

数理リテラシー 第6回

～ 集合 (2) ～

桂田 祐史

2020年6月17日

連絡事項 & 本日の内容

- 本日の授業内容: 集合の基本用語 (あまり定理とかはない)
- 問 3,4 の解説を行います。
- 宿題 5 を出します。締め切りは 6 月 22 日 (月曜)13:30 です。それ以降 6 月 24 日 15:20 までに提出されたものは 1/2 にカウントします。何か事情がある場合は連絡して下さい (katurada あっとまーく meiji.ac.jp)。
- 質問や相談等は宿題余白に書くか、質問用 Zoom ミーティングで尋ねて下さい。

4.2 集合の内包的定義 (要素の条件を書く方法) \wedge の意味のコンマ

前回の復習 条件 $P(x)$ を満たす x の全体の集合を $\{x \mid P(x)\}$ と表す (集合の内包的定義)。

$\{x \mid P(x)\}$ において、 $P(x)$ が複数の条件を \wedge (かつ, and) で結んだ条件であるとき、 \wedge をコンマ、で済ませることが多い。

例えば

$$\{x \mid x \in \mathbb{R} \wedge x^2 < 2\}$$

を

$$\{x \mid x \in \mathbb{R}, x^2 < 2\}$$

のように書く。

この講義では省略せずに書く。

(時々、文章中の、の意味が \wedge か \vee か、文脈で判断することを期待されているときもある。)

4.2 集合の内包的定義 (要素の条件を書く方法) 変種

いくつか変種がある。

1. $\{f(x) \mid P(x)\}$ は $\{y \mid (\exists x : P(x)) y = f(x)\}$ という意味とする。これは高校数学でもすでに使っていたはず。

例 (正の偶数全体の集合)

$$\{2n \mid n \text{ は自然数}\} = \{x \mid (\exists n \in \mathbb{N}) x = 2n\}.$$

例 (平方数の全体)

$$\{n^2 \mid n \in \mathbb{N}\} = \{x \mid (\exists n \in \mathbb{N}) x = n^2\}.$$

2. $\{x \mid x \in A \wedge P(x)\}$ を $\{x \in A \mid P(x)\}$ と書く。

例

$$\{x \mid x \in \mathbb{N} \wedge 1 \leq x \leq 3\} = \{x \in \mathbb{N} \mid 1 \leq x \leq 3\}.$$

4.2 集合の内包的定義 (要素の条件を書く方法) 例

$$\begin{aligned} & \{x \mid x \text{ は } x^2 - x - 1 < 0 \text{ を満たす実数}\} \\ &= \{x \mid x \text{ は実数かつ } x^2 - x - 1 < 0\} \\ &= \{x \mid x \in \mathbb{R} \wedge x^2 - x - 1 < 0\} \\ &= \{x \mid x \in \mathbb{R}, x^2 - x - 1 < 0\} \\ &= \{x \in \mathbb{R} \mid x^2 - x - 1 < 0\} \\ &= \left\{ x \in \mathbb{R} \mid \frac{1 - \sqrt{5}}{2} < x < \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right\} \\ &= \left(\frac{1 - \sqrt{5}}{2}, \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right). \end{aligned}$$

ただし、最後のところで开区間の記号 $(a, b) = \{x \in \mathbb{R} \mid a < x < b\}$ を用いた。

寄り道 区間の記号

$a, b \in \mathbb{R}$, $a < b$ とするとき

$$[a, b] := \{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x \leq b\},$$

$$(a, b) := \{x \in \mathbb{R} \mid a < x < b\},$$

$$[a, b) := \{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x < b\},$$

$$(a, b] := \{x \in \mathbb{R} \mid a < x \leq b\}.$$

右側が ∞), 左側が $(-\infty$ となっている場合も用いる。実数 x について、 $x < \infty$ と $-\infty < x$ はつねに成り立つので、その条件は書かなくても同じこと (例えば $a < x < \infty$ は $a < x$ と書けば良い)。

$$[a, \infty) := \{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x\},$$

$$(a, \infty) := \{x \in \mathbb{R} \mid a < x\},$$

$$(-\infty, b] := \{x \in \mathbb{R} \mid x \leq b\},$$

$$(-\infty, b) := \{x \in \mathbb{R} \mid x < b\},$$

$$(-\infty, \infty) := \mathbb{R} \quad (\text{無条件なので実数全体}).$$

注意 (a, b) は点の座標の記号とかぶる。フランスでは $($ の代わりに $] ,)$ の代わりに $[$ を使う。例えば $]a, b[= \{x \in \mathbb{R} \mid a < x < b\}$. 合理的かもしれない。

