

# 齋藤正彦・線型代数入門解答集

なまちゃん

2024 年 1 月 6 日

## 目次

### 目次

#### 第 1 章

|                         |    |
|-------------------------|----|
| p5 : 問 1 . . . . .      | 2  |
| p5 : 問 2 . . . . .      | 2  |
| p7 : 問-(上) . . . . .    | 3  |
| p7 : 問-(下) . . . . .    | 3  |
| p8 : 問 1 . . . . .      | 4  |
| p8 : 問 2 . . . . .      | 4  |
| p10 : 問 1 . . . . .     | 5  |
| p10 : 問 2 . . . . .     | 5  |
| p11 : 問 1 . . . . .     | 6  |
| p12 : 問 2 . . . . .     | 6  |
| p12 : 問 3 . . . . .     | 6  |
| p13 : 問 1 . . . . .     | 7  |
| p18 : 問 . . . . .       | 8  |
| p19 : 問 1 . . . . .     | 9  |
| p19 : 問 2 . . . . .     | 9  |
| p19 : 問 1-(下) . . . . . | 9  |
| p19 : 問 2-(下) . . . . . | 10 |
| p22 : 問 1 . . . . .     | 11 |

#### 第 1 章・章末問題

|                          |    |
|--------------------------|----|
| p29-30 : 1 . . . . .     | 11 |
| p29-30 : 2 . . . . .     | 13 |
| p29-30 : 3 . . . . .     | 13 |
| p29-30 : 4 . . . . .     | 14 |
| p29-30 : 5 . . . . .     | 14 |
| p29-30 : 7-(1) . . . . . | 15 |
| p29-30 : 8 . . . . .     | 16 |
| p29-30 : 9 . . . . .     | 16 |
| p29-30 : 10 . . . . .    | 17 |

#### 第 2 章

17

|                     |    |
|---------------------|----|
| p34 : 問 1 . . . . . | 17 |
| p40 : 問 . . . . .   | 18 |
| p41 : 問 1 . . . . . | 19 |
| p42 : 問 1 . . . . . | 20 |
| p52 : 問 . . . . .   | 22 |
| p62 : 問 1 . . . . . | 22 |
| p62 : 問 2 . . . . . | 22 |

#### 第 2 章・章末問題

23

|                         |    |
|-------------------------|----|
| p70-73 : 1-イ) . . . . . | 23 |
| p70-73 : 1-ロ) . . . . . | 24 |
| p70-73 : 3-イ) . . . . . | 25 |
| p70-73 : 4 . . . . .    | 26 |
| p70-73 : 5 . . . . .    | 27 |
| p70-73 : 6 . . . . .    | 28 |
| p70-73 : 7 . . . . .    | 29 |
| p70-73 : 8 . . . . .    | 30 |
| p70-73 : 11 . . . . .   | 31 |
| p70-73 : 14 . . . . .   | 32 |
| p70-73 : 15 . . . . .   | 33 |

#### 第 3 章

34

|                     |    |
|---------------------|----|
| p77 : 問 2 . . . . . | 34 |
| p77 : 問 3 . . . . . | 34 |
| p79 : 問 . . . . .   | 35 |
| p83 : 問 . . . . .   | 36 |

#### 第 3 章・章末問題

37

|                      |    |
|----------------------|----|
| p90-91 : 3 . . . . . | 37 |
| p90-91 : 4 . . . . . | 38 |
| p90-91 : 5 . . . . . | 38 |

#### 第 4 章

39

|                   |    |
|-------------------|----|
| p93 : 問 . . . . . | 39 |
| p94 : 問 . . . . . | 40 |

|                          |    |
|--------------------------|----|
| p107-108 : 問 1 . . . . . | 41 |
|--------------------------|----|

|                          |    |
|--------------------------|----|
| p107-108 : 問 2 . . . . . | 42 |
|--------------------------|----|

#### 附録 III

44

|                    |    |
|--------------------|----|
| p249 : 問 . . . . . | 44 |
|--------------------|----|

## 第 1 章

### p5 : 問 1

証明. 線分 PQ の中点を M とする. このとき,

$$\begin{aligned}\overrightarrow{OM} &= \overrightarrow{OP} + \overrightarrow{PM} \\ &= \boldsymbol{a} + \frac{\boldsymbol{b} - \boldsymbol{a}}{2} \\ &= \frac{\boldsymbol{a} + \boldsymbol{b}}{2}\end{aligned}$$

である.  $\square$

### p5 : 問 2

証明. 三角形 PQR の重心を G, PQ の中点を N とする. G は線分 RN を 2:1 に内分する点なので,

$$\begin{aligned}\overrightarrow{OG} &= \overrightarrow{OR} + \frac{2}{3}\overrightarrow{RN} \\ &= \boldsymbol{c} + \frac{2}{3}\left(\frac{\boldsymbol{a} + \boldsymbol{b}}{2} - \boldsymbol{c}\right) \\ &= \frac{\boldsymbol{a} + \boldsymbol{b} + \boldsymbol{c}}{3}\end{aligned}$$

である.  $\square$

## p7 : 問-(上)

求めるベクトルを,  $\mathbf{x} = (x, y, z)$  (ただし  $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ ) とおく. このとき, 内積の定義により,

$$\mathbf{x} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = x + y + z = 1 \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \frac{\pi}{6} = \frac{3}{2}$$

$$\mathbf{x} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 4 \end{pmatrix} = x + y + 4z = 1 \cdot 3\sqrt{2} \cdot \cos \frac{\pi}{4} = 3$$

これらの式から,

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2 \pm \sqrt{2}}{4} \\ \frac{2 \mp \sqrt{2}}{4} \\ \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (\text{複号同順})$$

である.

## p7 : 問-(下)

[1.4] の結果を利用する.

求める三角形の面積を  $S$  とし,

$$\mathbf{a} = \overrightarrow{P_1 P_2} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1), \quad \mathbf{b} = \overrightarrow{P_1 P_3} = (x_3 - x_1, y_3 - y_1, z_3 - z_1)$$

とおく, このとき,

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{2} \sqrt{\|\overrightarrow{P_1 P_2}\|^2 \|\overrightarrow{P_1 P_3}\|^2 - (\overrightarrow{P_1 P_2}, \overrightarrow{P_1 P_3})^2} \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{\|\mathbf{a}\|^2 \|\mathbf{b}\|^2 - (\mathbf{a}, \mathbf{b})^2} \\ &= \frac{1}{2} \{ [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2] [(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + (z_3 - z_1)^2] \\ &\quad - [(x_2 - x_1)(x_3 - x_1) + (y_2 - y_1)(y_3 - y_1) + (z_2 - z_1)(z_3 - z_1)]^2 \}^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

である,

## p8 : 問 1

- イ 与えられた直線を  $l$  とする.  $l$  の方程式に  $x = -2$  を代入すると,  $y = 2$  となるため,  $l$  は点  $(-2, 2)$  を通る. また,  $l$  の法線ベクトルのひとつは,  $\begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}$  なので,  $l$  の方向ベクトルのひとつは,  $\begin{pmatrix} -3 \\ 2 \end{pmatrix}$  である. よって,  $l$  のベクトル表示のひとつは,  $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} -3 \\ 2 \end{pmatrix} \quad (-\infty < t < \infty)$  である.
- ロ 与えられた直線を  $l'$  とする.  $l'$  の方向ベクトルのひとつは,  $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  である. また,  $l'$  は点  $(3, 0)$  を通るので, そのベクトル表示のひとつは,  $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (-\infty < t < \infty)$  となる.

## p8 : 問 2

- イ 与えられたベクトル表示から,

$$\begin{cases} x = 1 + 2t \\ y = -1 + t \end{cases}$$

であるから,

$$\begin{cases} t = \frac{x-1}{2} \\ t = y+1 \end{cases}$$

である. これから  $t$  を消去すると,

$$\begin{aligned} \frac{x-1}{2} &= y+1 \\ \therefore x-2y-3 &= 0 \end{aligned}$$

である.

- ロ 点  $(-1, -2)$  を通り,  $x$  軸に平行な直線を表すから,  $y = -2$  が求める直線の方程式である.

## p10 : 問 1

$$\begin{cases} x + 2y + 3z = 1 \\ 3x + 2y + z = -1 \end{cases}$$

から,

$$-2x + 2z = 2$$

$$\therefore -x + z = 1$$

である. このとき,  $\begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}$  はこれを満たす. このときの  $y$  の値を計算すると, それぞれ  $-3, -5$  なので, 結局, 与えられた直線は 2 点  $(1, -3, 2), (2, -5, 3)$  を通る. すなわち, この直線の方角ベクトルのひとつは

$$\begin{pmatrix} 2 \\ -5 \\ 3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ -3 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

である. したがって求めるベクトル表示のひとつは, 直線上の任意の位置ベクトルを  $\boldsymbol{x}$  とすると,

$$\boldsymbol{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ -3 \\ 2 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

と表せる.

