

1 次の環  $R$  と  $a, b \in R$  に対し和  $a + b$  および積  $ab$  を計算せよ.

$$(1) R = \mathbb{Z}[x], a = 3x + 2, b = 2x^2 - x + 5$$

$$(2) R = \mathbb{Q}[x], a = \frac{1}{2}x + 1, b = 3x - 2$$

$$(3) R = \mathbb{Z}/15\mathbb{Z}, a = 8, b = 10$$

(解答)

$$(1) a + b = (3x + 2) + (2x^2 - x + 5) = 2x^2 + 2x + 7, \\ ab = (3x + 2)(2x^2 - x + 5) = 6x^3 + x^2 + 13x + 10.$$

$$(2) a + b = (\frac{1}{2}x + 1) + (3x - 2) = \frac{7}{2}x - 1, ab = (\frac{1}{2}x + 1)(3x - 2) = \frac{3}{2}x^2 + 2x - 2.$$

$$(3) a + b = 8 + 10 = 18 = 3, ab = 8 \cdot 10 = 8 \cdot (-5) = -40 = 5.$$

2  $p$  を素数とするとき,

$$x^p \equiv x \pmod{p}$$

がすべての整数  $x$  について成り立つことを示せ (フェルマーの定理).

(解答) まず  $x = n \geq 0$  の場合に数学的帰納法により証明する.  $n = 0$  のときは両辺とも 0 に等しく明らかである. 整数  $a, b$  に対し,

$$(a + b)^p \equiv a^p + b^p \pmod{p}$$

が成り立つことを思い出す. このことから

$$n^p = ((n - 1) + 1)^p \equiv (n - 1)^p + 1^p$$

が成り立つ. したがって  $x = n - 1$  まで正しいと仮定すると,

$$n^p \equiv (n - 1) + 1 = n$$

となり  $x = n$  のときも正しい.  $x = -n$  ( $n > 0$ ) のときは,

$$x^p = (-n)^p = (-1)^p n^p \equiv (-1)^p n = -n = x \pmod{p}$$

より従う<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> $p = 2$  のとき  $(-1)^2 = 1 \equiv -1 \pmod{p}$  となることに注意せよ.

3 実数を成分とする  $n$  次正方行列全体の集合

$$M(n, \mathbb{R}) = \{A = (a_{ij}) \mid a_{ij} \in \mathbb{R}, 1 \leq i, j \leq n\}$$

が行列の和と積に関して、環になることを確認せよ。またこの環の単位元は何か答えよ。ただし行列の和と積に関する性質 (分配法則等) は改めて証明しなくて良い。

(解答)

(1) (和に関して可換群になること)  $A, B, C \in M(n, \mathbb{R})$  とする。和に関し

$$(A + B) + C = A + (B + C)$$

が成り立ち、結合法則が満たされる。零行列  $O \in M(n, \mathbb{R})$  が存在し、任意の  $A \in M(n, \mathbb{R})$  に対し、

$$A + O = O + A = A$$

が成り立つので、 $O$  は  $M(n, \mathbb{R})$  の加法に関する単位元である。また、任意の  $A \in M(n, \mathbb{R})$  に対し、 $-A = (-1)A$  を考えれば

$$A + (-A) = (-A) + A = O$$

を満たし、 $-A$  は  $A$  の加法逆元となる。明らかに  $A + B = B + A$ , ( $A, B \in M(n, \mathbb{R})$ ) が成り立つ。したがって、 $M(n, \mathbb{R})$  は加法に関して可換群となる。

(2) (結合法則) 行列の積に関する結合法則により、任意の  $A, B, C \in M(n, \mathbb{R})$  に対し、

$$A(BC) = (AB)C$$

が成り立つ。

(3) (分配法則) 行列の積に関する分配法則により、任意の  $A, B, C \in M(n, \mathbb{R})$  に対し、

$$A(B + C) = AB + AC, \quad (A + B) \cdot C = AC + BC$$

が成立する。

以上により  $M(n, \mathbb{R})$  は環になる。単位行列  $E$  はこの環の単位元であるから、 $A$  の逆行列  $A^{-1}$ , すなわち

$$A \cdot A^{-1} = A^{-1}A = E$$

を満たす行列  $A^{-1}$  は  $A$  の乗法逆元である。したがって  $M(n, \mathbb{R})$  の単位元は正則行列全体となる。

<sup>1</sup>※この講義に関する情報はホームページを参照。 <https://hirokazunasu.github.io/2025/alg2.html>