では, \mathbf{R} の部分集合の例として, 区間を定義した. 1変数の微分積分では, 区間で定義された実数値関数を考える. I を区間とすると, I を定義域, \mathbf{R} を値域とする実数値関数 f は $f: I \rightarrow \mathbf{R}$ と表すことができる. 例えば, $a \in \mathbf{R}$ を定数とし, $f: I \rightarrow \mathbf{R}$ を

$$f(x) = a \quad (x \in I)$$

により定めると, f は任意の $x \in I$ に対して a を対応させる定数関数である. また, $a \in \mathbf{R} \setminus \{0\}$ を 0 でない定数, $b \in \mathbf{R}$ を定数とし, $f: I \rightarrow \mathbf{R}$ を

$$f(x) = ax + b \quad (x \in I)$$

により定めると, f は 1 次関数である. 更に, $a \in \mathbf{R} \setminus \{0\}$ を 0 でない定数, $b, c \in \mathbf{R}$ を定数とし, $f: I \rightarrow \mathbf{R}$ を

$$f(x) = ax^2 + bx + c \quad (x \in I)$$

により定めると, f は 2 次関数である.

例 4.2 (定値写像) X, Y を空でない集合とし, $y_0 \in Y$ を 1 つ選んで固定しておく. このとき, 写像 $f: X \rightarrow Y$ を

$$f(x) = y_0 \quad (x \in X)$$

により定める. f を定値写像という. 例 4.1 で述べた定数関数は定値写像の例でもある.

例 4.3 (包含写像, 恒等写像) X, Y を空でない集合とし, $X \subset Y$ とする. このとき, 写像 $\iota: X \rightarrow Y$ を

$$\iota(x) = x \quad (x \in X)$$

により定めることができる. ι を包含写像という. 特に, $X = Y$ のときは ι を id_X または 1_X と表し, X 上の恒等写像という.

例 4.4 (制限写像) X, Y を空でない集合, $f: X \rightarrow Y$ を X から Y への写像とし, $A \subset X, A \neq \emptyset$ とする. このとき, 写像 $f|_A: A \rightarrow Y$ を

$$f|_A(x) = f(x) \quad (x \in A)$$

により定めることができる. $f|_A$ を f の A への制限という.

f, g を写像とする. f と g の定義域が等しく, f と g の値域も等しく, 更に, f, g の定義域の任意の点 x に対して, $f(x) = g(x)$ がなりたつとき, $f = g$ と表し, f と g は等しいという. また, f と g が等しくないときは $f \neq g$ と表す.

写像に対してグラフという集合を対応させることができる. まず, グラフを定義するための準備として, 2つの集合の直積について述べよう. X, Y を集合とする. このとき, $x \in X, y \in Y$ の組 (x, y) 全体からなる集合を $X \times Y$ と表し, X と Y の直積という. すなわち,

$$X \times Y = \{(x, y) \mid x \in X, y \in Y\}$$

である. ただし, 上の組は順序も込みで考えたものであり, $(x, y), (x', y') \in X \times Y$ に対して, $(x, y) = (x', y')$ となるのは $x = x'$ かつ $y = y'$ のときであるとする.

例 4.5 集合 X, Y を $X = \{1, 2\}, Y = \{3, 4, 5\}$ により定めると,

$$X \times Y = \{(1, 3), (1, 4), (1, 5), (2, 3), (2, 4), (2, 5)\}, \quad X \times X = \{(1, 1), (1, 2), (2, 1), (2, 2)\},$$

$$Y \times X = \{(3, 1), (3, 2), (4, 1), (4, 2), (5, 1), (5, 2)\},$$

$$Y \times Y = \{(3, 3), (3, 4), (3, 5), (4, 3), (4, 4), (4, 5), (5, 3), (5, 4), (5, 5)\}$$

である. 例えば, $X \times X$ の元 $(1, 2)$ と $(2, 1)$ は異なるものであることに注意しよう. なお, $X \times X$ や $Y \times Y$ はそれぞれ X^2, Y^2 と表す.

