離散数学 第 8 回
写像 (1)：像と逆像

岡本 吉央
okamotoy@uec.ac.jp

電気通信大学

2016 年 6 月 17 日

最終更新：2016 年 6 月 16 日　14:33

スケジュール 前半

*	休講	(4 月 8 日)
1	集合と論理 (1)：命題論理	(4 月 15 日)
2	集合と論理 (2)：集合と論理の対応	(4 月 22 日)
*	昭和の日	(4 月 29 日)
3	集合と論理 (3)：述語論理	(5 月 6 日)
4	証明法 (1)：∃と∀を含む命題の証明	(5 月 13 日)
5	証明法 (2)：含意を含む命題の証明	(5 月 20 日)
6	証明法 (3)：集合に関する証明	(5 月 27 日)
7	集合と論理 (4)：直積と冪集合	(6 月 3 日)
•	中間試験	(6 月 10 日)

スケジュール 後半 (予定)

8. 写像 (1)：像と逆像 (6 月 17 日)
9. 写像 (2)：全射と単射 (6 月 24 日)
10. 関係 (1)：関係 (7 月 1 日)
11. 関係 (2)：同値関係 (7 月 8 日)
12. 関係 (3)：順序関係 (7 月 15 日)
13. 証明法 (4)：数学的帰納法 (7 月 22 日)
14. 集合と論理 (5)：集合の再帰的定義 (7 月 29 日)

- 期末試験 (8 月 5 日？)