## p10 : 問 2

**証明.**  $t$  を  $0 \leq t \leq 1$  をみたす実数, 線分  $P_1P_2$  上の任意の点の位置ベクトルを  $\boldsymbol{x}$  とする. このとき,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{x} &= \overrightarrow{OP_1} + t\overrightarrow{P_1P_2} \\ &= \boldsymbol{x}_1 + t(\boldsymbol{x}_2 - \boldsymbol{x}_1) \\ &= (1-t)\boldsymbol{x}_1 + t\boldsymbol{x}_2 \end{aligned}$$

である.  $1-t = t_1, t = t_2$  と改めておくと,  $t$  の定め方から  $t_1 \geq 0, t_2 \geq 0$  であり,

$$\boldsymbol{x} = t_1\boldsymbol{x}_1 + t_2\boldsymbol{x}_2, \quad t_1 + t_2 = 1$$

となり, これが証明すべきことであつた.  $\square$

**p11 : 問 1**

与えられた平面を  $(S)$  とおく.  $(S)$  は 3 点  $(-1, 0, 1)$ ,  $(2, 0, -1)$ ,  $(0, -1, 0)$  を通るので,

$$\mathbf{x}_1 = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{x}_2 = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{x}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

と改めておくと,

$$\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1 = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

となり,  $\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1$  と  $\mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_1$  は線型独立なので, 求めるベクトル表示のひとつは,

$$(S): \mathbf{x} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} + s \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix} \quad (-\infty < t, s < \infty)$$

**p12 : 問 2**

$$\begin{cases} x = 1 + t - s \\ y = 2 - t - 2s \\ z = 0 + 2t + s \end{cases}$$

から  $t$  と  $s$  を消去して,

$$x - y - z = -1$$

これが求める直線の方程式である.

**p12 : 問 3**

証明.

$$\overrightarrow{OP_1} = \mathbf{x}_1, \quad \overrightarrow{OP_2} = \mathbf{x}_2, \quad \overrightarrow{OP_3} = \mathbf{x}_3$$

とする. このとき, 三角形  $P_1P_2P_3$  上の任意の点の位置ベクトルを  $\mathbf{x}$ ,  $s, t$  を  $0 \leq s, t \leq 1$  を満たす実数とすると,

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \mathbf{x}_1 + s(\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1) + t(\mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_1) \\ \therefore \mathbf{x} &= (1 - s - t)\mathbf{x}_1 + s\mathbf{x}_2 + t\mathbf{x}_3 \end{aligned}$$

となり,  $1 - s - t = t_1$ ,  $s = t_2$ ,  $t = t_3$  と改めて書き直すと,  $s, t$  の定め方より,  $0 \leq t_1, t_2, t_3 \leq 1$  であり

$$\mathbf{x} = t_1\mathbf{x}_1 + t_2\mathbf{x}_2 + t_3\mathbf{x}_3, \quad t_1 + t_2 + t_3 = 1$$

となる. これが証明すべきことであつた.  $\square$

**p13 : 問 1**

問 1 :

$(S_1), (S_2)$  の法線ベクトルをそれぞれ  $\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_2$  とおくと,

$$\boldsymbol{x}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \boldsymbol{x}_2 = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 0 \end{pmatrix}$$

である. ゆえに, 交角を  $\theta$  ( $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ ) とすると,

$$\cos \theta = \frac{\boldsymbol{x}_1 \cdot \boldsymbol{x}_2}{\|\boldsymbol{x}_1\| \|\boldsymbol{x}_2\|} = \frac{3}{3\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

であるから,  $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$  より  $\theta = \frac{\pi}{4}$  である.

**p18 : 問**

**証明.**  $A, B, C$  が  $2 \times 2$  行列の場合を証明する.

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} e & f \\ g & h \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} i & j \\ k & l \end{pmatrix}$$

とし,  $A, B, C$  の成分はすべて複素数であるとする. このとき,

$$\begin{aligned} (AB)C &= \begin{pmatrix} ae + bg & af + bh \\ ce + dg & cf + dh \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i & j \\ k & l \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} aei + bgi + afk + bhk & aej + bgj + afl + bhl \\ cei + dgi + cfk + dhk &cej + dgj + cfl + dhl \end{pmatrix} \end{aligned}$$

となる. 他方

$$\begin{aligned} A(BC) &= \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ei + fk & ej + fl \\ gi + hk & gj + hl \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} aei + afk + bgi + bhk & aej + afl + bgj + bhl \\ cei + cfk + dgi + dhk &cej + cfl + dgj + dhl \end{pmatrix} \end{aligned}$$

となり, たしかに  $(AB)C = A(BC)$  である.  $\square$



## p19 : 問 1-(上)

証明.

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -x \\ -y \end{pmatrix}$$

となり, これは明らかに線型変換である. 対応する行列は,  $\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$  である.  $\square$

## p19 : 問 2-(上)

証明. 式 (15) より,  $2 \times 2$  行列  $A$ ,  $B$  とベクトル  $\boldsymbol{x}$  について,

$$\begin{aligned} T_B(T_A(\boldsymbol{x})) &= B(A\boldsymbol{x}) \\ &= (BA)\boldsymbol{x} \\ &= T_{BA}(\boldsymbol{x}) \end{aligned}$$

である. これが証明すべきことであつた.  $\square$

## p19 : 問 1-(下)

$\boldsymbol{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$  とおくと, (17) 式より,

$$\begin{aligned} T\boldsymbol{x} &= \frac{ax + by}{a^2 + b^2} \boldsymbol{a} \\ &= \begin{pmatrix} a^2x + aby \\ abx + b^2y \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} a^2 & ab \\ ab & b^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} a^2 & ab \\ ab & b^2 \end{pmatrix} \boldsymbol{x} \end{aligned}$$

であるから,

$$T = \begin{pmatrix} a^2 & ab \\ ab & b^2 \end{pmatrix}$$

となる.

## p19 : 問 2-(下)

イ 証明.  $\mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{a} \neq \mathbf{0}$  かつ  $\mathbf{b} \neq \mathbf{0}$  とする. このとき,

$$\begin{aligned} T\mathbf{x} &= \frac{(\mathbf{a}, \mathbf{x})}{(\mathbf{a}, \mathbf{a})} \mathbf{a} \\ &= \frac{a_1x + a_2y}{a_1^2 + a_2^2} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{a_1^2 + a_2^2} \begin{pmatrix} a_1^2 & a_1a_2 \\ a_1a_2 & a_2^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \end{aligned}$$

となる. つまり,  $T = \frac{1}{a_1^2 + a_2^2} \begin{pmatrix} a_1^2 & a_1a_2 \\ a_1a_2 & a_2^2 \end{pmatrix}$  である. このとき,

$$\begin{aligned} T^2 &= \frac{1}{(a_1^2 + a_2^2)^2} \begin{pmatrix} a_1^4 + a_1^2a_2^2 & a_1^3a_2 + a_1a_2^3 \\ a_1^3a_2 + a_1a_2^3 & a_2^4 + a_1^2a_2^2 \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{a_1^2 + a_2^2} \begin{pmatrix} a_1^2 & a_1a_2 \\ a_1a_2 & a_2^2 \end{pmatrix} = T \end{aligned}$$

となり,  $T^2 = T$  である.  $S^2 = S$  も同様にして示される.  $\square$

ロ 証明.  $\mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}$  とする. このとき,  $\mathbf{a}$  と  $\mathbf{b}$  が直交することから,

$$\begin{aligned} \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} &= 0 \\ \therefore a_1b_1 + a_2b_2 &= 0 \end{aligned}$$

である. ここで,

$$\begin{aligned} TS &= \frac{1}{(a_1^2 + a_2^2)} \begin{pmatrix} a_1^2 & a_1a_2 \\ a_1a_2 & a_2^2 \end{pmatrix} \frac{1}{(b_1^2 + b_2^2)} \begin{pmatrix} b_1^2 & b_1b_2 \\ b_1b_2 & b_2^2 \end{pmatrix} \\ &= \frac{a_1b_1 + a_2b_2}{(a_1^2 + a_2^2)(b_1^2 + b_2^2)} \begin{pmatrix} a_1b_1 & a_1b_2 \\ a_2b_1 & a_2b_2 \end{pmatrix} = O \\ &\quad (\because a_1b_1 + a_2b_2 = 0) \end{aligned}$$

である. 同様に  $ST$  を計算すると,  $ST = O$  であることもわかり, これで  $TS = ST = O$  が証明された.  $\square$

ハ 証明. イ), ロ) の文字や結論を用いると,

$$\begin{aligned} T\mathbf{x} + S\mathbf{x} &= \frac{1}{a_1^2 + a_2^2} \begin{pmatrix} a_1^2 & a_1a_2 \\ a_1a_2 & a_2^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \frac{1}{b_1^2 + b_2^2} \begin{pmatrix} b_1^2 & b_1b_2 \\ b_1b_2 & b_2^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{(a_1^2 + a_2^2)(b_1^2 + b_2^2)} \begin{pmatrix} (a_1^2 + a_2^2)(b_1^2 + b_2^2) & (a_1^2 + a_2^2)(b_1^2 + b_2^2) \\ (a_1^2 + a_2^2)(b_1^2 + b_2^2) & (a_1^2 + a_2^2)(b_1^2 + b_2^2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \mathbf{x} \end{aligned}$$

となる. これが証明すべきことであった.  $\square$

## p22 : 問 1

イ

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -x \\ y \\ -z \end{pmatrix}$$

となり, これは  $y$  軸に関する対象点に移す変換を表す.

ロ

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \cos \alpha - z \sin \alpha \\ y \sin \alpha + z \cos \alpha \end{pmatrix}$$

となり, これは  $x$  軸まわりに角  $\alpha$  だけ回転する変換を表す.

ハ

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y \\ z \\ x \end{pmatrix}$$

## 第 1 章・章末問題

## p29-30:1

**証明.** 四面体  $P_1P_2P_3P_4$  を考える. 三角形  $P_2P_3P_4$  の任意の周および内部の点を  $T$  とする.  $0 \leq k \leq 1$ ,  $0 \leq s \leq 1$  をみたす  $k, s \in \mathbb{R}$  によって

$$\begin{aligned} \overrightarrow{P_2T} &= k\{s\overrightarrow{P_2P_3} + (1-s)\overrightarrow{P_2P_4}\} \\ &= ks(\mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_2) + k(1-s)(\mathbf{x}_4 - \mathbf{x}_2) \\ &= -k\mathbf{x}_2 + ks\mathbf{x}_3 + k(1-s)\mathbf{x}_4 \end{aligned}$$

と表される.

