

# 集合と位相

nukui

2016 年 10 月 23 日

## 第 I 部

## 集合と写像

### 1 集合とは

#### 1.1

1. 成り立つ。  $\because Y$  に含まれる要素は全て  $X$  に含まれる。
2. 成り立つ。  $\because 3$  は  $W$  に含まれるが  $Z$  に含まれない。
3. 成り立つ。  $\because 4$  は  $V$  に含まれるが、 $Y$  に含まれない。
4. 成り立たない。  $\because 4$  は  $V$  に含まれるが  $X$  には含まれない。
5. 成り立たない。  $\because 1$  は  $X$  に含まれるが  $W$  に含まれない。
6. 成り立たない。  $\because V$  の全ての要素は  $W$  に含まれる。
7. 成り立つ。  $\because V$  の全ての要素は  $Z$  に含まれる。
8. 成り立つ。  $\because 3$  は  $X$  に含まれるが  $Z$  に含まれない。
9. 成り立たない。  $\because Y$  に含まれる全ての要素は  $Z$  に含まれる。
10. 成り立たない。  $\because 3$  は  $W$  に含まれるが  $Y$  には含まれない。

#### 1.2

1.  $D$
2.  $B$
3.  $C, E, F$
4.  $B, D$

#### 1.3

1. 成り立たない。
2. 成り立つ。
3. 成り立つ。
4. 成り立つ。
5. 成り立たない。
6. 成り立つ。

## 1.4

集合  $A$  が 1 個の元から成るとき、部分集合は  $A$  と  $\emptyset$  の 2 通り。よって  $n = 1$  のとき、命題は成り立つ。  
集合  $A$  が  $n$  個の元から成り、その部分集合は全部で  $2^n$  個から成るとする。今、集合  $A$  に元  $X$  を一つ加え、 $n+1$  個の元から成る集合  $B$  を考える。集合  $B$  の部分集合は、

1. 集合  $A$  の部分集合と一致。( $2^n$  個)
2. 集合  $A$  の部分集合に元  $X$  を加えたものに一致。( $2^n$  個)

のいずれかである。よって、集合  $B$  の部分集合の個数は  $2^n + 2^n = 2^{n+1}$  個になる。以上より、すべての自然数  $n$  で命題は成り立つ。

## 2 集合の演算

### 2.1

意味を考えれば、確かに成り立つことがわかる。

### 2.2

1.

$$\begin{aligned}(A - B) \cup (A \cap B) &= \{x | x \in (A - B) \text{ または } x \in (A \cap B)\} \\ &= \{x | (x \in A \text{ かつ } x \notin B) \text{ または } (x \in A \text{ かつ } x \in B)\} \\ &= \{x | x \in A \text{ かつ } (x \notin B \text{ または } x \in B)\} \\ &= \{x | x \in A\} \\ &= A\end{aligned}$$

2.

$$\begin{aligned}(A - B) \cup B &= \{x | x \in (A - B) \text{ または } x \in B\} \\ &= \{x | (x \in A \text{ かつ } x \notin B) \text{ または } x \in B\} \\ &= \{x | (x \in A \text{ または } x \in B) \text{ かつ } (x \notin B \text{ または } x \in B)\} \\ &= \{x | (x \in A \text{ または } x \in B)\} \\ &= A \cup B\end{aligned}$$

3.

$$\begin{aligned}B \cap (A - B) &= \{x | x \in B \text{ かつ } x \in (A - B)\} \\ &= \{x | x \in B \text{ かつ } (x \in A \text{ かつ } x \notin B)\} \\ &= \emptyset\end{aligned}$$

### 2.3

1.  $A_1 \subset A$  を仮定する。

$$x \in A_1 \text{ かつ } x \notin B \implies x \in A \text{ かつ } x \notin B$$

なので、 $x \in A_1 - B$  とすると、 $x \in A - B$  が示せる。つまり、 $A_1 - B \subset A - B$ 。

2.  $B_1 \subset B$  を仮定する。

$$x \in A \text{ かつ } x \notin B \implies x \in A \text{ かつ } x \notin B_1$$

なので、 $x \in A - B$  とすると、 $x \in A - B_1$  が示せる。つまり、 $A - B \subset A - B_1$ 。

## 2.4

$$\begin{aligned} A - B &= \{x | x \in A \text{ かつ } x \notin B\} \\ &= \{x | x \in A \text{ かつ } (x \notin A \text{ または } x \notin B)\} \\ &= \{x | x \in A \text{ かつ } x \notin A \cap B\} \end{aligned}$$

$$A = \{x | x \in A\}$$

なので、

$$A - B = A \iff A - B \supset A \iff A \cap B = \emptyset$$

となり、 $A - B = A$  と、 $A \cap B = \emptyset$  が同値であることを示せた。

## 2.5

1. 定義から、

$$\begin{aligned} A \cup B &= \{x | x \in A \text{ または } x \in B\} \\ B &= \{x | x \in B\} \end{aligned}$$