注意：予定の変更もありうる

今日の概要

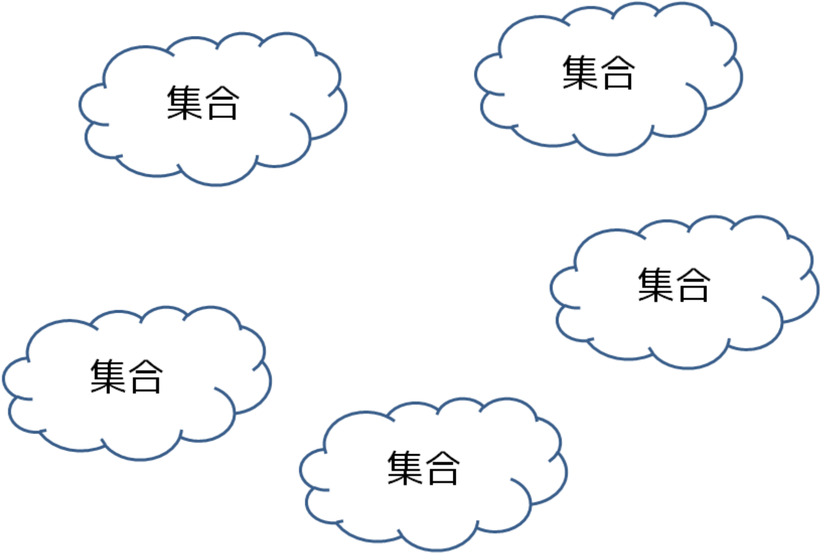
この講義の目標

- 語学としての数学，コミュニケーションとしての数学

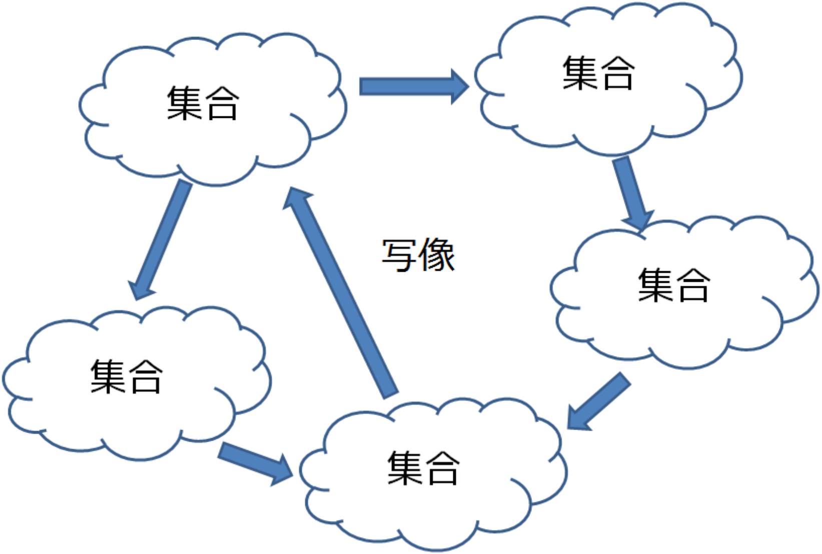
今日の目標

- 写像 (関数) の定義と記法を理解し，使えるようになる
- 写像による像と逆像，写像の合成を理解する

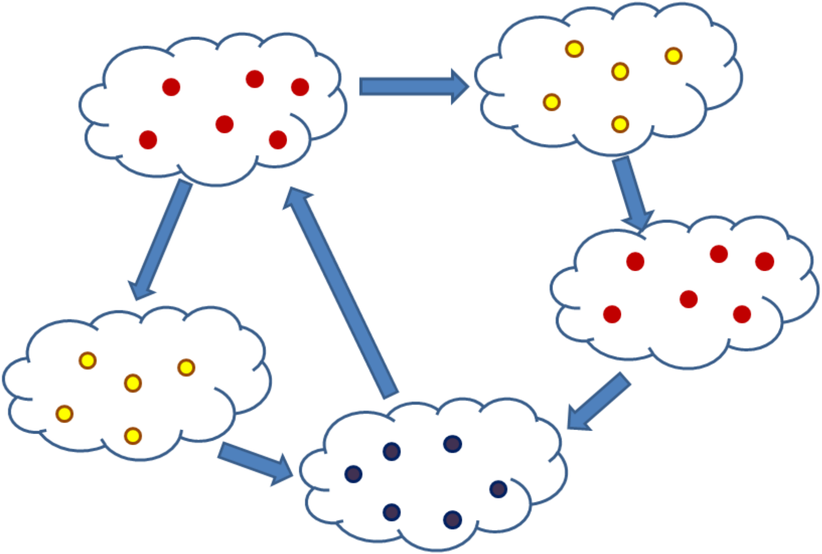
ここまでのまとめ と ここからの話



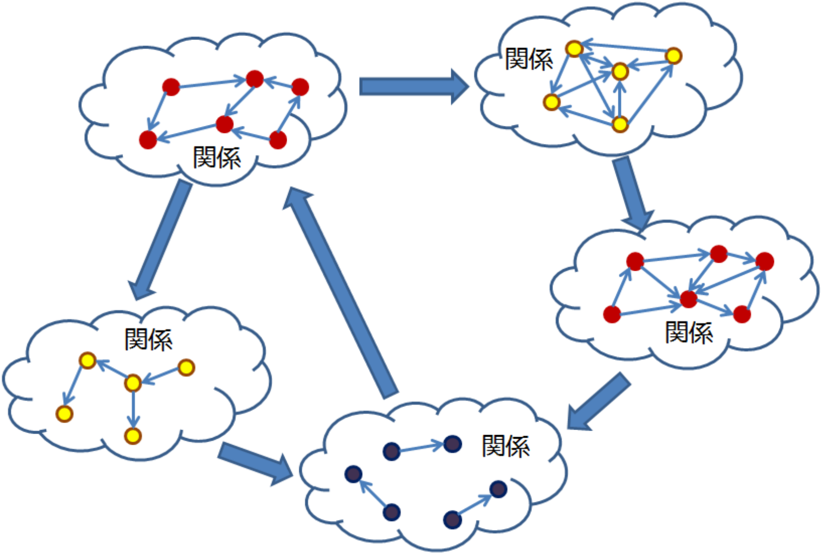
ここまでのまとめ と ここからの話



ここまでのまとめ と ここからの話



ここまでのまとめ と ここからの話

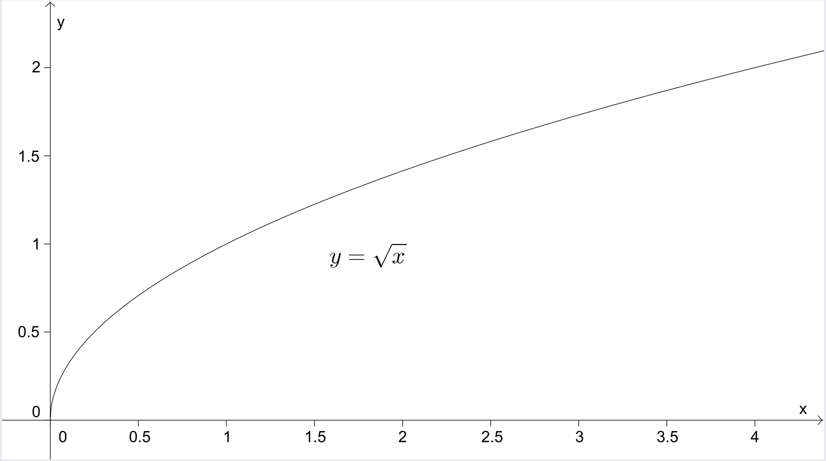


目次

関数と言って思い浮かべるものは？ (1)

