

齋藤正彦・線型代数入門解答集

数学書解答集作成班

2024 年 4 月 30 日

目次

目次

3

はじめに

3

概要 3

Special Thanks 3

第 1 章

4

p5 : 問 1 4

p5 : 問 2 4

p7 : 問-(上) 5

p7 : 問-(下) 5

p8 : 問 1 6

p8 : 問 2 6

p10 : 問 1 7

p10 : 問 2 7

p11 : 問 1 8

p12 : 問 2 8

p12 : 問 3 8

p13 : 問 1 9

p13 : 問 2 9

p18 : 問 10

p19 : 問 1 11

p19 : 問 2 11

p19 : 問 1-(下) 11

p19 : 問 2-(下) 12

p22 : 問 1 13

第 1 章・章末問題

13

p29-30 : 1 13

p29-30 : 2 15

p29-30 : 3 15

p29-30 : 4 16

p29-30 : 5 16

p29-30 : 7-(1) 17

p29-30 : 8 18

p29-30 : 9 18

p29-30 : 10 19

第 2 章

19

p34 : 問 1 19

p40 : 問 20

p41 : 問 1 21

p42 : 問 1 22

p52 : 問 24

p58 : 問 25

p62 : 問 1 26

p62 : 問 2 26

p62-63 : 問 3 26

p65 : 問 1 27

p65 : 問 2 28

第 2 章・章末問題

29

p70-73 : 1-イ) 29

p70-73 : 1-ロ) 30

p70-73 : 2-イ) 31

p70-73 : 2-ロ) 31

p70-73 : 2-ハ) 32

p70-73 : 2-ニ) 32

p70-73 : 3-イ) 33

p70-73 : 3-ロ) 33

p70-73 : 4 34

p70-73 : 5 35

p70-73 : 6 36

p70-73 : 7 37

p70-73 : 8 38

p70-73 : 9 39

p70-73 : 10-イ) 40

p70-73 : 10-ロ) 41

p70-73 : 10-ハ) 41

p70-73 : 11 42

p70-73 : 12 43

p70-73 : 13-イ) 44

p70-73 : 13-ロ) 44

p70-73 : 13-ハ) 45

p70-73 : 13-ニ) 46

p70-73 : 14 47

p70-73 : 15 48

第 3 章

49

p77 : 問 2 49

p77 : 問 3 49

p79 : 問 50

p83 : 問 51

p83 : 問-(イ) 52

p83 : 問-(ロ) 52

第 3 章・章末問題

53

p90-91 : 1-イ) 53

p90-91 : 1-ロ) 54

p90-91 : 1-ニ) 55

p90-91 : 2-イ) 56

p90-91 : 2-ロ) 56

p90-91 : 3 57

p90-91 : 4 58

p90-91 : 5 58

p90-91 : 6 59

p90-91 : 8 60

p90-91 : 9 61

p90-91 : 10 62

p90-91 : 11 63

第 4 章

64

p93 : 問 64

p94 : 問 65

p106-107 : 問 1	66
p106-107 : 問 2	67
p107-108 : 問 1	68
p107-108 : 問 2	69
p122 : 問	71
第 4 章・章末問題	72
p127-130 : 1	72
p127-130 : 2	73
附録 III	74
p249 : 問	74

はじめに

概要

この文書は、なまちゃんが運営する「数学書解答集作成班」が制作した、齋藤正彦著『線型代数入門』(東京大学出版会)の解答集である。

未完ではあるものの、編集の際の利便性を考慮して、オープンソースでの公開となった。また、未完であるので、数学的な誤りや誤植、改善案の提案などがあれば Issue に書き込んだり、Pull Request を送っていただきたい。

Special Thanks

掲載許可を得た方のみ^{†1}を敬称略で掲載する。

- ねたんほ (解答の提供)
- まっちゃん (解答の提供)
- やたろう (解答の提供, Git 管理)
- 不自然対数 (L^AT_EX 関連)

その他, 多くの方々.

^{†1} 掲載されていないという方は「ニックネーム」を記入のもと、なまちゃんへ連絡していただきたい。

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

計算する.