さて, 線分  $P_1T$  上の任意の点を  $Q$  とすると,  $0 \leq t \leq 1$  をみたす  $t \in \mathbb{R}$  によって

$$\begin{aligned} \overrightarrow{P_1Q} &= t\overrightarrow{P_1T} \\ &= t\overrightarrow{P_2T} - t\overrightarrow{P_2P_1} \\ &= t(-k\mathbf{x}_2 + ks\mathbf{x}_3 + k(1-s)\mathbf{x}_4) - t(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2) \\ &= -t\mathbf{x}_1 + (t - kt)\mathbf{x}_2 + kst\mathbf{x}_3 + kt(1-s)\mathbf{x}_4 \end{aligned}$$

と表されるから,  $k = 4$  のときの求める位置ベクトルは,

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \mathbf{x}_1 + \overrightarrow{P_1Q} \\ &= (1-t)\mathbf{x}_1 + (t-kt)\mathbf{x}_2 + kst\mathbf{x}_3 + kt(1-s)\mathbf{x}_4 \end{aligned}$$

となり,

$$(1-t) + (t-kt) + kst + kt(1-s) = 1$$

であるから,  $1-t = t_1$ ,  $t-kt = t_2$ ,  $kst = t_3$ ,  $kt(1-s) = t_4$  とおくと,

$$\mathbf{x} = t_1\mathbf{x}_1 + t_2\mathbf{x}_2 + t_3\mathbf{x}_3 + t_4\mathbf{x}_4, \quad t_1, t_2, t_3, t_4 \geq 0, \quad t_1 + t_2 + t_3 + t_4 = 1$$

となり、ここまでで  $k = 4$  の場合が示された。

ここで、 $n \geq 4$  として  $k = n$  のときに主張が成り立つと仮定する。このとき、

$$t_1 \mathbf{x}_1 + t_2 \mathbf{x}_2 + \cdots + t_n \mathbf{x}_n$$

は仮定により多面体  $\{P_n\}$  の内部の点であり、これを簡単のために  $\mathbf{X}_n$  とおく。

さて、 $\{P_n\}$  の点と  $P_{n+1}$  とを結ぶ線分上の点は、 $0 \leq l \leq 1$  をみたす  $l \in \mathbb{R}$  によって、

$$l \overbrace{(t_1 \mathbf{x}_1 + t_2 \mathbf{x}_2 + \cdots + t_n \mathbf{x}_n)}^{\mathbf{X}_n} + (1-l) \mathbf{x}_{n+1}, \quad t_1 + t_2 + \cdots + t_n = 1$$

とかける。ここで、

$$l(t_1 + t_2 + \cdots + t_n) + (1-l) = 1$$

なので、 $\{P_n\}$  の点と  $P_{n+1}$  とを結ぶ線分上の点はこのように表せる。

逆に、

$$\mathbf{x} = t_1 \mathbf{x}_1 + t_2 \mathbf{x}_2 + \cdots + t_n \mathbf{x}_n + t_{n+1} \mathbf{x}_{n+1}, \quad t_1, t_2, \dots, t_n, t_{n+1} \geq 0, \quad t_1 + t_2 + \cdots + t_n + t_{n+1} = 1$$

としたとき、

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \frac{t_1 \mathbf{x}_1 + t_2 \mathbf{x}_2 + \cdots + t_n \mathbf{x}_n}{t_1 + t_2 + \cdots + t_n} \cdot (t_1 + t_2 + \cdots + t_n) + t_{n+1} \mathbf{x}_{n+1} \\ &= T_n \mathbf{X}_n + t_{n+1} \mathbf{x}_{n+1} \end{aligned}$$

と変形できる。ただし  $T_n = t_1 + t_2 + \cdots + t_n$  とおいた。

さて

$$\frac{\mathbf{X}_n}{T_n} = \frac{t_1 \mathbf{x}_1}{T_n} + \frac{t_2 \mathbf{x}_2}{T_n} + \cdots + \frac{t_n \mathbf{x}_n}{T_n}$$

であることと

$$\begin{aligned} \frac{t_1}{T_n} + \frac{t_2}{T_n} + \cdots + \frac{t_n}{T_n} &= \frac{T_n}{T_n} \\ &= 1 \end{aligned}$$

であることにより、

$$\frac{\mathbf{X}_n}{T_n}$$

は、多面体  $\{P_n\}$  の内部の点であり、

$$T_n \cdot \frac{\mathbf{X}_n}{T_n} + t_{n+1} \mathbf{x}_{n+1}$$

は多面体  $\{P_n\}$  の内部の点と  $P_{n+1}$  を結ぶ線分上の点である。

よって、 $k = n$  のときも問題の主張が成り立つ。

以上の考察により証明された。□

## p29-30:2

**証明.** 2点  $P_1, P_2$  を通る直線の方程式を  $ax + by + 1 = 0$  (ただし  $(a, b) \neq (0, 0)$ ) とおく. このとき,

$$\begin{cases} ax + by + c = 0 \\ ax_1 + by_1 + c = 0 \\ ax_2 + by_2 + c = 0 \end{cases}$$

が成立する. すなわちこれは

$$\begin{pmatrix} x & y & 1 \\ x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \mathbf{0}$$

をみたら. これを  $a, b, c$  についての連立方程式とみたとき, 与条件により自明でない解があり,

$$\begin{vmatrix} x & y & 1 \\ x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \end{vmatrix} = 0$$

が成立する. 転置行列の行列式はもとの行列の行列式に等しいので, 行列式の交代性なども用いて,

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x & x_1 & x_2 \\ y & y_1 & y_2 \end{vmatrix} = 0$$

を得る. これが証明すべきことであった.  $\square$

## p29-30:3

点を以下の順で移動させる変換を考える.

- (1) 原点中心に  $-\theta$  回転させる.
- (2)  $x$  軸に関して対称移動させる.
- (3) 原点中心に  $\theta$  回転させる.

ここで, (1) から (3) までの変換を表す行列をそれぞれ  $R_{-\theta}, A_x, R_\theta$  とすると,

$$R_{-\theta} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix},$$

$$A_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix},$$

$$R_\theta = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}.$$

となる. よって, この変換を表す行列は

$$\begin{aligned} R_\theta A_x R_{-\theta} &= \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos^2 \theta - \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ 2 \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta - \cos^2 \theta \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{pmatrix} \end{aligned}$$

である.

## p29-30:4

**証明.** 以下では、直線  $y = \tan \theta$  に関する折り返しを  $T_\theta$  とかくことにする.

さて、直線  $y = \tan(\theta/4)x$  に関する折り返しは、

$$T_{\theta/4} = \begin{pmatrix} \cos(\theta/2) & \sin(\theta/2) \\ \sin(\theta/2) & -\cos(\theta/2) \end{pmatrix}$$

で表される.

また、直線  $y = \tan(-\theta/4)x$  に関する折り返しは、

$$T_{-\theta/4} = \begin{pmatrix} \cos(\theta/2) & -\sin(\theta/2) \\ -\sin(\theta/2) & -\cos(\theta/2) \end{pmatrix}$$

で表される.

ここで、

$$\begin{aligned} T_{\theta/4}T_{-\theta/4} &= \begin{pmatrix} \cos(\theta/2) & \sin(\theta/2) \\ \sin(\theta/2) & -\cos(\theta/2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\theta/2) & -\sin(\theta/2) \\ -\sin(\theta/2) & -\cos(\theta/2) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos^2(\theta/2) - \sin^2(\theta/2) & -2\sin(\theta/2)\cos(\theta/2) \\ 2\sin(\theta/2)\cos(\theta/2) & \cos^2(\theta/2) - \sin^2(\theta/2) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \end{aligned}$$

となり、これは原点のまわりに  $\theta$  回転する行列を表す.

以上の考察により証明された.  $\square$

## p29-30 : 5

任意の点  $P(p)$ ,  $p \in \mathbb{R}^3$  を平面  $(a, x)$  に対して折り返すことを考える.

点  $P$  から  $(a, x)$  におろした垂線の足は、 $t \in \mathbb{R}$  を用いて

$$p + t \frac{a}{(a, a)}$$

と表せ、これが平面  $(a, x)$  上にあるので、

$$(a, p + t \frac{a}{(a, a)}) = 0$$

$$\therefore t = -(a, p)$$

である.

また、求める点を  $P'(p')$  とすると、

$$\begin{aligned} p' &= p + t \frac{2a}{(a, a)} \\ &= p - \frac{2(a, p)}{(a, a)} a \end{aligned}$$

であるから、これはたしかに  $V^3$  の線型変換を引き起こし、その変換公式は

$$x \mapsto x - \frac{2(a, x)}{(a, a)} a$$

である,

## p29-30:7-(1)

$a, b, c$  が張る平行六面体の体積は,

$$|\det(a, b, c)|$$

で与えられる.

一方, この平行六面体の  $O, B, C$  を含む面の面積は,

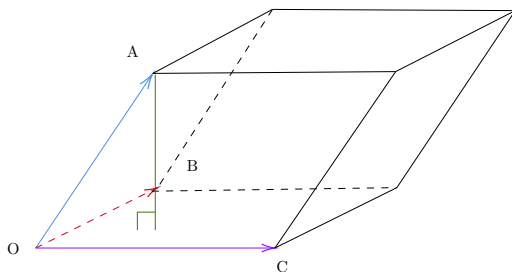
$$\|b \times c\|$$

で与えられる.

以上の考察により, 求める長さは,

$$\frac{|\det(a, b, c)|}{\|b \times c\|}$$

である.