数学 (?) の「関数」

関数 $y = \sqrt{x}$



関数と言って思い浮かべるものは？ (2)

プログラミングの「関数」

```
int sum(int a, int b) {
  return a + b;
}

int absolute_value(int a) {
  if (a < 0) {
    return -a;
  } else {
    return a;
  }
}
```

写像とは

写像とは？

- 集合が 2 つある (A と B とする)
- A の 1 つ 1 つの要素を B のある要素に「移す」

数学的に写像を定義すると？

- 任意の $a \in A$ に対して，ある $b \in B$ が一意に (ただ一つ) 存在して，a を b に移す

記法は？

- 写像 $f \colon A \to B$
- 任意の $a \in A$ に対して，ある $b \in B$ が一意に存在して，$f(a) = b$

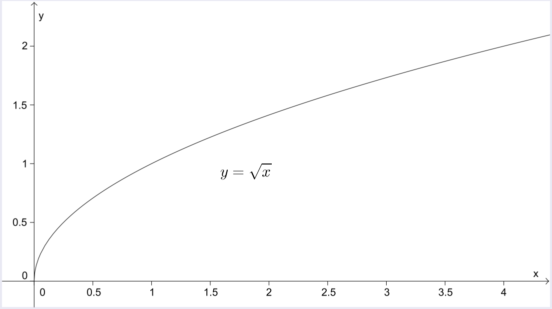
注：f によって a を移したものを $f(a)$ と書く

「写像」を「関数」とも呼ぶ

関数と言って思い浮かべるものは？ (1) 再掲

数学 (?) の「関数」

関数 $y = \sqrt{x}$



- $f\colon [0, +\infty) \to [0, +\infty)$
- 任意の $x \in [0, +\infty)$ に対して $f(x) = \sqrt{x}$

関数と言って思い浮かべるものは？ (2) 再掲

プログラミングの「関数」

```
int sum(int a, int b) {
  return a + b;
}
```

- $\mathtt{sum} \colon \mathbb{Z} \times \mathbb{Z} \to \mathbb{Z}$
- 任意の $(a, b) \in \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$ に対して $\mathtt{sum}((a, b)) = a + b$

$\boxed{\text{注}}$: $\mathbb{Z} =$ すべての整数から成る集合 (整数全体の集合)

関数と言って思い浮かべるものは？ (2) 再掲 (続)

プログラミングの「関数」

```
int absolute_value(int a) {
  if (a < 0) {
    return -a;
  } else {
    return a;
  }
}
```

- absolute_value: $\mathbb{Z} \to \mathbb{Z}$
- 任意の $a \in \mathbb{Z}$ に対して

$$\mathtt{absolute\_value}(a) = \begin{cases} -a & (a < 0 \text{ のとき}) \\ a & (\text{そうでないとき}) \end{cases}$$

発展的補足：論理記号を用いて定義を書き直してみる

f が A から B への写像であるとは

$$\forall\, a \in A\ (\exists!\ b \in B\ (f(a) = b))$$

「∃!」は「一意に存在して〜」を表す記号

「∃!」を書き直すと

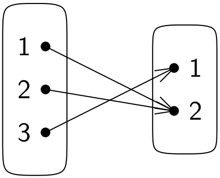
$$\forall\, a \in A\ (\exists\ b \in B\ ((f(a) = b) \wedge (\forall\ b' \in B\ (f(a) = b' \to b = b'))))$$

写像の例

- $A = \{1,2,3\}$, $B = \{1,2\}$
- 写像 $f\colon A \to B$ を次のように定義
  - $f(1) = 2$, $f(2) = 2$, $f(3) = 1$

$$A \xrightarrow{f} B$$

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



a	$f(a)$
1	2
2	2
3	1

$$1 \overset{f}{\mapsto} 2$$
$$2 \overset{f}{\mapsto} 2$$
$$3 \overset{f}{\mapsto} 1$$