それでは, 写像のグラフを定義しよう.

定義 4.2 X, Y を空でない集合, $f: X \rightarrow Y$ を X から Y への写像とする. このとき, $G(f) \subset X \times Y$ を

$$G(f) = \{(x, f(x)) \mid x \in X\}$$

により定め, これを f のグラフという.

例 4.6 例 4.1 で述べた, 区間 I で定義された実数値関数 $f: I \rightarrow \mathbf{R}$ のグラフは

$$G(f) = \{(x, f(x)) \mid x \in I\}$$

である. \mathbf{R} と \mathbf{R} の直積 \mathbf{R}^2 を平面とみなすと, 平面の部分集合であるグラフ $G(f)$ を考えることによつて, 関数 f を視覚的に捉えることができる.

写像の定義域や値域の部分集合に対して, それぞれ次のような値域, 定義域の部分集合を考えることができる.

定義 4.3 X, Y を空でない集合, $f: X \rightarrow Y$ を X から Y への写像とする.

$A \subset X$ とする. このとき, $f(A) \subset Y$ を

$$f(A) = \{f(x) \mid x \in A\}$$

により定め, これを f による A の像という. ただし, $f(\emptyset) = \emptyset$ とする.

$B \subset Y$ とする. このとき, $f^{-1}(B) \subset X$ を

$$f^{-1}(B) = \{x \in X \mid f(x) \in B\}$$

により定め, これを f による B の原像または逆像という. ただし, $f^{-1}(\emptyset) = \emptyset$ とする.

注意 4.2 定義 4.3 において, $f(X)$ を f の値域ということもある. この場合, Y は終域という方がよい.

例 4.7 集合 X, Y を $X = \{1, 2, 3\}, Y = \{4, 5, 6\}$ により定め、写像 $f: X \rightarrow Y$ を $f(1) = 4, f(2) = 5, f(3) = 5$ により定める。このとき、

$$f(\{1\}) = \{4\}, \quad f(\{1, 2\}) = \{4, 5\}, \quad f^{-1}(\{4\}) = \{1\}, \quad f^{-1}(\{4, 5\}) = X$$

である。

像および逆像に関して、次がなりたつ。

定理 4.1 X, Y を空でない集合、 $f: X \rightarrow Y$ を X から Y への写像とし、 $A, A_1, A_2 \subset X, B, B_1, B_2 \subset Y$ とする。このとき、次の (1)~(10) がなりたつ。

- (1) $A_1 \subset A_2$ ならば、 $f(A_1) \subset f(A_2)$ 。
- (2) $f(A_1 \cup A_2) = f(A_1) \cup f(A_2)$ 。
- (3) $f(A_1 \cap A_2) \subset f(A_1) \cap f(A_2)$ 。
- (4) $f(A_1 \setminus A_2) \supset f(A_1) \setminus f(A_2)$ 。
- (5) $B_1 \subset B_2$ ならば、 $f^{-1}(B_1) \subset f^{-1}(B_2)$ 。
- (6) $f^{-1}(B_1 \cup B_2) = f^{-1}(B_1) \cup f^{-1}(B_2)$ 。
- (7) $f^{-1}(B_1 \cap B_2) = f^{-1}(B_1) \cap f^{-1}(B_2)$ 。
- (8) $f^{-1}(B_1 \setminus B_2) = f^{-1}(B_1) \setminus f^{-1}(B_2)$ 。
- (9) $f^{-1}(f(A)) \supset A$ 。
- (10) $f(f^{-1}(B)) \subset B$ 。

証明 (1), (2), (5), (6) のみ示す。

(1): $y \in f(A_1)$ とする。このとき、像の定義より、ある $x \in A_1$ が存在し、 $y = f(x)$ である。ここで、 $x \in A_1$ および $A_1 \subset A_2$ より、 $x \in A_2$ である。よって、像の定義より、 $f(x) \in f(A_2)$ 、すなわち、 $y \in f(A_2)$ である。したがって、 $y \in f(A_1)$ ならば $y \in f(A_2)$ 、すなわち、 $f(A_1) \subset f(A_2)$ である。