5 包含関係 (\subset), 部分集合

定義 (含まれる, 含む, 部分集合)

A, B は集合とする。

$$\forall x (x \in A \Rightarrow x \in B) \quad (\text{これは } (\forall x \in A) x \in B \text{ とも書ける})$$

が成り立つとき、「 A は B に含まれる」、「 B は A を含む」、「 A は B の部分集合 (subset of B)」といい、

$$A \subset B \quad \text{あるいは} \quad B \supset A$$

で表す。また、その否定を $A \not\subset B$ あるいは $B \not\supset A$ で表す。

$A \subset B$ かつ $A \neq B$ であることを $A \subsetneq B$ と表し、 A は B の真部分集合 (proper subset of B) であるという。

5 包含関係 (\subset), 部分集合

$$\{1\} \subset \{1, 2\}, \quad \{1, 2\} \subset \{1, 2, 3\}.$$

これを次のようにまとめて書くことも多い。

$$\{1\} \subset \{1, 2\} \subset \{1, 2, 3\}.$$

$$\{1\} \not\subset \{2\}.$$

$$\mathbb{N} \subset \mathbb{Z} \subset \mathbb{Q} \subset \mathbb{R} \subset \mathbb{C}.$$

$$\{x \mid x \text{ は正三角形}\} \subset \{x \mid x \text{ は二等辺三角形}\}.$$

5 包含関係 (\subset), 部分集合

定理

A, B, C を任意の集合とするとき、次の (1), (2), (3) が成立する。

- ① $A \subset A$.
- ② $A \subset B$ かつ $B \subset C$ ならば $A \subset C$.
- ③ $A \subset B$ かつ $B \subset A$ ならば $A = B$.

証明

- ① 任意の x に対して、 $x \in A$ ならば $x \in A$. ゆえに $A \subset A$.
($p \Rightarrow p$ は $\neg p \vee p$ であるからつねに真である。)
- ② x を A の任意の要素とする。 $A \subset B$ より $x \in B$. $B \subset C$ より $x \in C$. ゆえに $A \subset C$.
- ③ 任意の x に対して
 - $x \in A$ ならば $A \subset B$ より $x \in B$.
 - $x \in B$ ならば $B \subset A$ より $x \in A$.

ゆえに $(x \in A \Rightarrow x \in B) \wedge (x \in B \Rightarrow x \in A)$ は真であるから $A = B$.

上の定理を見て、 \subset は、数の場合の \leq と似ていると思うかもしれない。

- ① $a \leq a$.
- ② $a \leq b$ かつ $b \leq c$ ならば $a \leq c$.
- ③ $a \leq b$ かつ $b \leq a$ ならば $a = b$.

\subset は半順序関係というものになっている (詳しいことは略)。

A が B の部分集合であることを $A \subseteq B$, A が B の真部分集合であることを $A \subset B$ と書く流儀もある。 \leq と $<$ みたくて、それなりに納得感がある。 \subset という記号はどちらの意味であるか、注意が必要なこともある。(最近では、この授業で採用した定義が主流のように思われるが…)

6 空集合

要素を1つも持たない集合を**空集合** (empty set) とよび、 \emptyset あるいは \varnothing で表す。

元々は、ゼロ 0 や丸 \circ に / を重ねたものだそうで、ギリシャ文字のファイ ϕ とは関係がない。

命題 (空集合は任意の集合の部分集合である)

任意の集合 A に対して $\emptyset \subset A$.

Proof.