注意

「写像 $f\colon A \to B$ を定義する」ためには，
任意の $a \in A$ に対して，$f(a)$ が何であるかを定めればよい

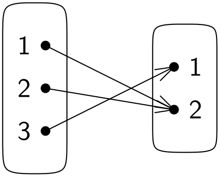
写像にまつわる記法と用語

集合 A, B と写像 $f\colon A \to B$

- $A \xrightarrow{f} B$
- $b = f(a)$ のとき「$f\colon a \mapsto b$」や「$a \overset{f}{\mapsto} b$」
- $f(a)$ を a における f の**値**という
- A を f の**始域** (または**定義域**) という
- B を f の**終域** という

$$f(1) = 2$$
$$f(2) = 2$$
$$f(3) = 1$$

$$A \xrightarrow{f} B$$



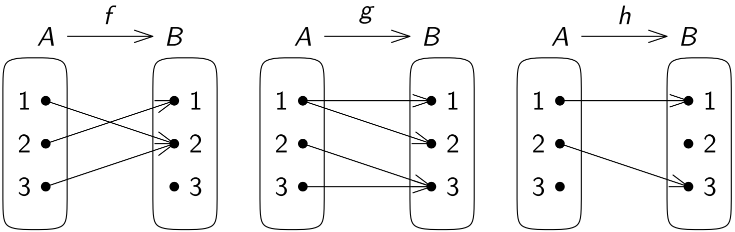
a	$f(a)$
1	2
2	2
3	1

$$1 \overset{f}{\mapsto} 2$$
$$2 \overset{f}{\mapsto} 2$$
$$3 \overset{f}{\mapsto} 1$$

格言

写像の始域と終域を常に意識　　(似たものに「行列のサイズ」がある)

問題：次の図の中で写像を表すものは？



2 つの写像が等しいということ

集合 A, B, C, D と写像 $f\colon A \to B$, $g\colon C \to D$

f と g が等しいとは？

写像 f と g が等しいことを「$f = g$」と書き，
次の条件がすべて成り立つことと定義する

- $A = C$ (f と g の始域が等しい)
- $B = D$ (f と g の終域が等しい)
- すべての $a \in A$ に対して，$f(a) = g(a)$ (写像の値が等しい)

恒等写像

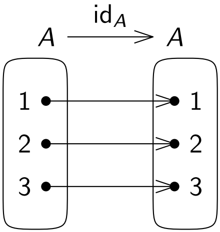
集合 A と写像 $f\colon A \to A$

恒等写像とは？

f が恒等写像であるとは,
任意の $a \in A$ に対して $a = f(a)$ であること

- $A \to A$ の恒等写像を id_A と書くこともある
- 例：$A = \{1, 2, 3\}$ のとき $f\colon A \to A$ で

$$f(1) = 1, \quad f(2) = 2, \quad f(3) = 3$$



目次

写像による像

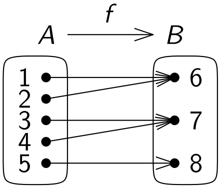
$f\colon A \to B$ を写像とする

像とは？

f による部分集合 $X \subseteq A$ の**像**を $f(X)$ と書き

$$f(X) = \{b \mid b \in B \text{ かつ，ある } a \in X \text{ が存在して } b = f(a)\}$$

例：$f(\{1,2,3\})$ は？



- $6 \in f(\{1,2,3\})$ か？: $6 = f(1)$ なので YES
- $7 \in f(\{1,2,3\})$ か？: $7 = f(3)$ なので YES
- $8 \in f(\{1,2,3\})$ か？: $8 \neq f(1), 8 \neq f(2), 8 \neq f(3)$ なので NO

したがって，$f(\{1,2,3\}) = \{6,7\}$

写像による像：他の例と注意

$f\colon A \to B$ を写像とする

像とは？

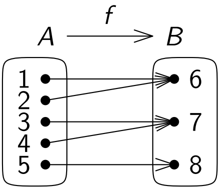
f による部分集合 $X \subseteq A$ の**像**を $f(X)$ と書き

$$f(X) = \{b \mid b \in B \text{ かつ，ある } a \in X \text{ が存在して } b = f(a)\}$$

注意

- X は A の**部分集合** (A の要素ではない)
- $f(X)$ は B の部分集合

例



- $f(\{1,2\}) = \{6\}$
- $f(\{1,2,3\}) = \{6,7\}$
- $f(\{1,2,3,4\}) = \{6,7\}$
- $f(\{1,2,3,4,5\}) = \{6,7,8\}$
- $f(\{2\}) = \{6\}$