(2): 左辺を変形すると、

$$\begin{aligned} f(A_1 \cup A_2) &= \{y \in Y \mid \text{ある } x \in A_1 \cup A_2 \text{ が存在し, } y = f(x)\} \\ &= \left\{ y \in Y \mid \begin{array}{l} \text{ある } x_1 \in A_1 \text{ が存在し } y = f(x_1), \text{ または,} \\ \text{ある } x_2 \in A_2 \text{ が存在し } y = f(x_2) \end{array} \right\} \\ &= \{y \in Y \mid y \in f(A_1) \text{ または } y \in f(A_2)\} \\ &= f(A_1) \cup f(A_2) \end{aligned}$$

である。よって、(2) がなりたつ。

(5): $x \in f^{-1}(B_1)$ とする。このとき、逆像の定義より、 $f(x) \in B_1$ である。ここで、 $B_1 \subset B_2$ より、 $f(x) \in B_2$ である。よって、逆像の定義より、 $x \in f^{-1}(B_2)$ である。したがって、 $x \in f^{-1}(B_1)$ ならば $x \in f^{-1}(B_2)$ 、すなわち、 $f^{-1}(B_1) \subset f^{-1}(B_2)$ である。

(6): 左辺を変形すると、

$$\begin{aligned} f^{-1}(B_1 \cup B_2) &= \{x \in X \mid f(x) \in B_1 \cup B_2\} \\ &= \{x \in X \mid f(x) \in B_1 \text{ または } f(x) \in B_2\} \\ &= \{x \in X \mid x \in f^{-1}(B_1) \text{ または } x \in f^{-1}(B_2)\} \\ &= f^{-1}(B_1) \cup f^{-1}(B_2) \end{aligned}$$

である。よって、(6) がなりたつ。 □

問題 4

1. 関数 f_1, f_2, f_3, f_4 を

$$f_1 : \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}, \quad f_1(x) = x \quad (x \in \mathbf{R}), \quad f_2 : \{0, 1\} \rightarrow \mathbf{R}, \quad f_2(x) = x \quad (x \in \{0, 1\}),$$

$$f_3 : \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}, \quad f_3(x) = x^2 \quad (x \in \mathbf{R}), \quad f_4 : \{0, 1\} \rightarrow \mathbf{R}, \quad f_4(x) = x^2 \quad (x \in \{0, 1\})$$

により定める.

(1) f_1, f_2, f_3, f_4 の中で, f_1 と等しいものが存在するかどうかを調べよ.

(2) f_1, f_2, f_3, f_4 の中で, f_2 と等しいものが存在するかどうかを調べよ.

2. 集合 X, Y を $X = \{1, 2, 3\}, Y = \{4, 5, 6\}$ により定め, 写像 $f : X \rightarrow Y$ を $f(1) = 4, f(2) = 5, f(3) = 5$ により定める. 次の集合を外延的記法により表せ.

(1) f のグラフ.

(2) $f(\{2, 3\}), f(X)$.

(3) $f^{-1}(\{5\}), f^{-1}(\{6\}), f^{-1}(\{4, 6\}), f^{-1}(Y)$.

3. 集合 X, Y を $X = \{1, 2\}, Y = \{3, 4\}$ により定め, 写像 $f : X \rightarrow Y$ を $f(1) = 3, f(2) = 3$ により定める. 次の集合を外延的記法により表せ.

(1) $f(\{1\} \cap \{2\})$ および $f(\{1\}) \cap f(\{2\})$. 特に, 定理 4.1 (3) において, 等号は一般にはなりたたないことが分かる.

(2) $f(\{1\} \setminus \{2\})$ および $f(\{1\}) \setminus f(\{2\})$. 特に, 定理 4.1 (4) において, 等号は一般にはなりたたないことが分かる.

(3) $f^{-1}(f(\{1\}))$. 特に, 定理 4.1 (9) において, 等号は一般にはなりたたないことが分かる.