である。ここで、 $A \subset B$  を仮定すると、 $A \cup B = \{x | x \in B\} = B$  となる。逆に、 $A \cup B = B$  を仮定すると、 $A \cup B \subset B$  より、 $\forall x [x \in A \implies x \in B]$  となるので、 $A \subset B$ 。

2. 定義から、

$$\begin{aligned} A \cap B &= \{x | x \in A \text{ かつ } x \in B\} \\ A &= \{x | x \in A\} \end{aligned}$$

である。ここで、 $A \subset B$  を仮定すると、 $A \cap B = \{x | x \in A\} = A$  となる。逆に、 $A \cap B = A$  を仮定すると、 $A \cap B \supset A$  より、 $\forall x [x \in A \implies x \in B]$  となるので、 $A \subset B$ 。

3. 定義から

$$A - B = \{x | x \in A \text{ かつ } x \notin B\}$$

である。ここで、 $A \subset B$  を仮定すると、 $\forall x [x \in A \implies x \in B]$  なので、 $A - B = \emptyset$  が成り立つ。逆に、 $A - B = \emptyset$  を仮定すると、 $\forall x [x \in A \implies x \in B]$  になるので、 $A \subset B$  が成り立つ。

4. 定義から

$$\begin{aligned} A \cup (B - A) &= \{x | x \in A \text{ または } x \in (B - A)\} \\ &= \{x | x \in A \text{ または } (x \in B \text{ かつ } x \notin A)\} \\ &= \{x | x \in A \text{ または } x \in B\} \\ &= A \cup B \end{aligned}$$

よって、1 と本質的に同じ問題なので、成立する。

#### 5. 定義から

$$\begin{aligned} B - (B - A) &= \{x | x \in B \text{ かつ } x \notin (B - A)\} \\ &= \{x | x \in B \text{ かつ } (x \notin B \text{ または } x \in A)\} \\ &= \{x | x \in B \text{ かつ } x \in A\} \\ &= A \cap B \end{aligned}$$

よって、本質的に 2 と同じ問題なので、成立する。

## 2.6

### 1.

$$\begin{aligned} (A \cup B) \cap (A \cup C) \cap (B \cup C) &= ((A \cup B) \cap (A \cup C)) \cap (B \cup C) \\ &= ((A \cup B) \cap A) \cup ((A \cup B) \cap C) \cap (B \cup C) \\ &= (A \cup ((A \cap C) \cup (B \cap C))) \cap (B \cup C) \\ &= (A \cup (B \cap C)) \cap (B \cup C) \\ &= (A \cap (B \cup C)) \cup ((B \cap C) \cap (B \cup C)) \\ &= ((A \cap B) \cup (A \cap C)) \cup (B \cap C) \\ &= (A \cap B) \cup (A \cap C) \cup (B \cap C) \end{aligned}$$

### 2. 1 の結果を用いる。

$$\begin{aligned} &(A \cup B) \cap (A \cup C) \cap (A \cup D) \cap (B \cup C) \cap (B \cup D) \cap (C \cup D) \\ &= ((A \cup B) \cap (A \cup C) \cap (B \cup C)) \cap ((A \cup D) \cap (B \cup D) \cap (C \cup D)) \\ &= ((A \cap B) \cup (A \cap C) \cup (B \cap C)) \cap (D \cup (A \cap B \cap C)) \\ &= (((A \cap B) \cup (A \cap C) \cup (B \cap C)) \cap D) \cup (((A \cap B) \cup (A \cap C) \cup (B \cap C)) \cap (A \cap B \cap C)) \\ &= ((A \cap B \cap D) \cup (A \cap C \cap D) \cup (B \cap C \cap D)) \cup (A \cap B \cap C) \\ &= (A \cap B \cap C) \cup (A \cap B \cap D) \cup (A \cap C \cap D) \cup (B \cap C \cap D) \end{aligned}$$

## 3 ド・モルガンの法則

### 3.1

#### 1.

$$\begin{aligned} (A^c)^c &= (X - A)^c \\ &= \{x | x \in X - (X - A)\} \\ &= \{x \in X | x \notin X - A\} \\ &= \{x \in X | \text{「} x \in X \text{ かつ } x \notin A \text{」 ではない}\} \\ &= \{x \in X | x \notin X \text{ または } x \in A\} \\ &= \{x \in X | x \in A\} \\ &= A \end{aligned}$$

#### 2.

$$X^c = X - X = \{x | x \in X \text{ かつ } x \notin X\} = \emptyset$$

3.

$$\emptyset^c = X - \emptyset = \{x | x \in X \text{ かつ } x \notin \emptyset\} = X$$

4.

$$\begin{aligned} A \cup A^c &= \{x | x \in A \text{ または } x \in A^c\} \\ &= \{x \in X | x \in A \text{ または } x \notin A\} \\ &= X \end{aligned}$$

5.

$$A \cap A^c = (A^c)^c \cap A^c = (A^c \cup A)^c = X^c = \emptyset$$

6.

$$\begin{aligned} A - B &= \{x \in X | x \in A \text{ かつ } x \notin B\} \\ &= \{x | x \in A \text{ かつ } x \in X - B\} \\ &= \{x | x \in A \text{ かつ } x \in B^c\} \\ &= A \cap B^c \end{aligned}$$