イ 与えられた直線を l とする. l の方程式に $x = -1$ を代入すると, $y = 2$ となるため, l は点 $(-1, 2)$ を通る. また, l は点 $(2, 0)$ を通るため, l の方向ベクトルのひとつは,

$$\begin{pmatrix} 2 - (-1) \\ 0 - 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \end{pmatrix}$$

である. よって, l のベクトル表示のひとつは, $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \end{pmatrix} \quad (-\infty < t < \infty)$ 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, この直線の方法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,

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

と改めておくと,

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

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

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

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.

$$\overrightarrow{\text{OP}}_1 = \boldsymbol{x}_1, \quad \overrightarrow{\text{OP}}_2 = \boldsymbol{x}_2, \quad \overrightarrow{\text{OP}}_3 = \boldsymbol{x}_3$$

とする. このとき, 三角形 $\text{P}_1\text{P}_2\text{P}_3$ 上の任意の点の位置ベクトルを \boldsymbol{x} , s, t を $0 \leq s, t \leq 1$ を満たす実数とすると,

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

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

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

となる. これが証明すべきことであつた. \square

p13 : 問 1

$(S_1), (S_2)$ 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 θ ($0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$) 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.

p13 : 問 2

証明. 平面 π_1, π_2 を考え, π_1, π_2 の法線ベクトルをそれぞれ $\boldsymbol{n}_1, \boldsymbol{n}_2$ とおく.

\boldsymbol{n}_1 と \boldsymbol{n}_2 が平行なとき π_1 に垂直な平面は π_2 にも垂直であり, このような平面を π_3 とすると, π_3 は $\boldsymbol{n}_1, \boldsymbol{n}_2$ と平行である. よって π_3 と π_1, π_2 はそれぞれ並行であり, このような平面は確かに存在する.

\boldsymbol{n}_1 と \boldsymbol{n}_2 が平行でないとき $\boldsymbol{n}_1, \boldsymbol{n}_2 \neq \mathbf{0}$ は明らかなので, $\boldsymbol{n}_3 := \boldsymbol{n}_1 \times \boldsymbol{n}_2$ とすると, $\boldsymbol{n}_3 \neq \mathbf{0}$ である. よって, \boldsymbol{n}_3 は π_1, π_2 に垂直である. このとき \boldsymbol{n}_3 を法線ベクトルとする平面を取ればよい.

以上の考察により証明された. \square

p18 : 問

証明. A, B, C が 2×2 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, 2×2 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 α 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 $ax + by + c = 0$ (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 θ 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_θ 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 θ 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,

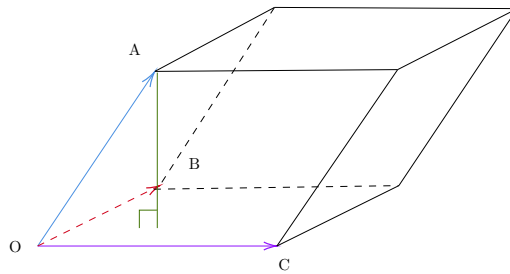
$$\|b \times c\|$$

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^{†1}.

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

^{†1} 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

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

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

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.

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

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

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

$$(2) \quad X, Y \text{ を (1) で定義したものとする. このとき,}$$

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

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

$$(3) \quad A \text{ の第 } k \text{ 列の成分が全て } 0 \text{ であるとする. ただしここで } 1 \leq k \leq n, k \in \mathbb{N} \text{ であるとする.}$$

$XA = E$ 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,

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

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

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

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.

p58 : 問

イ 与えられた連立方程式について，拡大係数行列を考えて基本変形を施すと，

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & -4/3 \\ 0 & 1 & 1 & 8/3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

となる．つまり，解は存在し，ひとつの任意定数を含む．任意定数を $x_3 = \alpha$ とすると，

$$x_1 = -\frac{4}{3} - \alpha, \quad x_2 = \frac{8}{3} - \alpha, \quad x_3 = \alpha$$

とかける．ベクトルの形で表すと，

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4/3 \\ 8/3 \\ 0 \end{pmatrix} + \alpha \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

である．

ロ 与えられた連立方程式について，拡大係数行列を考えて基本変形を施すと，

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

となるが， $0 = -1$ とはならないため，この連立方程式は解を持たない．

ハ 与えられた連立方程式について，拡大係数行列を考えて基本変形を施すと，

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 2 & 6 & 6 \\ 0 & 1 & 0 & -2 & -11 & -9 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 19 & 14 \end{pmatrix}$$

となる．ただしここで第3列と第4列を入れ替えた．

つまり，解は存在し，ふたつの任意定数を含む．任意定数を $x_3 = \alpha$, $x_5 = \beta$ とすると，この連立方程式の解は

$$x_1 = 6 - 2\alpha - 2\beta, \quad x_2 = -9 + 2\alpha + 11\beta, \quad x_3 = \alpha, \quad x_4 = 14 - 19\beta, \quad x_5 = \beta$$

とかける．ベクトルの形で表すと，

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 \\ -9 \\ 0 \\ 14 \\ 0 \end{pmatrix} + \alpha \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} -2 \\ 11 \\ 0 \\ -19 \\ 1 \end{pmatrix}$$

である．

p62-63 : 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つた. \square

p62-63 : 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

p62-63 : 問 3

証明. $x, y \in \mathbb{R}^n$ のとき,

$$\begin{aligned}
 \|x+y\|^2 - \|x-y\|^2 &= (x+y, x+y) - (x-y, x-y) \\
 &= \|x\|^2 + (x, y) + (y, x) + \|y\|^2 - (\|x\|^2 - (x, y) - (y, x) + \|y\|^2) \\
 &= \|x\|^2 + 2(x, y) + \|y\|^2 - (\|x\|^2 - 2(x, y) + \|y\|^2) \\
 &= 4(x, y)
 \end{aligned}$$

であるから, この両辺を 4 で割るとただちに主張が従う.