(4) $f(f^{-1}(\{3, 4\}))$. 特に, 定理 4.1 (10) において, 等号は一般にはなりたたないことが分かる.

問題3の解答

1. (1) まず, $f_1 = f_1$ である.

次に, f_1 の定義域および値域はともに \mathbf{R} であり, f_2, f_3, f_4 の中で, f_1 と定義域および値域がそれぞれ等しいものは f_3 である. ここで,

$$f_1\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2}, \quad f_3\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{4}$$

だから, $f_1\left(\frac{1}{2}\right) \neq f_3\left(\frac{1}{2}\right)$ である. よって, $f_1 \neq f_3$ である.

したがって, f_1, f_2, f_3, f_4 の中で, f_1 と等しいものは f_1 のみである.

(2) まず, $f_2 = f_2$ である.

次に, f_2 の定義域および値域はそれぞれ $\{0, 1\}, \mathbf{R}$ であり, f_1, f_3, f_4 の中で, f_2 と定義域および値域がそれぞれ等しいものは f_4 である. ここで,

$$f_2(0) = f_4(0) = 0, \quad f_2(1) = f_4(1) = 1$$

だから, $f_2 = f_4$ である.

よって, f_1, f_2, f_3, f_4 の中で, f_2 と等しいものは f_2 と f_4 である.

2. (1) f およびグラフの定義より, 求めるグラフは

$$\begin{aligned} G(f) &= \{(1, f(1)), (2, f(2)), (3, f(3))\} \\ &= \{(1, 4), (2, 5), (3, 5)\} \end{aligned}$$

である.

(2) 像の定義より,

$$\begin{aligned} f(\{2, 3\}) &= \{f(2), f(3)\} \\ &= \{5, 5\} \\ &= \{5\}, \\ f(X) &= f(\{1, 2, 3\}) \\ &= \{f(1), f(2), f(3)\} \\ &= \{4, 5, 5\} \\ &= \{4, 5\} \end{aligned}$$

である.

(3) $f(x) \in \{5\}$ となる $x \in X$ を求めると, $x = 2, 3$ である. よって, 逆像の定義より,

$$f^{-1}(\{5\}) = \{2, 3\}$$

である.

$f(x) \in \{6\}$ となる $x \in X$ は存在しない. よって, 逆像の定義より,

$$f^{-1}(\{6\}) = \{ \}$$

である.

$f(x) \in \{4, 6\}$ となる $x \in X$ を求めると, $x = 1$ である. よって, 逆像の定義より,

$$f^{-1}(\{4, 6\}) = \{1\}$$

である.

f は X から Y への写像だから, 任意の $x \in X$ に対して, $f(x) \in Y$ である. よって, 逆像の定義より,

$$\begin{aligned} f^{-1}(Y) &= X \\ &= \{1, 2, 3\} \end{aligned}$$

である.

3. (1) 共通部分および像の定義より,

$$\begin{aligned} f(\{1\} \cap \{2\}) &= f(\{\}) \\ &= \{\} \end{aligned}$$

である. また,

$$\begin{aligned} f(\{1\}) \cap f(\{2\}) &= \{3\} \cap \{3\} \\ &= \{3\} \end{aligned}$$

である.

(2) 差および像の定義より,

$$\begin{aligned} f(\{1\} \setminus \{2\}) &= f(\{1\}) \\ &= \{3\} \end{aligned}$$

である. また,

$$\begin{aligned} f(\{1\}) \setminus f(\{2\}) &= \{3\} \setminus \{3\} \\ &= \{\} \end{aligned}$$

である.

(3) 像および逆像の定義より,

$$\begin{aligned} f^{-1}(f(\{1\})) &= f^{-1}(\{3\}) \\ &= \{1, 2\} \end{aligned}$$

である.

(4) 像および逆像の定義より,

$$\begin{aligned} f(f^{-1}(\{3, 4\})) &= f(\{1, 2\}) \\ &= \{3\} \end{aligned}$$

である.