A を任意の集合とする。任意の x に対して、 $x \in \emptyset$ は偽であるから

$$x \in \emptyset \Rightarrow x \in A$$

は真である。ゆえに $\emptyset \subset A$. □

復習 p が偽のとき、 $p \Rightarrow q$ は真である。

6 空集合 少し考えてみよう

$\emptyset \subset A$ を論理式で表した $\forall x(x \in \emptyset \Rightarrow x \in A)$ は

$$(\forall x \in \emptyset) x \in A$$

とも書ける。これが真であるわけだが、納得できるだろうか？

\emptyset の各メンバー (要素) x に、 $x \in A$ を満たすかどうか試験をして、全員合格なので $\emptyset \subset A$ が成り立つ、ということだが、メンバーが1人もいないわけである。

例え話になるが、受験生がいないテストは全員合格だろうか？

受験生がいなければ、合格にならない人はいないので、全員合格である、と言うと屁理屈に聞こえないだろうか？

$\forall x P(x)$ は「すべての x について $P(x)$ が成り立つ」と日本語訳するけれど、 $P(x)$ が成り立たないような x は存在しない、という意味である。

これは言葉の約束である。

これから集合の演算の話をする。まず

$$A \cup B, \quad A \cap B, \quad A \setminus B, \quad A^c$$

それから

$$A \times B, \quad 2^A (= \mathcal{P}(A))$$

7 和集合 (合併集合) と積集合 (共通部分)

定義 (和集合, 積集合)

A, B を集合とする。

$$A \cup B := \{x \mid x \in A \vee x \in B\}$$

を A と B の和集合あるいは合併集合 (union of A and B) と呼ぶ。

$$A \cap B := \{x \mid x \in A \wedge x \in B\}$$

を A と B の積集合, 共通部分あるいは交わり (intersection of A and B) と呼ぶ。

例

$A = \{1, 2, 3\}$, $B = \{2, 3, 4\}$ とするとき

$$A \cup B = \{1, 2, 3, 4\}, \quad A \cap B = \{2, 3\}.$$

8 差集合と補集合

定義 (差集合, 補集合)

A, B を集合とする。

$$A \setminus B := \{x \mid x \in A \wedge x \notin B\}$$

を A と B の**差集合** (set-theoretic difference of A and B) と呼ぶ。 $A - B$ と表すこともある。

考察する対象全体の集合 X が定まっている場合がある。そのとき X を**全体集合** (universal set) と呼び、 X の任意の部分集合 A に対して、 $X \setminus A$ を A の**補集合** (the complement of A) と呼び、 A^c で表す。

$$A^c := X \setminus A = \{x \mid x \in X \wedge x \notin A\}.$$

例

$A = \{1, 2, 3\}$, $B = \{2, 3, 4\}$ とするとき

$$A \setminus B = \{1\}, \quad B \setminus A = \{4\}.$$

$X = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ を全体集合と考えるとき、

$$A^c = \{4, 5, 6\}, \quad (A^c)^c = \{4, 5, 6\}^c = \{1, 2, 3\} = A.$$

後で説明するが、 $(A^c)^c = A$ は一般に成り立つ。 □

余談 実は補集合の記号には色々なものがある。 A の補集合を表すのに、 $\complement A$ とか \bar{A} とか、 A' などを用いる。高校数学では \bar{A} を用いたが、大学ではそれほどメジャーではない。(個人的には、 \bar{A} を別の意味に使いたいのので、 A^c が好みである。)

ヴェン図 (Venn diagram) で表すと

10 順序対と直積集合

定義 (順序対と直積集合)

2つの対象 a, b が与えられたとき、順序を考えた組 (a, b) を a と b の順序対 (ordered pair) と呼ぶ。(要するに点の座標や数ベクトルと同様のことを、数でない場合に拡張する、ということである。)

順序対の相等は (当然) 次のように定める。

$$(a, b) = (c, d) \quad \Leftrightarrow \quad a = c \wedge b = d.$$

A と B が集合のとき、 A の要素と B の要素の順序対の全体を $A \times B$ で表し、 A と B の直積集合と呼ぶ。

$$\begin{aligned} A \times B &:= \{(a, b) \mid a \in A \wedge b \in B\} \\ &= \{c \mid (\exists a \in A)(\exists b \in B) c = (a, b)\}. \end{aligned}$$