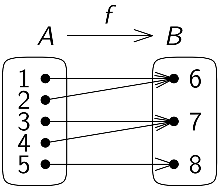
写像による像：他の表現

$f \colon A \to B$ を写像とする

f による X の像は次のようにも書ける

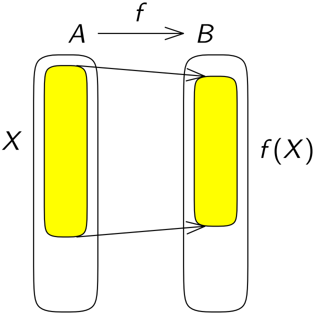
$$f(X) = \{f(a) \mid a \in X\}$$

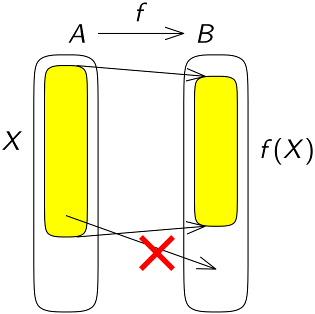
例



- $f(\{1,2\}) = \{f(1), f(2)\} = \{6\}$
- $f(\{1,2,3\}) = \{f(1), f(2), f(3)\} = \{6,7\}$
- $f(\{1,2,3,4\}) = \{f(1), f(2), f(3), f(4)\} = \{6,7\}$
- $f(\{2\}) = \{f(2)\} = \{6\}$

写像による像：図による直感





写像による逆像

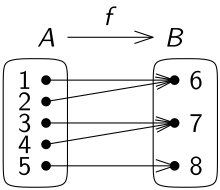
$f\colon A \to B$ を写像とする

逆像とは？

f による部分集合 $Y \subseteq B$ の**逆像** (または原像) を $f^{-1}(Y)$ と書き

$$f^{-1}(Y) = \{a \mid a \in A \text{ かつ，ある } b \in Y \text{ が存在して } b = f(a)\}$$

例：$f^{-1}(\{6,7\})$ は？



- $1 \in f^{-1}(\{6,7\})$ か？: $6 = f(1)$ なので YES
- $2 \in f^{-1}(\{6,7\})$ か？: $6 = f(2)$ なので YES
- $3 \in f^{-1}(\{6,7\})$ か？: $7 = f(3)$ なので YES
- $4 \in f^{-1}(\{6,7\})$ か？: $7 = f(4)$ なので YES
- $5 \in f^{-1}(\{6,7\})$ か？:
  $6 \neq f(5)$，$7 \neq f(5)$ なので NO

したがって，$f^{-1}(\{6,7\}) = \{1,2,3,4\}$

写像による逆像：他の例と注意

$f\colon A \to B$ を写像とする

逆像とは？

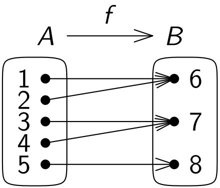
f による部分集合 $Y \subseteq B$ の**逆像** (または原像) を $f^{-1}(Y)$ と書き

$$f^{-1}(Y) = \{a \mid a \in A \text{ かつ，ある } b \in Y \text{ が存在して } b = f(a)\}$$

注意

- Y は B の**部分集合** (B の要素ではない)
- $f^{-1}(Y)$ は A の部分集合

例



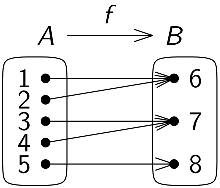
- $f^{-1}(\{6\}) = \{1, 2\}$
- $f^{-1}(\{6, 7\}) = \{1, 2, 3, 4\}$
- $f^{-1}(\{6, 7, 8\}) = \{1, 2, 3, 4, 5\}$
- $f^{-1}(\{7, 8\}) = \{3, 4, 5\}$
- $f^{-1}(\{6, 8\}) = \{1, 2, 5\}$

写像による逆像：注意 第２弾

$f\colon A \to B$ を写像とする

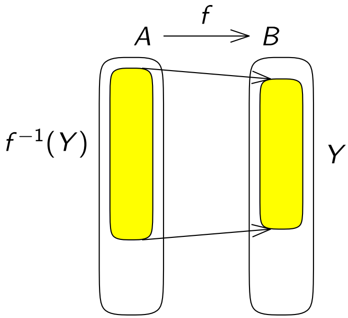
注意：逆像を次のようには書かない

$$f^{-1}(Y) \stackrel{?}{=} \{f^{-1}(b) \mid b \in Y\}$$



- $f^{-1}(b)$ とは？ (定義されないかも)
- $f^{-1}(b)$ が定義されるのは
  f が全単射であるときのみ
  (詳細は次回)

写像による逆像：図による直感



像と逆像：注意 (1)