## p29-30 : 8

証明.

$$\mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{c} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix}$$

とする. このとき,

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 & a_1b_1 + a_2b_2 + a_3b_3 & a_1c_1 + a_2c_2 + a_3c_3 \\ b_1a_1 + b_2a_2 + b_3a_3 & b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 & b_1c_1 + b_2c_2 + b_3c_3 \\ c_1a_1 + c_2a_2 + c_3a_3 & c_1b_1 + c_2b_2 + c_3b_3 & c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} (\mathbf{a}, \mathbf{a}) & (\mathbf{a}, \mathbf{b}) & (\mathbf{a}, \mathbf{c}) \\ (\mathbf{b}, \mathbf{a}) & (\mathbf{b}, \mathbf{b}) & (\mathbf{b}, \mathbf{c}) \\ (\mathbf{c}, \mathbf{a}) & (\mathbf{c}, \mathbf{b}) & (\mathbf{c}, \mathbf{c}) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

である.

一方,

$$\begin{aligned} \det(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}) &= \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} \\ &= c_1 \begin{vmatrix} a_2 & b_2 \\ a_3 & b_3 \end{vmatrix} + c_2 \begin{vmatrix} a_3 & b_3 \\ a_1 & b_1 \end{vmatrix} + c_3 \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} \\ &= c_1(a_2b_3 - b_2a_3) + c_2(a_3b_1 - b_3a_1) + c_3(a_1b_2 - b_1a_2) \\ &= a_3(b_1c_2 - b_2c_1) + b_3(c_1a_2 - c_2a_1) + c_3(a_1b_2 - b_1a_2) \\ &= \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{vmatrix} \end{aligned}$$

であるから, これと行列式の積の性質により,

$$\begin{vmatrix} (\mathbf{a}, \mathbf{a}) & (\mathbf{a}, \mathbf{b}) & (\mathbf{a}, \mathbf{c}) \\ (\mathbf{b}, \mathbf{a}) & (\mathbf{b}, \mathbf{b}) & (\mathbf{b}, \mathbf{c}) \\ (\mathbf{c}, \mathbf{a}) & (\mathbf{c}, \mathbf{b}) & (\mathbf{c}, \mathbf{c}) \end{vmatrix} = \det(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c})^2$$

である.  $\square$ 

## p29-30:9

$\det(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$  は,  $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$  の張る平行六面体の体積に符号をつけたものに等しい. 与条件より,  $\det(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$  が最大になるのは,  $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$  の張る図形が立方体のときであり, そのとき

$$\det(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = 1$$

である. これからただちに  $\det(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$  の最小値が  $-1$  であることも従う.

以上により,  $\det(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$  の最大値は  $1$ , 最小値は  $-1$  である.



## p29-30 : 10

イ 証明. 単位ベクトル  $e_1, e_2, e_3$  を適当にとり,

$$\mathbf{a} = \alpha_1 \mathbf{e}_1, \quad \mathbf{b} = \beta_1 \mathbf{e}_1 + \beta_2 \mathbf{e}_2, \quad \mathbf{c} = \gamma_1 \mathbf{e}_1 + \gamma_2 \mathbf{e}_2 + \gamma_3 \mathbf{e}_3$$

とおく. このとき,

$$\begin{aligned} (\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \times \mathbf{c} &= \alpha_1 \beta_2 \mathbf{e}_3 \times (\gamma_1 \mathbf{e}_1 + \gamma_2 \mathbf{e}_2 + \gamma_3 \mathbf{e}_3) \\ &= \alpha_1 \beta_2 \gamma_1 \mathbf{e}_2 - \alpha_1 \beta_2 \gamma_2 \mathbf{e}_1 \\ &= -(\mathbf{b}, \mathbf{c}) \mathbf{a} + (\mathbf{a}, \mathbf{c}) \mathbf{b} \end{aligned}$$

であり, これが証明すべきことであつた<sup>†1</sup>.

ロ イ) の結果により,

$$\begin{aligned} (\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \times \mathbf{c} &= -(\mathbf{b}, \mathbf{c}) \mathbf{a} + (\mathbf{a}, \mathbf{c}) \mathbf{b}, \\ (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) \times \mathbf{a} &= -(\mathbf{c}, \mathbf{a}) \mathbf{b} + (\mathbf{b}, \mathbf{a}) \mathbf{c}, \\ (\mathbf{c} \times \mathbf{a}) \times \mathbf{b} &= -(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \mathbf{c} + (\mathbf{c}, \mathbf{b}) \mathbf{a}. \end{aligned}$$

であるから,

$$(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \times \mathbf{c} + (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) \times \mathbf{a} + (\mathbf{c} \times \mathbf{a}) \times \mathbf{b} = \mathbf{0}$$

となる. これが証明すべきことであつた.  $\square$

<sup>†1</sup> この等式をラグランジュの恒等式とよぶ.

## 第2章

## p34 : 問1

証明. 後半二つの主張は明らか. また, 二つ目の主張は一つ目の主張と同様にして示すことができるので, 一つ目のみ示すことにする.

$A = (a_{pq})$  を  $k \times l$  行列,  $B = (b_{qr})$ ,  $C = (c_{qr})$  を  $l \times m$  行列とする. 示したい式の両辺がともに定義され, ともに  $k \times m$  行列であることはよい. 行列  $B + C$  の  $(q, r)$  成分は  $b_{qr} + c_{qr}$  であるから, 左辺の  $(p, r)$  成分は,

$$\sum_{q=1}^l a_{pq} (b_{qr} + c_{qr}) = \sum_{q=1}^l a_{pq} b_{qr} + \sum_{q=1}^l a_{pq} c_{qr}$$

とかける. この等号の右辺は  $AB$  の  $(p, r)$  成分と  $AC$  の  $(p, r)$  成分の和である. これより, 主張が示された.  $\square$

## p40 : 問

イ

$$A_{11} = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & -2 \end{pmatrix}, \quad A_{22} = \begin{pmatrix} -2 & 3 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad B_{11} = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad B_{22} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 2 & -3 \end{pmatrix}$$

とおくと,

$$\begin{aligned} (\text{与式}) &= \begin{pmatrix} A_{11} & O \\ O & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{11} & O \\ O & B_{22} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} A_{11}B_{11} & O \\ O & A_{22}B_{22} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & -11 \\ 0 & 0 & 3 & -2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

である.

## p41 : 問 1

(1)  $X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} \\ x_{21} & x_{22} \end{pmatrix}$  とする. このとき,

$$AX = \begin{pmatrix} x_{11} + 2x_{21} & x_{12} + 2x_{22} \\ 2x_{11} + 4x_{21} & 2x_{12} + 4x_{22} \end{pmatrix}$$

となり, これが  $E_2$  と等しくなるためには

$$\begin{cases} x_{11} + 2x_{21} = 1 \\ x_{12} + 2x_{22} = 0 \\ 2x_{11} + 4x_{21} = 0 \\ 2x_{12} + 4x_{22} = 1 \end{cases}$$

となることが必要かつ十分であるが, これを満たす  $x_{11}, x_{12}, x_{21}, x_{22} \in \mathbb{C}$  は存在しない. よって前半の主張が示された.

後半について示す.  $Y = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{pmatrix}$  とする. このとき,

$$YA = \begin{pmatrix} y_{11} + 2y_{12} & 2y_{11} + 4y_{12} \\ y_{21} + 2y_{22} & 2y_{21} + 4y_{22} \end{pmatrix}$$

となり, これが  $E_2$  と等しくなるためには

$$\begin{cases} y_{11} + 2y_{12} = 1 \\ 2y_{11} + 4y_{12} = 0 \\ y_{21} + 2y_{22} = 0 \\ 2y_{21} + 4y_{22} = 1 \end{cases}$$

となることが必要かつ十分であるが, これを満たす  $y_{11}, y_{12}, y_{21}, y_{22} \in \mathbb{C}$  は存在しない. よって後半の主張も示された.  $\square$

(2)  $X, Y$  を (1) で定義したものとする. このとき,

$$AX = \begin{pmatrix} x_{11} + 2x_{21} & x_{12} + 2x_{22} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

となり, これが  $B$  と等しくならないことは明らか.

後半について,

$$YA = \begin{pmatrix} x_{11} & 2x_{11} \\ x_{21} & 2x_{21} \end{pmatrix}$$

となり, これが  $B$  と等しくなるためには  $x_{11} = 1, x_{21} = 2$  となることが必要かつ十分であるが,  $x_{12}, x_{22}$  については任意の複素数である. 以上の議論により, このような  $Y$  は無限に存在する.  $\square$

(3)  $A$  の第  $k$  列の成分が全て 0 であるとする. ただしここで  $1 \leq k \leq n, k \in \mathbb{N}$  であるとする.  $XA = E$  をみたす  $X$  が存在すると仮定する. このとき,  $X$  は明らかに  $n \times n$  行列であり, 積  $XA$  は定義される. いま  $X = (x_{jk}), A = (a_{kj}), 1 \leq j, k \leq n$  と表す. このとき,

$$(XA \text{ の } (j, j) \text{ 成分}) = \sum_{k=1}^n x_{jk} a_{kj} = 0$$

となり, これは  $XA = E$  に矛盾する. よってこのような  $X$  は存在しないことが示された.  $\square$

## p42 : 問 1

(1) まず,

$$\overline{A} \overline{A^{-1}} = \overline{AA^{-1}} = E, \quad \overline{A^{-1}} \overline{A} = \overline{A^{-1}A} = E$$

より,  $\overline{A}$  は正則で, 逆行列は  $\overline{A^{-1}}$  である. さらに,

$${}^t A {}^t A^{-1} = {}^t (A^{-1}A) = E, \quad {}^t A^{-1} {}^t A = {}^t (AA^{-1}) = E$$

であるから,  ${}^t A$  は正則であり, 逆行列は  ${}^t A^{-1}$  である.