7.

$$(A^c \cap B^c)^c = (A^c)^c \cup (B^c)^c = A \cup B$$

### 3.2

1.

$$\begin{aligned} (A \cup B) - C &= \{x | x \in A \cup B \text{ かつ } x \notin C\} \\ &= \{x | (x \in A \text{ または } x \in B) \text{ かつ } x \notin C\} \\ &= \{x | (x \in A \text{ かつ } x \notin C) \text{ または } (x \in B \text{ かつ } x \notin C)\} \\ &= \{x | x \in A - C \text{ または } x \in B - C\} \\ &= (A - C) \cup (B - C) \end{aligned}$$

2.

$$\begin{aligned} (A \cap B) - C &= \{x | x \in A \cap B \text{ かつ } x \notin C\} \\ &= \{x | (x \in A \text{ かつ } x \in B) \text{ かつ } x \notin C\} \\ &= \{x | (x \in A \text{ かつ } x \notin C) \text{ かつ } (x \in B \text{ かつ } x \notin C)\} \\ &= \{x | x \in A - C \text{ かつ } x \in B - C\} \\ &= (A - C) \cap (B - C) \end{aligned}$$

### 3.3

1. (a)

$$\begin{aligned} A \circ B &= (A - B) \cup (B - A) \\ &= (B - A) \cup (A - B) \\ &= B \circ A \end{aligned}$$

(b)

$$\begin{aligned}
(A \circ B) \circ C &= ((A \circ B) - C) \cup (C - (A \circ B)) \\
&= (((A - B) \cup (B - A)) - C) \cup (C - ((A - B) \cup (B - A))) \\
&= (((A - B) - C) \cup ((B - A) - C)) \cup ((C - (A - B)) \cap (C - (B - A))) \\
&= ((A - (B \cup C)) \cup (B - (A \cup C))) \cup (((C - A) \cup (C \cap B)) \cap ((C - B) \cup (C \cap A))) \\
&= ((A - (B \cup C)) \cup (B - (A \cup C))) \cup \\
&\quad ((C - A) \cap (C - B)) \cup ((C - A) \cap (C \cap A)) \cup ((C \cap B) \cap (C - B)) \cup ((C \cap B) \cap (C \cap A)) \\
&= ((A - (B \cup C)) \cup (B - (A \cup C))) \cup ((C - (A \cup B)) \cup \emptyset \cup \emptyset \cup (A \cap B \cap C)) \\
&= (A - (B \cup C)) \cup (B - (C \cup A)) \cup (C - (A \cup B)) \cup (A \cap B \cap C)
\end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned}
C - (A - B) &= \{x | x \in C \text{ かつ } x \notin (A - B)\} \\
&= \{x | x \in C \text{ かつ } (x \notin A \text{ または } x \in B)\} \\
&= \{x | (x \in C \text{ かつ } x \notin A) \text{ または } (x \in C \text{ かつ } x \in B)\} \\
&= (C - A) \cup (C \cap B)
\end{aligned}$$

という結果を、3行目から4行目への変形で用いた。また、

$$\begin{aligned}
(A \cup B) \cap (C \cup D) &= (A \cap (C \cup D)) \cup (B \cap (C \cup D)) \\
&= (A \cap C) \cup (A \cap D) \cup (B \cap C) \cup (B \cap D)
\end{aligned}$$

という結果を、4行目から(5, 6行目)への変形で用いた。

さて、 $(A \circ B) \circ C = (A - (B \cup C)) \cup (B - (C \cup A)) \cup (C - (A \cup B)) \cup (A \cap B \cap C)$  と変形できるので、 $(A \circ B) \circ C$  は、 $A, B, C$  が全く同等で、任意の二つを入れ替えても同じ値であることがわかる。よって、 $(A \circ B) \circ C = A \circ (B \circ C)$ 。

(c)

$$A \circ A = (A - A) \cup (A - A) = \emptyset$$

(d)

$$A \circ \emptyset = (A - \emptyset) \cup (\emptyset - A) = A$$

2.

$$\begin{aligned}
A \circ X &= B \\
\iff (A \circ X) - B &= \emptyset \text{ かつ } B - (A \circ X) = \emptyset \\
\iff ((A \circ X) - B) \cup (B - (A \circ X)) &= \emptyset \\
\iff ((A \circ X) \circ B) &= \emptyset \\
\iff ((A \circ B) \circ X) &= \emptyset \\
\iff ((A \circ B) - X) \cup (X - (A \circ B)) &= \emptyset \\
\iff ((A \circ B) - X) = \emptyset \text{ かつ } (X - (A \circ B)) &= \emptyset \\
\iff A \circ B &= X
\end{aligned}$$

ここで、 $((A \circ X) \circ B) = \emptyset \iff ((A \circ B) \circ X) = \emptyset$  という変形には、1の結果を用いた。以上より、集合  $A, B$  を任意に与えたとき、 $A \circ X = B$  を満足する集合  $X$  が  $A \circ B$  と表せるので、 $X$  はただ一つ存在することが示せた。