$f\colon A \to B$ を写像とする

像とは？

f による部分集合 $X \subseteq A$ の**像**を $f(X)$ と書き

$$f(X) = \{b \mid b \in B \text{ かつ，ある } a \in X \text{ が存在して } b = f(a)\}$$

$X \subseteq A$ から $f(X) \subseteq B$ は定まる

逆像とは？

f による部分集合 $Y \subseteq B$ の**逆像** (または原像) を $f^{-1}(Y)$ と書き

$$f^{-1}(Y) = \{a \mid a \in A \text{ かつ，ある } b \in Y \text{ が存在して } b = f(a)\}$$

$f^{-1}(Y) \subseteq A$ は $Y \subseteq B$ から定まる

像と逆像：注意 (2)

$f\colon A \to B$ を写像とする

像とは？

f による部分集合 $X \subseteq A$ の像を $f(X)$ と書き

$$f(X) = \{b \mid b \in B \text{ かつ，ある } a \in X \text{ が存在して } b = f(a)\}$$

f という写像に対して，$f(X)$ という記法が使える

逆像とは？

f による部分集合 $Y \subseteq B$ の逆像 (または原像) を $f^{-1}(Y)$ と書き

$$f^{-1}(Y) = \{a \mid a \in A \text{ かつ，ある } b \in Y \text{ が存在して } b = f(a)\}$$

f という写像に対して，$f^{-1}(Y)$ という記法が使える

- 「f^{-1} という写像に対して，$f^{-1}(Y)$ という記法が使える」というわけではない
- f の逆写像が存在しなくても，f による逆像は定義される (次回参照)

目次

写像の合成

集合 A, B, C と写像 $f\colon A \to B$, $g\colon B \to C$

写像の合成とは？

写像 f と g の合成を $g \circ f\colon A \to C$ と表記し，任意の $x \in A$ に対して

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

とすることで定義する

注意：f の終域と g の始域が同じでないといけない
(同じでないときは合成を定義できない)

写像の合成：例

- $A = \{1,2,3\}$, $B = \{4,5,6,7\}$, $C = \{8,9\}$
- 写像 $f\colon A \to B$ を次で定義
  - $f(1) = 5$, $f(2) = 4$, $f(3) = 7$
- 写像 $g\colon B \to C$ を次で定義
  - $g(4) = 8$, $g(5) = 9$, $g(6) = 9$, $g(7) = 8$

このとき，$g \circ f\colon A \to C$ を考えると，

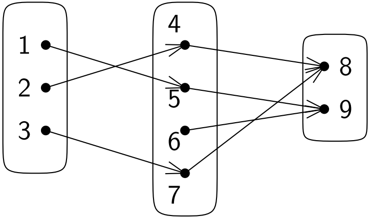
$$(g \circ f)(3) = g(f(3)) = g(7) = 8$$

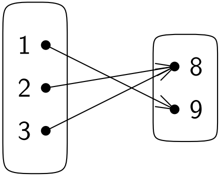
写像の合成：例 (続)

- $A = \{1, 2, 3\}$, $B = \{4, 5, 6, 7\}$, $C = \{8, 9\}$
- 写像 $f\colon A \to B$ を次で定義
  - $f(1) = 5$, $f(2) = 4$, $f(3) = 7$
- 写像 $g\colon B \to C$ を次で定義
  - $g(4) = 8$, $g(5) = 9$, $g(6) = 9$, $g(7) = 8$

このとき，$g \circ f\colon A \to C$ を考えると，

$$A \xrightarrow{f} B \xrightarrow{g} C \qquad\qquad A \xrightarrow{g \circ f} C$$





目次

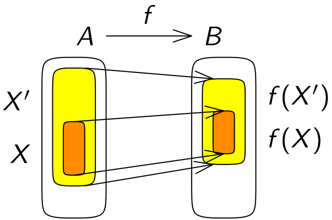
例題 1

例題 1：次を証明せよ

任意の集合 A, B，任意の写像 $f\colon A \to B$，任意の $X, X' \subseteq A$ に対して

$$X \subseteq X' \text{ ならば } f(X) \subseteq f(X')$$

図による直感



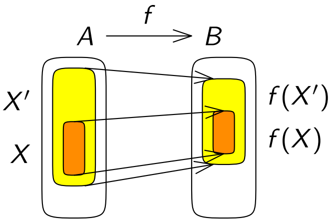
例題 1

例題 1：次を証明せよ

任意の集合 A, B，任意の写像 $f\colon A \to B$，任意の $X, X' \subseteq A$ に対して

$$X \subseteq X' \text{ ならば } f(X) \subseteq f(X')$$

図による直感



「任意の〜に対して…である」という命題の証明法 (第 4 回講義より)

1. 「任意の〜を考える」で始め,「したがって，…である」で終わる
2. それが「…である」という性質を満たすことを確認する (証明する)