(2)

$$A := \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}, \quad A' := \begin{pmatrix} x & y \\ z & w \end{pmatrix}$$

とする. このとき,

$$AA' = \begin{pmatrix} ax + bz & ay + bw \\ cx + dz & cy + dw \end{pmatrix}$$

である.  $AA' = E$  となる条件は,  $x, y, z, w$  についてのふたつの連立方程式

$$\begin{cases} ax + bz = 1 \\ cx + dz = 0 \end{cases}, \quad \begin{cases} ay + bw = 0 \\ cy + dw = 1 \end{cases}$$

が解を持つことで, その条件は  $ad - bc \neq 0$  である. そのときの解は,

$$(x, y, z, w) = \left( \frac{d}{ad - bc}, -\frac{b}{ad - bc}, -\frac{c}{ad - bc}, \frac{a}{ad - bc} \right)$$

である. これを用いて  $A'A$  を計算すると,  $A'A = E$  となり, たしかに  $A'$  は  $A$  の逆行列である.以上の議論により,  $ad - bc \neq 0$  となることが必要十分条件である.

(3) 計算する.

イ (2) の結果により,

$$\frac{1}{3 \cdot 3 - 2 \cdot 4} \begin{pmatrix} 3 & -2 \\ -4 & 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 & -2 \\ -4 & 3 \end{pmatrix}$$

が求める逆行列である.

□ まず,

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} \end{pmatrix}$$

としたときに

$$\begin{aligned} XA &= \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 0 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} x_{11} & 2x_{11} + x_{12} & -x_{11} + 3x_{12} + x_{13} \\ x_{21} & 2x_{21} + x_{22} & -x_{21} + 3x_{22} + x_{23} \\ x_{31} & 2x_{31} + x_{32} & -x_{31} + 3x_{32} + x_{33} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

であるから、これに関して

$$\begin{pmatrix} x_{11} & 2x_{11} + x_{12} & -x_{11} + 3x_{12} + x_{13} \\ x_{21} & 2x_{21} + x_{22} & -x_{21} + 3x_{22} + x_{23} \\ x_{31} & 2x_{31} + x_{32} & -x_{31} + 3x_{32} + x_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

となれば、行列  $X$  が求める逆行列である.

計算すると

$$X = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 7 \\ 0 & 1 & -3 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

であり、これが求める逆行列であった.

八 まず,

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} \end{pmatrix}$$

としたとき,

$$\begin{aligned} XA &= \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} x_{14} & x_{13} & x_{12} & x_{11} \\ x_{24} & x_{23} & x_{22} & x_{21} \\ x_{34} & x_{33} & x_{32} & x_{31} \\ x_{44} & x_{43} & x_{42} & x_{41} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

であるから、これに関して

$$\begin{pmatrix} x_{14} & x_{13} & x_{12} & x_{11} \\ x_{24} & x_{23} & x_{22} & x_{21} \\ x_{34} & x_{33} & x_{32} & x_{31} \\ x_{44} & x_{43} & x_{42} & x_{41} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

となれば、行列  $X$  が求める逆行列である.

計算すると,

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

であり、これが求める逆行列であった.

## p52 : 問

$$\begin{aligned}
& \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 6 & 3 & 0 & 1 & 0 \\ -2 & -5 & -2 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \\
& \xrightarrow{\text{第 1 行の } (-2) \text{ 倍, 第 1 行の 2 倍をそれぞれ第 2 行, 第 3 行に加える}} \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 0 & 1 \end{array} \right) \\
& \xrightarrow{\text{第 2 行と第 3 行を交換する}} \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & -2 & 1 & 0 \end{array} \right) \\
& \xrightarrow{\text{第 2 行の } (-3) \text{ 倍を第 1 行に加え, 第 3 行の } (-4) \text{ 倍を第 1 行に加える}} \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 3 & -4 & -3 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & -2 & 1 & 0 \end{array} \right) \\
& \xrightarrow{\text{第 3 行の 2 倍を第 2 行に加え, 第 3 行を } (-1) \text{ 倍する}} \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 3 & -4 & -3 \\ 0 & 1 & 0 & -2 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & -1 & 0 \end{array} \right)
\end{aligned}$$

よって, 求める逆行列は

$$\begin{pmatrix} 3 & -4 & -3 \\ -2 & 2 & 1 \\ 2 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

である.

## p62 : 問 1

**証明.** 定義に従って計算すると,

$$\begin{aligned}
\|x + y\|^2 + \|x - y\|^2 &= (x + y, x + y) + (x - y, x - y) \\
&= (x, x) + (x, y) + (y, x) + (y, y) + (x, x) - (x, y) - (y, x) + (y, y) \\
&= 2((x, x) + (y, y)) \\
&= 2(\|x\|^2 + \|y\|^2)
\end{aligned}$$

となり, これが証明すべきことであった.  $\square$

## p62 : 問 2

**証明.**

$$\|x + y\|^2 = (x, x) + (x, y) + (y, x) + (y, y)$$

である. ここで,  $x$  と  $y$  が直交することから,

$$(x, y) + (y, x) = (x, y) + \overline{(x, y)} = 0$$

であり, これを用いると

$$\|x + y\|^2 = (x, x) + (y, y) = \|x\|^2 + \|y\|^2$$

となる.  $x, y$  がともに実ベクトルのときは  $(x, y) = 0$  であるから確かに逆が成り立つが, たとえば

$x = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix}$ ,  $y = \begin{pmatrix} 2i \\ 0 \end{pmatrix}$  とすれば, 等式は成り立つが  $x$  と  $y$  は直交しないため, 逆は成り立たない.  $\square$

## 第2章・章末問題

p70-73 : 1-イ)

$$\begin{array}{l}
 \begin{pmatrix} 3 & 3 & -5 & -6 & | & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & -3 & -1 & | & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 3 & -5 & -3 & | & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 2 & 2 & | & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 \xrightarrow{\text{第1行と第2行を交換する}} \begin{pmatrix} 1 & 2 & -3 & -1 & | & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 3 & 3 & -5 & -6 & | & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 3 & -5 & -3 & | & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 2 & 2 & | & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 \xrightarrow{(1,1) \text{ をかなめとして左から第1列を掃き出す}} \begin{pmatrix} 1 & 2 & -3 & -1 & | & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & 4 & -3 & | & 1 & -3 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & -1 & | & 0 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & -1 & 1 & | & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 \xrightarrow{\text{第3行を } (-1) \text{ 倍して第2行と交換し, } (2,2) \text{ をかなめとして左から第2列を掃き出す}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & -3 & | & 0 & -3 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & | & 0 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & | & 1 & 3 & -3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & | & 0 & -3 & 2 & 1 \end{pmatrix} \\
 \xrightarrow{(3,3) \text{ をかなめとして左から第3列を掃き出す}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -3 & | & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & | & 1 & 5 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & | & 1 & 3 & -3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & | & -1 & -6 & 5 & 1 \end{pmatrix} \\
 \xrightarrow{\text{第4行を } (-1) \text{ 倍して, } (4,4) \text{ をかなめとして第4列を掃き出す}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & | & 4 & 18 & -16 & -3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & | & 0 & -1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & | & 1 & 3 & -3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & | & 1 & 6 & -5 & -1 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

よって, 求める逆行列は,

$$\begin{pmatrix} 4 & 18 & -16 & -3 \\ 0 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & -3 & 0 \\ 1 & 6 & -5 & -1 \end{pmatrix}$$

である.

## p70-73 : 1-口)

$$\begin{aligned}
 & \left( \begin{array}{cccc|cccc} 1 & 2 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & -5 & 1 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 2 & -2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \\
 \xrightarrow{(1,1) \text{ をかなめとして第 1 列を掃き出す}} & \left( \begin{array}{cccc|cccc} 1 & 2 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & -1 & 3 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \\
 \xrightarrow{(2,2) \text{ をかなめとして第 2 列を掃き出す}} & \left( \begin{array}{cccc|cccc} 1 & 0 & -2 & 1 & -5 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & -1 & 3 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -4 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & -6 & -2 & 0 & 1 \end{array} \right) \\
 \xrightarrow{(3,3) \text{ をかなめとして第 3 列を掃き出す}} & \left( \begin{array}{cccc|cccc} 1 & 0 & 0 & 1 & -13 & -4 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 7 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -4 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -10 & -3 & 1 & 1 \end{array} \right) \\
 \xrightarrow{(3,3) \text{ をかなめとして第 3 列を掃き出す}} & \left( \begin{array}{cccc|cccc} 1 & 0 & 0 & 0 & -3 & -1 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -3 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -4 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -10 & -3 & 1 & 1 \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

よって、求める逆行列は

$$\begin{pmatrix} -3 & -1 & 1 & -1 \\ -3 & -1 & 0 & 1 \\ -4 & -1 & 1 & 0 \\ -10 & -3 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

である。



## p70-73 : 3-イ)

$$\begin{array}{l}
 \begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 & | & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 & | & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 4 & 3 & | & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 \xrightarrow{\text{第 1 列を掃き出す}} \begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 & | & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & | & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -2 & -1 & | & -2 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 \xrightarrow{\text{第 2 列を掃き出す}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & | & -2 & -3 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & | & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & | & 0 & 2 & 1 \end{pmatrix} \\
 \xrightarrow{\text{第 3 列を掃き出す}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & | & -2 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & | & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & | & 0 & 2 & 1 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

である。ゆえに

$$P^{-1} = \begin{pmatrix} -2 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \\ 0 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

である。だから

$$P^{-1}AP = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

**p70-73 : 4**

与えられた行列を  $A$  とする.

$A$  の第 1 列に, 第 2 列から第  $n$  列までを足して変形すると,

$$\begin{pmatrix} (n-1)x+1 & x & x & \cdots & x \\ (n-1)x+1 & 1 & x & \cdots & x \\ (n-1)x+1 & x & 1 & \cdots & x \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (n-1)x+1 & x & x & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

となる.