10 順序対と直積集合

例

$$(x, y) = (1, 2) \Leftrightarrow x = 1 \wedge y = 2.$$

$$(1, 2) \neq (2, 1), \quad (1, 1) \neq 1.$$

Cf. 集合と対比してみよう。 $\{1, 2\} = \{2, 1\}$, $\{1, 1\} = \{1\}$. 全然違う。

例

(x, y はすでに定まっているとして) $A = \{1, 2, 3\}$, $B = \{x, y\}$ のとき

$$A \times B = \{(1, x), (1, y), (2, x), (2, y), (3, x), (3, y)\}.$$

例

$$\mathbb{R} \times \mathbb{R} = \{(x, y) \mid x \in \mathbb{R} \wedge y \in \mathbb{R}\} = \{(x, y) \mid x \text{ と } y \text{ は実数}\}.$$

これを \mathbb{R}^2 と表すこともある。2次元ベクトルの全体とみなせる。 □

11 ベキ集合 (冪集合, power set)

定義 (ベキ集合)

集合 A に対して、 A のすべての部分集合の集合を、 A の**ベキ集合** (漢字で書くと**冪集合**, the power set of A) と呼び、 2^A や $\mathcal{P}(A)$, $P(A)$ などの記号で表す。

$$2^A = \mathcal{P}(A) := \{B \mid B \text{ は } A \text{ の部分集合}\} = \{B \mid B \subset A\}.$$

例

$$A = \{1\} \text{ のとき、} 2^A = \{\emptyset, \{1\}\}.$$

例

$$B = \{1, 2\} \text{ のとき、} 2^B = \{\emptyset, \{1\}, \{2\}, \{1, 2\}\}.$$

11 ベキ集合 (冪集合, power set)

例

$A = \{a\}$ のとき、 $B = 2^A$, $C = 2^B$ を求めよ。

$$B = 2^A = \{\emptyset, \{a\}\}.$$

$$C = 2^B = \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\{a\}\}, \{\emptyset, \{a\}\}\}.$$

解説 $B = \{p, q\}$ のとき、 $2^B = \{\emptyset, \{p\}, \{q\}, \{p, q\}\}$ となることは既に見た。これに $p = \emptyset$, $q = \{a\}$ を代入する。 □

11 ベキ集合 (冪集合, power set)

これは省略するかも。

例

$C = \{a, b\}$ のとき

$$(\heartsuit) \quad 2^C = \{\emptyset, \{a\}, \{b\}, \{a, b\}\}.$$

$a = 1$ かつ $b = 2$ のとき、 $C = \{1, 2\}$ で、当然

$$2^C = \{\emptyset, \{1\}, \{2\}, \{1, 2\}\}.$$

$a = b = 1$ のとき、 $C = \{1\}$ である。(♡) に $a = b = 1$ を代入すると

$$2^C = \{\emptyset, \{1\}, \{1\}, \{1, 1\}\} = \{\emptyset, \{1\}\} = 2^A, \quad A := \{1\}.$$

集合の外延的表記のルールとして、要素を重複して書いても良いとしてあることに注意しよう。もしそういうルールにしておかないと、(♡) は正しくない場合があることになる。

12 有限集合の要素の個数

要素の個数が 0 以上の整数である集合を**有限集合**と呼び、そうでない集合を**無限集合**と呼ぶ。

有限集合 A に対して、 A の要素の個数を $\#A$ で表すことにする。
($\#$ はシャープ $\#$ でなく、number sign である。その他 $|A|$ という記号で表すこともある。)

例

$$\#\emptyset = 0, \#\{1\} = 1, \#\{1, 2\} = 2, \#\{a, b\} = \begin{cases} 2 & (a \neq b) \\ 1 & (a = b). \end{cases}$$

命題 (直積集合の要素数)

有限集合 A, B に対して、 $\#(A \times B) = \#A\#B$ が成り立つ。

命題 (冪集合の要素数)

有限集合 A に対して、 $\#(2^A) = 2^{\#A}$ が成り立つ。

問 3,4 解説

手書きで解説する。

問5 紹介

宿題ルールは模索中であるが、今のところ、

- Oh-o! Meiji でレポートとして提出する。
- A4 サイズの単一の PDF ファイルとする。
PDF 化について
http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/how_to_pdf/
- 締め切りは翌週月曜 13:30 とする。
- 締め切り以後も水曜 15:20 (次回授業開始時) までの提出は認める。
ただし 1/2 回提出とカウントする。
- 何か特別な事情がある場合は (なるべく事前に) 連絡して相談すること。

今回の問題文は

<http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/lecture/literacy-2020/toi5.pdf>