例題 1：証明

証明：任意の集合 A, B，任意の写像 $f\colon A \to B$，任意の集合 $X, X' \subseteq A$ を考える．

- (ここで「$X \subseteq X'$ ならば $f(X) \subseteq f(X')$」を証明する)

9 したがって，$X \subseteq X'$ ならば $f(X) \subseteq f(X')$ である． $\square$

例題 1：証明

証明：任意の集合 A, B，任意の写像 $f\colon A \to B$，任意の集合 $X, X' \subseteq A$ を考える．

- (ここで「$X \subseteq X'$ ならば $f(X) \subseteq f(X')$」を証明する)

9 したがって，$X \subseteq X'$ ならば $f(X) \subseteq f(X')$ である． □

「〜ならば…である」という命題の証明法 (第 5 回講義より)

1. 「〜であると仮定する」で始め,「したがって，…である」で終わる
2. 「〜である」という性質を用いて,「…である」を証明する

例題 1：証明

証明：任意の集合 A, B，任意の写像 $f\colon A \to B$，任意の集合 $X, X' \subseteq A$ を考える．

1. $X \subseteq X'$ であると仮定する．
- (ここで仮定を用いて「$f(X) \subseteq f(X')$」を証明する)

8. したがって，$f(X) \subseteq f(X')$ である．
9. したがって，$X \subseteq X'$ ならば $f(X) \subseteq f(X')$ である． □

例題 1：証明

証明：任意の集合 A, B，任意の写像 $f\colon A \to B$，任意の集合 $X, X' \subseteq A$ を考える．

1. $X \subseteq X'$ であると仮定する．
- (ここで仮定を用いて「$f(X) \subseteq f(X')$」を証明する)

8. したがって，$f(X) \subseteq f(X')$ である．
9. したがって，$X \subseteq X'$ ならば $f(X) \subseteq f(X')$ である． $\square$

格言 (第 4 回講義より)

証明の基本は「定義に立ち戻る」こと

「$f(X) \subseteq f(X')$」を定義に立ち戻って書き換える

$b \in f(X)$ ならば $b \in f(X')$

例題 1：証明

証明：任意の集合 A, B，任意の写像 $f\colon A \to B$，任意の集合 $X, X' \subseteq A$ を考える．

1. $X \subseteq X'$ であると仮定する．
- (ここで仮定を用いて「$b \in f(X)$ ならば $b \in f(X')$」を証明する)

8. したがって，$f(X) \subseteq f(X')$ である．
9. したがって，$X \subseteq X'$ ならば $f(X) \subseteq f(X')$ である． □

例題 1：証明

証明：任意の集合 A, B，任意の写像 $f\colon A \to B$，任意の集合 $X, X' \subseteq A$ を考える．

1. $X \subseteq X'$ であると仮定する．
- (ここで仮定を用いて「$b \in f(X)$ ならば $b \in f(X')$」を証明する)

8. したがって，$f(X) \subseteq f(X')$ である．
9. したがって，$X \subseteq X'$ ならば $f(X) \subseteq f(X')$ である． □

「～ならば…である」という命題の証明法 (第 5 回講義より)

1. 「～であると仮定する」で始め,「したがって，…である」で終わる
2. 「～である」という性質を用いて,「…である」を証明する

例題 1：証明

証明：任意の集合 A, B，任意の写像 $f\colon A \to B$，任意の集合 $X, X' \subseteq A$ を考える．

1. $X \subseteq X'$ であると仮定する．
2. $b \in f(X)$ であると仮定する．
- (ここで仮定を用いて「$b \in f(X')$」を証明する)

7. したがって，$b \in f(X')$ である．
8. したがって，$f(X) \subseteq f(X')$ である．
9. したがって，$X \subseteq X'$ ならば $f(X) \subseteq f(X')$ である． □

例題 1：証明

証明：任意の集合 A, B，任意の写像 $f\colon A \to B$，任意の集合 $X, X' \subseteq A$ を考える．

1. $X \subseteq X'$ であると仮定する．
2. $b \in f(X)$ であると仮定する．

- (ここで仮定を用いて「$b \in f(X')$」を証明する)

7. したがって，$b \in f(X')$ である．
8. したがって，$f(X) \subseteq f(X')$ である．
9. したがって，$X \subseteq X'$ ならば $f(X) \subseteq f(X')$ である． □