ここで, この行列の第 2 行から第  $n$  行までの各行から第 1 行を引くと,

$$\begin{pmatrix} (n-1)x+1 & x & x & \cdots & x \\ 0 & 1-x & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1-x & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1-x \end{pmatrix}$$

となるので, 行列  $A$  の階数は,  $x=1$  のとき  $1$ ,  $x=-1/(n-1)$  のとき  $n-1$ , それ以外の場合は  $n$  である.

## p70-73 : 5

**証明.**  $A$  が正則でないと仮定すると,

$$Ax = 0$$

をみたす  $x \in \mathbb{C}^n$  が存在する.

また,  $x = {}^t(x_1, x_2, \dots, x_n)$  とし,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  の中で絶対値が最大のものを  $x_p$  とする.

$Ax$  の  $p$  行を考えると,

$$\begin{aligned} a_{p1}x_1 + a_{p2}x_2 + \cdots + a_{pp}x_p + \cdots + a_{pn}x_n &= 0 \\ \therefore x_p &= -(a_{p1}x_1 + a_{p2}x_2 + \cdots + a_{pn}x_n) = - \sum_{\substack{i \neq p \\ i \in \{1, 2, \dots, n\}}} a_{pi}x_i \end{aligned}$$

となる.

ここで,

$$\begin{aligned} |x_p| &\leq \sum_{\substack{i \neq p \\ i \in \{1, 2, \dots, n\}}} |a_{pi}| |x_i| \\ &< \sum_{\substack{i \neq p \\ i \in \{1, 2, \dots, n\}}} \frac{1}{n-1} |x_i| \\ &< \frac{n-1}{n-1} \cdot |x_p| = |x_p| \end{aligned}$$

と計算でき,  $|x_p| < |x_p|$  となり, これは矛盾である.

よって, 先の過程が誤りであり, このとき  $A$  は正則である.  $\square$

## p70-73 : 6

イ 計算すると,

$$AA^{k-1} = A^{k-1}A = E$$

なので,  $A$  は正則である.

□  $A$  が正則であるとする,  $A^{-1}$  が存在して,

$$A^{-1}A^2 = A^{-1}A$$

$$A = E$$

となるが, これは矛盾であるため,  $A$  は正則でない.

ハ  $A$  が正則であるとする,

$$E = (A^{-1}A)^k$$

$$= A^{-k}A^k$$

$$= O$$

となるが, これは矛盾であるため,  $A$  は正則でない.

二  $k$  を用いて,  $A^k$  を考えると

$$E = (E - A)(E + A + A^2 + \cdots + A^{k-1})$$

であり, 逆からかけても同じであるため,  $E - A$  は正則であり,

$$(E - A)^{-1} = E + A + A^2 + \cdots + A^{k-1}$$

である.

また,

$$E = (E + A)(E - A + A^2 - \cdots + A^{k-1})$$

であり, 逆からかけても同じなので,  $E + A$  は正則であり,

$$(E + A)^{-1} = E - A + A^2 - \cdots + A^{k-1}$$

である.

## p70-73 : 7

証明.  $X = (x_{ij})$ ,  $Y = (y_{ij})$  とする. ここで,  $XY$  の  $(i, i)$  成分は  $\sum_{j=1}^n x_{ij}y_{ji}$  であるから,

$$\operatorname{tr}(XY) = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^n x_{ij}y_{ji} \right)$$

となる.  $YX$  については, 同様の議論により,

$$\begin{aligned} \operatorname{tr}(YX) &= \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^n y_{ij}x_{ji} \right) \\ &= \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^n x_{ji}y_{ij} \right) \end{aligned}$$

である. ここで,  $i$  と  $j$  をおきかえれば,

$$\operatorname{tr}(YX) = \sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^n x_{ij}y_{ji} \right) \quad (1)$$

となる. これより,

$$\operatorname{tr}(XY) = \operatorname{tr}(YX) \quad (2)$$

を得て, これとトレースの線型性により  $\operatorname{tr}(XY - YX) = 0$  であるが,  $\operatorname{tr}(E_n) = n \neq 0$  であるため, これは矛盾である.

ゆえに,  $XY - YX = E_n$  となる  $n$  次行列  $X, Y$  は存在しないことが示された.  $\square$

**p70-73 : 8**

**証明.** 行列  $B$  の階数を  $r$  とすると,  $m$  次正則行列  $P$ ,  $n$  次正則行列  $Q$  によって,

$$PBQ = F_{m,n}(r)$$

と表せる.

これにより,

$$ABQ = AP^{-1}F_{m,n}(r)$$

とかける.  $A_{11}$  を  $r$  次の行列として,

$$AP^{-1} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}, \quad F_{m,n}(r) = \begin{pmatrix} E_r & O \\ O & O \end{pmatrix}$$

とかくと,

$$\begin{aligned} AP^{-1}F_{m,n}(r) &= AP^{-1}Q \\ &= \begin{pmatrix} A_{11} & O \\ A_{21} & O \end{pmatrix} \end{aligned}$$

とかけ,  $A_{11}$  の定義により,  $ABQ$  の階数は  $r$  以下となる. いま  $Q$  は基本行列の積なので,  $AB$  の階数も  $r$  以下である.

行列  $A$  についても同様に示せる.

以上の議論により, 行列  $AB$  の階数は行列  $A$ , 行列  $B$  の階数以下であることが証明された.

□

## p70-73 : 11

イ  ${}^tPP = E$  を加味して  $(P \pm E)$  の転置行列を考えると

$${}^t(P \pm E) = {}^tP \pm {}^tPP = {}^tP^t(E \pm P)$$

となり, これを用いると,

$$\begin{aligned} {}^tA &= {}^t\{(P - E)(P + E)^{-1}\} \\ &= {}^t(P + E)^{-1}{}^t(P - E) \\ &= (E + {}^tP)^{-1}{}^tP^tP(E - P) \\ &= \{{}^tP(P + E)\}^{-1}{}^tP(E - P) \\ &= (P + E)^{-1}P^{-1}{}^tP(E - P) \\ &= (P + E)^{-1}(E - P) \\ &= -(P + E)^{-1}\{(P + E) - 2E\} \\ &= -(P + E)^{-1}(P + E) + 2E(P + E)^{-1} \\ &= -(P + E)(P + E)^{-1} + 2E(P + E)^{-1} \\ &= (-(P + E) + 2E)(P + E)^{-1} \\ &= -(P - E)(P + E)^{-1} = -A \end{aligned}$$

となり, これが証明すべきことであつた.  $\square$

□ 計算すると,

$$\begin{aligned} E - A &= E - (P - E)(P + E)^{-1} \\ &= (P + E)(P + E)^{-1} - (P - E)(P + E)^{-1} \\ &= \{(P + E) - (P - E)\}(P + E)^{-1} \\ &= 2(P + E)^{-1} \end{aligned}$$

と変形でき, いま  $(P + E)$  が正則だから,  $2(P + E)^{-1}$  も正則であり,

$$(E - A)^{-1} = \frac{1}{2}(P + E)$$

である.  $\square$

ハ まず,

$$\begin{aligned} E + A &= (P + E)(P + E)^{-1} + (P - E)(P + E)^{-1} \\ &= \{(P + E) + (P - E)\}(P + E)^{-1} \\ &= 2P(P + E)^{-1} \end{aligned}$$

であるから, これを用いると

$$(E + A)(E - A)^{-1} = 2P(P + E)^{-1} \frac{1}{2}(P + E) = P$$

となり, これが証明すべきことであつた.  $\square$

## p70-73 : 14

**証明.** 二つに分けて証明する,

**イ)  $\Rightarrow$  ロ)**

$A$  が正則であると仮定すると,  $A^{-1}$  が存在し,

$$\boldsymbol{x} = A^{-1}(A\boldsymbol{x})$$

と変形できるから,  $A\boldsymbol{x}$  が非負ベクトルであれば,  $\boldsymbol{x}$  も非負ベクトルである.

**ロ)  $\Rightarrow$  イ)**

まず,  $A\boldsymbol{x} = \mathbf{0}$  である  $\boldsymbol{x}$  が存在すると仮定する. このとき,  $A(-\boldsymbol{x}) = \mathbf{0}$  であるから,  $A(-\boldsymbol{x})$  も非負ベクトルであり, 条件から  $\boldsymbol{x}$ ,  $-\boldsymbol{x}$  は非負ベクトルである. したがって  $\boldsymbol{x} = \mathbf{0}$  となり,  $A$  は正則である.

また, 非負ベクトル  $\boldsymbol{x}$  を任意にとると,

$$\boldsymbol{x} = A(A^{-1}\boldsymbol{x})$$

も非負ベクトルであり, 条件から  $A^{-1}\boldsymbol{x}$  も非負ベクトルである. ここで,  $A^{-1}$  が非負行列でないと仮定すると, ある単位ベクトル  $\boldsymbol{e}_j$  について,  $A^{-1}\boldsymbol{e}_j$  が非負ベクトルでないことになり,  $\boldsymbol{x}$  が非負ベクトルであることに反する. これより  $A^{-1}$  は非負行列である.

