

基礎ゼミ I 問題 3 2020 年 5 月 11 日

(1), (2), ... の小問は別の人が解いて発表しても構いませんが、(a), (b), ... の小問は同じ人が発表してください。

• ε - δ 論法 (微分積分学の教科書 pp.9-10 の参考をまず読んでください) を用いて、以下の問い (問 3.1 – 問 3.9) に答えよ。

問 3.1. $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \alpha$ なら $\lim_{n \rightarrow \infty} |a_n| = |\alpha|$ を示せ。(ヒント: $||a| - |b|| \leq |a - b|$ をまず示せ。)

問 3.2. $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \alpha$ とする。 $\alpha > 0$ なら、自然数 N が存在して、 $n \geq N$ となるすべての n について $a_n > \frac{\alpha}{2}$ が成立することを示せ。

問 3.3. $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \alpha$ 、 $\alpha \neq 0$ ならば $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{a_n} = \frac{1}{\alpha}$ を示せ。

問 3.4. $a_n \geq b_n$ ($n = 1, 2, \dots$) とする。以下を示せ。(問 3.4 と問 3.5 をはさみうちの原理ということにする。)

- (1) $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$, $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = b$ のとき $a \geq b$.
- (2) $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = \infty$ のとき $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \infty$.
- (3) $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = -\infty$ のとき $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = -\infty$.

問 3.5. $a_n \geq c_n \geq b_n$ ($n = 1, 2, \dots$) とする。 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$ で $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = a$ ならば $\lim_{n \rightarrow \infty} c_n = a$ を示せ。

問 3.6. $a_n = 1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n}$ とする。任意の実数 K に対して $n \geq N$ ならば $a_n > K$ となる自然数 N を K を用いて具体的に表し (例えば $N = 2^{2^{[K]+1}}$, $[K]$ は K 以下の最大整数を表す)、 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \infty$ を確認せよ。

問 3.7. $a_n = (-1)^{n-1}$ とする。 ε - δ 論法を用いて、数列 $\{a_n\}$ が発散する (収束しない) ことを確かめよ。

問 3.8. $\lim_{n \rightarrow \infty} |a_n| = \infty$ ならば $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{a_n} = 0$ を証明せよ。

問 3.9. 自然数の増加列 $n_1 < n_2 < \dots < n_k < \dots$ に対して、 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \alpha$ ならば $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = \alpha$ を示せ。 $(\{a_{n_k}\} \text{ を } \{a_n\} \text{ の部分列という。cf. 微分積分学 教科書 p.18.})$

• 次の問 3.10, 問 3.11 は微分積分学 教科書 p.11, 定理 6 (Weierstrass の定理) の応用です。

問 3.10. $-2 \leq p < 1 + \sqrt{5}$ とし、 $a_1 = p$, $a_{n+1} = \sqrt{4 + 2a_n}$ によって数列 $\{a_n\}$ を定める。

(a) すべての n に対して $a_n < 4$ を示せ。(b) $\{a_n\}$ が単調増加であることを示せ。(c) $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n$ を求めよ。

問 3.11. $2 - \sqrt{3} < q < 2 + \sqrt{3}$ とし、 $b_1 = q$, $b_{n+1} = \frac{1}{4}(b_n^2 + 1)$ によって定義される数列 $\{b_n\}$ を考える。

(a) すべての n に対して $b_n > 0$ を示せ。(b) $\{b_n\}$ が単調減少であることを示せ。(c) $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n$ を求めよ。

• 次の 2 つの間については微分積分学 教科書 pp.14-17, 例 5, 例 7 を参照ください。

問 3.12. はさみうちの原理を用いて次の極限値を求めよ。(3), (4) では $c > 1$, (5) では $0 < a < b < c$ とする。

- (1) $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n^2}$ (2) $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n!}{n^n}$ (3) $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{c^n}{n!}$ (4) $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{c^n}{n^2}$ (5) $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a^n + b^n + c^n}$

問 3.13. 一般項が次の式で与えられる数列の極限値を求めよ。ただし、 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = e$ は既知とする。

- (1) (a) $\frac{\sqrt{n^3 + n + 1} - \sqrt{n^3 - n + 1}}{\sqrt{n+1} - \sqrt{n}}$ (b) $\sin \sqrt{n+1} - \sin \sqrt{n}$ (c) $\frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 3} + \frac{1}{2 \cdot 3 \cdot 4} + \dots + \frac{1}{n(n+1)(n+2)}$
- (2) (a) $\left(\frac{n}{1+n}\right)^n$ (b) $\left(1 - \frac{1}{n}\right)^n$ (3) $\left(1 + \frac{1}{\sqrt{n}}\right)^n$ (4) $\left(1 + \frac{1}{n^2}\right)^n$

ヒント: (1) (b) 加法定理を用いよ, (c) まず $\frac{1}{n(n+1)} - \frac{1}{(n+1)(n+2)}$ を計算せよ,

(2) (b) $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \alpha$ ならば $\lim_{n \rightarrow \infty} a_{n-1} = \alpha$ となること、すなわち、 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{1-n}\right)^{n-1} = e$ を用いよ。

(3) 二項定理により $\left(1 + \frac{1}{\sqrt{n}}\right)^n \geq n C_1 \frac{1}{\sqrt{n}} = \sqrt{n}$ を示し、はさみうちの原理を用いよ。

(4) $n C_k \leq n^k$ と二項定理により $\left(1 + \frac{1}{n^2}\right)^n \leq 1 + n C_1 \frac{1}{n^2} + \sum_{k=2}^n n^k \left(\frac{1}{n^2}\right)^k < 1 + \frac{1}{n} + \frac{n-1}{n^2}$ を示し、

はさみうちの原理を用いよ。