「$b \in f(X')$」を定義に立ち戻って書き換える

ある $a \in X'$ が存在して，$b = f(a)$

例題 1：証明

証明：任意の集合 A, B，任意の写像 $f\colon A \to B$，任意の集合 $X, X' \subseteq A$ を考える．

1. $X \subseteq X'$ であると仮定する．
2. $b \in f(X)$ であると仮定する．
- (ここで仮定を用いて「$b \in f(X')$」を証明する)

7. したがって，$b \in f(X')$ である．
8. したがって，$f(X) \subseteq f(X')$ である．
9. したがって，$X \subseteq X'$ ならば $f(X) \subseteq f(X')$ である． □

「$b \in f(X')$」を定義に立ち戻って書き換える

ある $a \in X'$ が存在して，$b = f(a)$

「〜が存在する」という命題の証明法 (第 4 回講義より)

1. 存在する，といっているものを 1 つ見つけ,「それを考える」と書く．
2. それが要求されている性質を満たすことを論じる (証明する)．

例題 1：整理，あるいは下書き

目標

$b = f(a)$ となる $a \in X'$ を見つける

用いる性質

1. $X \subseteq X'$
2. $b \in f(X)$

例題 1：整理，あるいは下書き

目標

$b = f(a)$ となる $a \in X'$ を見つける

用いる性質

1. $X \subseteq X'$
2. $b \in f(X)$
3. ある $a \in X$ が存在して，$b = f(a)$ ((2) より)

例題 1：整理，あるいは下書き

目標

$b = f(a)$ となる $a \in X'$ を見つける

用いる性質

1. $X \subseteq X'$
2. $b \in f(X)$
3. ある $a \in X$ が存在して，$b = f(a)$ ((2) より)
4. $b = f(a)$ を満たす $a \in X$ を考える ((3) より)

証明法：「○○を満たす△△が存在する」が使えるとき (今回初登場)

1. 「○○を満たす△△を考える」とする
2. その△△を使って，証明を進める

例題 1：整理，あるいは下書き

目標

$b = f(a)$ となる $a \in X'$ を見つける

用いる性質

1. $X \subseteq X'$
2. $b \in f(X)$
3. ある $a \in X$ が存在して，$b = f(a)$ ((2) より)
4. $b = f(a)$ を満たす $a \in X$ を考える ((3) より)
5. $a \in X'$ ((1) と (4) より)

部分集合に関する重要な性質 (第 6 回講義より)

$A \subseteq B$ かつ $x \in A$ ならば，$x \in B$

例題 1：整理，あるいは下書き

目標

$b = f(a)$ となる $a \in X'$ を見つける

用いる性質

1. $X \subseteq X'$
2. $b \in f(X)$
3. ある $a \in X$ が存在して，$b = f(a)$ ((2) より)
4. $b = f(a)$ を満たす $a \in X$ を考える ((3) より)
5. $a \in X'$ ((1) と (4) より)

注

(4) で考えた a が
「$b = f(a)$ となる $a \in X'$ を見つける」という目標の下で見つけた a

例題 1：証明

証明：任意の集合 A, B，任意の写像 $f\colon A \to B$，任意の集合 $X, X' \subseteq A$ を考える．

1. $X \subseteq X'$ であると仮定する．
2. $b \in f(X)$ であると仮定する．
3. (2) より，ある $a \in X$ が存在して，$b = f(a)$ となる．
4. (3) より，$b = f(a)$ を満たす $a \in X$ を考える．
5. (1) と (4) より，$a \in X'$ となる．
6. したがって，(4) で考えた a は $b = f(a)$ と $a \in X'$ を満たす．
7. したがって，$b \in f(X')$ である．
8. したがって，$f(X) \subseteq f(X')$ である． □

目次

今日のまとめ

この講義の目標

- 語学としての数学，コミュニケーションとしての数学

今日の目標

- 写像 (関数) の定義と記法を理解し，使えるようになる
- 写像による像と逆像，写像の合成を理解する

余談：「関数」という用語

『数学の言葉づかい 100』(日本評論社，1999 年) 58 ページより

関数の用語 functio は 17 世紀末ライプニッツにより初めて用いられた．

(中略)

関数がよく f で表されるのはこれにちなむもので，各国語でもこのラテン語の直訳として function, Funktion, fonction, (中略) などが用いられている．わが国へは中国で音訳された函數が輸入され，現在では代用漢字による関数があてられて，初等教育の段階でほぼ定着した．

残った時間の使い方

- 演習問題をやる
  - 相談推奨 (ひとりでやらない)
- 質問をする
  - 教員とティーチング・アシスタントは巡回
- 退室時，小さな紙に感想など書いて提出する ←重要
  - 内容は何でも OK
  - 匿名で OK

目次