以上の議論により証明された.  $\square$



## p70-73 : 15

イ まず,  $A = (a_{ij})$ ,  $\mathbf{f} = {}^t(f_1, f_2, \dots, f_j) = {}^t(1, 1, \dots, 1)$  とおくと,  $A\mathbf{f}$  の第  $i$  行の成分は

$$\begin{aligned}\sum_{j=1}^n a_{ij} f_j &= \sum_{j=1}^n a_{ij} \\ &= 1\end{aligned}$$

であるから,  $\mathbf{f}$  の定義とあわせて,

$$A\mathbf{f} = \mathbf{f}$$

が成り立つ.  $\square$

ロ  $C = AB = (c_{ik})$  とすると,  $C$  の  $(i, k)$  成分は

$$c_{ik} = \sum_{j=1}^n a_{ij} b_{jk}$$

である. これにより,

$$\begin{aligned}\sum_{k=1}^n c_{ik} &= \sum_{k=1}^n \left( \sum_{j=1}^n a_{ij} b_{jk} \right) \\ &= \sum_{j=1}^n a_{ij} \sum_{k=1}^n b_{jk} \\ &= \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot 1 \\ &= 1\end{aligned}$$

であるから,  $C$  すなわち  $AB$  は確率行列である.  $\square$

ハ  $A\mathbf{x} = \alpha\mathbf{x}$  において,  $\mathbf{x}$  の成分で絶対値が最大のものを  $x_p$  とする.

このとき,  $A\mathbf{x} = \alpha\mathbf{x}$  の第  $p$  行成分の絶対値を考えると,

$$\begin{aligned}|\alpha||x_p| &\leq \sum_{j=1}^n a_{pj}|x_j| \\ &\leq \sum_{j=1}^n a_{pj}|x_p| \\ &= |x_p|\end{aligned}$$

であるから,

$$|\alpha||x_p| \leq |x_p|$$

を得るので,

$$|\alpha| \leq 1$$

となり, これが証明すべきことであつた.  $\square$

### 第3章

#### p77 : 問2

**証明.**  $S_n$  の偶置換全体の集合を  $A_n$ , 偶置換全体の集合を  $B_n$  とする. 置換は必ず奇置換か偶置換のいずれかであるから,

$$\begin{aligned} S_n &= A_n \cup B_n, \\ A_n \cap B_n &= \emptyset \end{aligned}$$

となる.

ここで,

$$\tau = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix}$$

とすると,  $\tau$  は奇置換であり,  $\sigma \in A_n$  のとき,  $\tau\sigma \in B_n$  である. 同様に,  $\rho \in B_n$  のとき,  $\tau^{-1}\rho = \tau\rho \in A_n$  である. これらにより, 全単射

$$A_n \ni \sigma \mapsto \tau\sigma \in B_n$$

が存在し, 偶置換と奇置換は同数あり, その個数は  $n!/2$  である.  $\square$

#### p77 : 問3

$m \in \mathbb{N}$  とする.

(I)  $n = 2m$  とかけるとき, この置換を互換の積で表すと,

$$(1, 2m)(2, 2m-1) \cdots (m, m+1)$$

となるため, 置換の符号は  $(-1)^m$ , すなわち

$$(-1)^{\frac{n}{2}}$$

となる.

(II)  $n = 2m-1$  とかけるとき, この置換を互換の積で表すと,

$$(1, 2m-1)(2, 2m-2) \cdots (m-1, m+1)$$

となるため, 置換の符号は  $(-1)^{m-1}$ , すなわち

$$(-1)^{\frac{n-1}{2}}$$

となる.

## p79 : 問

イ) まず

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \cdots & n \\ n & n-1 & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

とすると,  $m \in \mathbb{N}$  として,

$$\operatorname{sgn} \sigma = \begin{cases} (-1)^{\frac{n}{2}} & (n = 2m \text{ のとき}) \\ (-1)^{\frac{n-1}{2}} & (n = 2m-1 \text{ のとき}) \end{cases}$$

となる. また,

$$(\text{与式}) = \sum_{\sigma \in S_n} \operatorname{sgn} \sigma \cdot a_1 a_2 \cdots a_n$$

だから,

$$(\text{与式}) = \begin{cases} (-1)^{\frac{n}{2}} a_1 a_2 \cdots a_n & (n = 2m \text{ のとき}) \\ (-1)^{\frac{n-1}{2}} a_1 a_2 \cdots a_n & (n = 2m-1 \text{ のとき}) \end{cases}$$

である.

ロ) 計算すると,

$$\begin{aligned} (\text{与式}) &= a^3 + b^3 + c^3 - abc - bca - cab \\ &= a^3 + b^3 + c^3 - 3abc \end{aligned}$$

となる.

## p83 : 問

**証明.**  $(n, n)$  行列  $A, X$  を

$$A = (\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n), \quad X = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n)$$

とする. このとき,  $AX$  は定義され,

$$AX = (A\mathbf{x}_1, A\mathbf{x}_2, \dots, A\mathbf{x}_n)$$

と表せる. ここで,  $A\mathbf{x}_j$  を単位ベクトルの線型結合で表すと,

$$\begin{aligned} A\mathbf{x}_j &= A^t(x_{1j}\mathbf{e}_1, x_{2j}\mathbf{e}_2, \dots, x_{nj}\mathbf{e}_n) \\ &= A(x_{1j}\mathbf{e}_1 + x_{2j}\mathbf{e}_2 + \dots + x_{nj}\mathbf{e}_n) \\ &= x_{1j}\mathbf{a}_1 + x_{2j}\mathbf{a}_2 + x_{nj}\mathbf{a}_n \\ &= \sum_{i=1}^n x_{ij}\mathbf{a}_i \end{aligned}$$

となる. これにより,  $|AX|$  は, 多重線型性を用いて,

$$\begin{aligned} |AX| &= \left| \sum_{i_1=1}^n x_{i_1 1} \mathbf{a}_{i_1}, \sum_{i_2=1}^n x_{i_2 2} \mathbf{a}_{i_2}, \dots, \sum_{i_n=1}^n x_{i_n n} \mathbf{a}_{i_n} \right| \\ &= \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^n \dots \sum_{i_n=1}^n x_{i_1 1} x_{i_2 2} \dots x_{i_n n} |\mathbf{a}_{i_1}, \mathbf{a}_{i_2}, \dots, \mathbf{a}_{i_n}| \end{aligned}$$

と変形できる. ここで,

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ i_1 & i_2 & \dots & i_n \end{pmatrix}$$

とおくと,

$$|\mathbf{a}_{\sigma(1)}, \mathbf{a}_{\sigma(2)}, \dots, \mathbf{a}_{\sigma(n)}| = \operatorname{sgn} \sigma |A|$$

$$\begin{aligned} |AX| &= \sum_{\sigma \in S_n} x_{\sigma(1)1} x_{\sigma(2)2} \dots x_{\sigma(n)n} \cdot \operatorname{sgn} \sigma |A| \\ &= \sum_{\sigma \in S_n} \operatorname{sgn} \sigma \cdot x_{\sigma(1)1} x_{\sigma(2)2} \dots x_{\sigma(n)n} |A| \\ &= |{}^t X| |A| \\ &= |A| |X| \end{aligned}$$

を得る. これが証明すべきことであつた.  $\square$

## 第3章・章末問題

p90-91 : 3

イ 与えられた行列式に対して多重線型性を用いると,

$$\begin{aligned}(\text{与式}) &= \begin{vmatrix} A+B & A+B \\ B & A \end{vmatrix} \\ &= \begin{vmatrix} A+B & O \\ B & A-B \end{vmatrix} \\ &= |A+B| \cdot |A-B|\end{aligned}$$

となり, これが証明すべきことであつた.  $\square$

ロ 与えられた行列式に対して多重線型性を用いると,

$$\begin{aligned}(\text{与式}) &= \begin{vmatrix} A+iB & iA-B \\ B & A \end{vmatrix} \\ &= \begin{vmatrix} A+iB & O \\ B & A-iB \end{vmatrix} \\ &= \det(A+iB) \cdot \det(A-iB)\end{aligned}$$

となり, いま  $A, B$  は実行列なので,

$$\begin{aligned}\det(A+iB) \cdot \det(A-iB) &= \det(A+iB) \cdot \overline{\det(A+iB)} \\ &= |\det(A+iB)|^2\end{aligned}$$

である.

## p90-91 : 4

**証明.**  $\alpha^n = 1$  をみたす  $\alpha \in \mathbb{C}$  をひとつ固定する. さて, 与えられた行列式の第  $j$  行を  $\alpha^{j-1}$  倍して第 1 列に足す操作を行うと, この行列式は

$$\begin{vmatrix} \sum_{i=0}^{n-1} \alpha^i x_i & x_1 & x_2 & \cdots & x_{n-1} \\ \alpha \sum_{i=0}^{n-1} \alpha^i x_i & x_0 & x_1 & \cdots & x_{n-2} \\ \alpha^2 \sum_{i=0}^{n-1} \alpha^i x_i & x_{n-1} & x_0 & \cdots & x_{n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha^{n-1} \sum_{i=0}^{n-1} \alpha^i x_i & x_{n-2} & x_{n-3} & \cdots & x_0 \end{vmatrix}$$

と変形できる. これにより, この行列式は

$$\sum_{i=0}^{n-1} \alpha^i x_i = x_0 + \alpha x_1 + \alpha^2 x_2 + \cdots + \alpha^{n-1} x_{n-1}$$

を因数にもつ. すべての  $\alpha$  に関してこのことがいえるから, 因数定理により, この行列式は

$$\prod_{\alpha^n=1} (x_0 + \alpha x_1 + \alpha^2 x_2 + \cdots + \alpha^{n-1} x_{n-1})$$

を因数にもつ. これは  $n$  次式であり, なおかつ  $x_0$  の係数は 1 であることより, 結果として

$$\begin{vmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & \cdots & x_{n-1} \\ x_{n-1} & x_0 & x_1 & \cdots & x_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_0 \end{vmatrix} = \prod_{\alpha^n=1} (x_0 + \alpha x_1 + \alpha^2 x_2 + \cdots + \alpha^{n-1} x_{n-1})$$

である. これが証明すべきことであった.  $\square$

## p90-91 : 5

前問において,  $n = 4$ ,  $x_1 = i$ ,  $x_2 = 1$ ,  $x_3 = -i$  とした場合を考えればよいので,  $\alpha = \pm 1, \pm i$  により,

$$\begin{aligned} (\text{与式}) &= \prod_{\alpha^4=1} (x + \alpha i + \alpha^2 - \alpha^3 i) \\ &= (x + i + 1 - i)(x - i + 1 + i)(x - 1 - 1 - 1)(x + 1 - 1 + 1) \\ &= (x + 1)^3(x - 3) \end{aligned}$$

となる.

## 第4章

### p93 : 問

**証明.**  $|A \cup B|$  について,  $|A \cap B|$  は  $A$  と  $B$  の共通部分の元の個数を考えているので,

$$|A \cup B| = |A| + |B| - |A \cap B|$$

$$\therefore |A| + |B| = |A \cup B| + |A \cap B|$$

である. これが証明すべきことであった.  $\square$

## p94 : 問

3つのことを証明する.

**反射律について** 明らかに,  $A$  に基本変形を施して  $A$  自身にすることができる.

**対称律について**  $P$  を  $(m, m)$  型の基本行列,  $Q$  を  $(n, n)$  型の基本行列として,

$$A = PBQ$$

とかくと,  $P, Q$  は正則なので,  $P^{-1}, Q^{-1}$  が存在し,

$$B = P^{-1}AQ^{-1}$$

とかける. よって, 対称律が成り立つことが示された.

**推移律について**  $P_1, P_2$  を  $(m, m)$  型の基本行列,  $Q_1, Q_2$  を  $(n, n)$  型の基本行列として,

$$A = P_1BQ_1, \quad B = P_2CQ_2$$

とかく. このとき,  $P_1, Q_1$  は正則だから,  $P_1^{-1}, Q_1^{-1}$  が存在し,

$$B = P_1^{-1}AQ_1^{-1}$$

となる. これにより,

$$P_1^{-1}AQ_1^{-1} = P_2CQ_2$$

となり, 同様の議論によって

$$A = P_1P_2CQ_2Q_1$$

となり, 推移律も成り立つことが示された.  $\square$

さて, 行列  $A$  に基本変形を施すと,  $A$  の階数を  $r$  として  $F_{m,n}(r)$  が得られることと,  $r$  は 0 から  $\min\{m, n\}$  までの整数値を取り得るので, 商集合の元の個数は

$$\min\{m, n\} + 1$$

となる.



## p107-108 : 問 1

イ この集合を  $W_1$  とおくと,  $W_1$  は  $\mathbb{C}^n$  の部分空間をなす.

$$\boldsymbol{x} = \mathbf{0} \in W_1$$

であるから,  $W_1 \neq \emptyset$  である.

また,

$$\boldsymbol{v} = {}^t(v_1, v_2, \dots, v_n), \quad \boldsymbol{w} = {}^t(w_1, w_2, \dots, w_n)$$

とおくと,

$$\boldsymbol{v} + \boldsymbol{w} = {}^t(v_1 + w_1, v_2 + w_2, \dots, v_n + w_n)$$

となり, これに加えて

$$(v_1 + w_1) + (v_2 + w_2) + \dots + (v_n + w_n) = (v_1 + v_2 + \dots + v_n) + (w_1 + w_2 + \dots + w_n) = 0 + 0 = 0$$

となるから,  $\boldsymbol{v} + \boldsymbol{w} \in W_1$  である. さらに,  $a \in \mathbb{C}$  をとると,

$$a\boldsymbol{v} = {}^t(av_1, av_2, \dots, av_n)$$

であり,

$$av_1 + av_2 + \dots + av_n = a(v_1 + v_2 + \dots + v_n) = a \cdot 0 = 0$$

であるから, このとき  $a\boldsymbol{v} \in W_1$  である.

以上により,  $W_1$  は  $\mathbb{C}^n$  の線型部分空間をなす.  $\square$

□ この集合を  $W_2$  とおくと,  $W_2$  は  $\mathbb{C}^n$  の部分空間をなす.

$$\boldsymbol{x} = \mathbf{0} \in W_2$$

であるから,  $W_2 \neq \emptyset$  である.

また,

$$\boldsymbol{v} = {}^t(v_{p+1}, v_{p+2}, \dots, v_n), \quad \boldsymbol{w} = {}^t(w_{p+1}, w_{p+2}, \dots, w_n)$$

とおくと,

$$\boldsymbol{v} + \boldsymbol{w} = {}^t(v_{p+1} + w_{p+1}, v_{p+2} + w_{p+2}, \dots, v_n + w_n)$$

であり,

$$\begin{aligned} & (v_{p+1} + w_{p+1}) + (v_{p+2} + w_{p+2}) + \dots + (v_n + w_n) \\ &= (v_{p+1} + v_{p+2} + \dots + v_n) + (w_{p+1} + w_{p+2} + \dots + w_n) \\ &= 0 + 0 \\ &= 0 \end{aligned}$$

となるため, このとき  $\boldsymbol{v} + \boldsymbol{w} \in W_2$  である.

また,

$$a\boldsymbol{v} = {}^t(av_{p+1}, av_{p+2}, \dots, av_n)$$

であり,

$$av_{p+1} + av_{p+2} + \cdots + av_n = a(v_{p+1} + v_{p+2} + \cdots + v_n) = a \cdot 0 = 0$$

であるため, このとき  $av \in W_2$  である.

以上により,  $W_2$  は  $\mathbb{C}^n$  の線型部分空間をなす.  $\square$

八 これは部分空間をなさない.

$$v = {}^t(1, 0, 0, \dots, 0), \quad w = {}^t(0, 1, 0, \dots, 0)$$

とすると

$$v + w = {}^t(1, 1, 0, \dots, 0)$$

となり, 与えられた条件式に当てはめると

$$1^2 + 1^2 + 0^2 + \cdots + 0^2 = 2 \neq 1$$

であるから, この集合は  $\mathbb{C}^n$  の部分空間でない.

二 この集合を  $W_3$  とおくと,  $W_3$  は  $\mathbb{C}^n$  の部分空間をなす.

$x = 0$  とすると,

$$(a, x) = 0$$

であるため,  $W_3 \neq \emptyset$  である.

さて,  $v, w$  が条件を満たすとする, 内積の定義から

$$(a, v + w) = (a, v) + (a, w) = 0$$

である. また,  $c \in \mathbb{C}$  とすると,

$$(a, cv) = c(a, v) = 0$$

である.

以上により,  $W_3$  は  $\mathbb{C}^n$  の線型部分空間をなす.  $\square$

## p107-108 : 問 2

イ この集合を  $W_1$  とおくと,  $W_1$  は  $\mathbb{K}^n$  の線型部分空間とならない.

たとえば

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

とおくと,  $A, B \in W_1$  であるが,

$$A + B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

となり,  $A + B$  は正則行列である. よって  $W_1$  は  $\mathbb{K}^n$  の線型部分空間とならない.  $\square$

ロ この集合を  $W_2$  とおくと,  $W_2$  は  $\mathbb{K}^n$  の線型部分空間となる.

$X = O$  としたとき,  $AO = OB$  が成り立つのは明らかなので,  $W_2 \neq \emptyset$  である.

また,  $X, Y \in W_2$  とすると,

$$A(X + Y) = (X + Y)B$$

が成立し、さらに  $a \in \mathbb{K}$  とすると、

$$A(aX) = (aX)B$$

が成立する.

以上により、 $W_2$  は  $\mathbb{K}^n$  の線型部分空間である.  $\square$

八 この集合を  $W_3$  とおくと、これは  $\mathbb{K}^n$  の線型部分空間とならない.

たとえば

$$A = \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

とおくと、

$$A^2 = O, \quad B^2 = O$$

となり、 $A, B \in W_3$  であるが、

$$A + B = \begin{pmatrix} -1 & 2 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$$

となり、これは冪零行列とならない. よって  $W_3$  は  $\mathbb{K}^n$  の線型部分空間とならない.  $\square$

二 この集合を  $W_4$  とおくと、これは  $\mathbb{K}^n$  の線型部分空間とならない.

たとえば、

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

とおき、 $1/2 \in \mathbb{K}$  をとると、

$$\frac{1}{2}A = \begin{pmatrix} 1/2 & 0 \\ 0 & 1/2 \end{pmatrix}$$

となり、これは  $W_4$  の元ではない. よって  $W_4$  は  $\mathbb{K}^n$  の線型部分空間とならない.

## 附録 III

## p249 : 問

イ 証明. 体  $K$  の単位元について,  $0 = 0 + 0$  であるから,

$$\begin{aligned} a0 &= a(0 + 0) = a0 + a0 \\ \therefore a0 &= a0 + a0 \end{aligned}$$

$K$  は加法について可換群であるから,  $a0$  の逆元  $-a0$  が  $K$  に存在する. これを用いると,

$$\begin{aligned} a0 + (-a0) &= a0 + a0 + (-a0) \\ \therefore 0 &= a0 + a0 + (-a0) \end{aligned}$$

ここで,

$$\begin{aligned} a0 + a0 + (-a0) &= a0 + \{a0 + (-a0)\} \\ &= a0 + 0 \\ &= a0 \end{aligned}$$

となるから,  $0 = a0$  である.  $0 = 0a$  についても同様.  $\square$

ロ 証明.  $a \neq 0$  とする. このとき,  $a$  の逆元  $a^{-1} \in K$  が存在し,  $ab = 0$  の両辺に  $a^{-1}$  をかけると,

$$\begin{aligned} a^{-1}(ab) &= a^{-1}0 \\ (a^{-1}a)b &= 0 \\ 1b &= 0 \\ \therefore b &= 0 \end{aligned}$$

である. これと  $b \neq 0$  を仮定したときの同様の考察により,  $ab = 0$  のとき,  $a = 0$  または  $b = 0$  である.  $\square$

## 参考文献

- [1] 齋藤正彦『線型代数入門』, 東京大学出版会, 1966