また, $x, y \in \mathbb{C}$ のときにはこの等式が成り立たないことがある. $x = {}^t(2i, 0)$, $y = {}^t(2, 0)$ とすると,

$$\begin{aligned}
 \frac{\|x+y\|^2 - \|x-y\|^2}{4} &= \frac{4-4}{4} \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

であるが,

$$\begin{aligned}
 (x, y) &= (2, 0) \begin{pmatrix} -2i \\ 0 \end{pmatrix} \\
 &= -4i
 \end{aligned}$$

となり, 確かにこれが反例になっている. \square

p65: 問 1

$$A := \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$$

とおく. このとき,

$$\begin{aligned} A^t A &= \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & c \\ b & d \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} a^2 + b^2 & ac + bd \\ ac + bd & c^2 + d^2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

となり, これが E に等しいので,

$$\begin{cases} a^2 + b^2 = 1, \\ c^2 + d^2 = 1, \\ ac + bd = 0 \end{cases}$$

となる. このことから $0 \leq \theta < 2\pi$, $0 \leq \phi < 2\pi$ として

$$\begin{aligned} a &= \cos \theta, & b &= \sin \theta, \\ c &= \cos \phi, & d &= \sin \phi \end{aligned}$$

とおくと,

$$\begin{aligned} ac + bd &= \cos \theta \cos \phi + \sin \theta \sin \phi \\ &= \cos(\theta - \phi) \end{aligned}$$

となり, これが 0 に等しいので,

$$\begin{aligned} \theta - \phi &= \pi/2, 3\pi/2, \\ \therefore \phi &= \theta - \pi/2, \theta - 3\pi/2. \end{aligned}$$

これより, 任意の二次直交行列は $0 \leq \theta < 2\pi$, $0 \leq \phi < 2\pi$ として

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

のいずれかで表される.

p65: 問 2

証明.

$$(A^*A)^* = A^*A^{**} = A^*A, \quad (AA^*)^* = A^{**}A^* = AA^*$$

であるから, A^*A , AA^* はエルミート行列である.

また, 任意の $n \times 1$ ベクトル \boldsymbol{x} に対して,

$$\begin{aligned} (\boldsymbol{x}, A^*A\boldsymbol{x}) &= (A^{**}\boldsymbol{x}, A\boldsymbol{x}) \\ &= (A\boldsymbol{x}, A\boldsymbol{x}) \\ &= \|A\boldsymbol{x}\|^2 \geq 0 \end{aligned}$$

であり, また, \boldsymbol{x} として第 i 成分のみ 1 でほかの成分は 0 のベクトル \boldsymbol{e}_i をとると,

$$(\boldsymbol{e}_i, A^*A\boldsymbol{e}_i) = A^*A \text{ の } (i, i) \text{ 成分}$$

となる. 先の不等式よりこれは 0 または正なので, A^*A の対角成分は 0 または正である. 同様にして AA^* の対角成分も 0 または正である.

以上のことが証明すべきことであった. \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 : 2-イ)

与えられた連立方程式について、拡大係数行列を考えて基本変形を施すと、

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -3/5 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1/5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

となる。ただしここで第2列と第5列を入れ替えた。

つまり、解は存在し、2つの任意定数を含む。任意定数を $x_4 = \alpha$, $x_2 = \beta$ とすると、

$$x_1 = -2\alpha - 2\beta, \quad x_2 = \beta, \quad x_3 = \alpha + \frac{1}{5}, \quad x_4 = \alpha, \quad x_5 = -\frac{3}{5}$$

となる。ベクトルの形で表すと

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/5 \\ 0 \\ -3/5 \end{pmatrix} + \alpha \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

となる。

p70-73 : 2-ロ)

与えられた連立方程式について、拡大係数行列を考えて基本変形を施すと、

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

となる。

つまり、解は存在し、一つの任意定数を含む。任意定数を $x_4 = \alpha$ とすると、

$$x_1 = -1 - 2\alpha, \quad x_2 = 1 + \alpha, \quad x_3 = -1 + \alpha, \quad x_4 = \alpha$$

となる。ベクトルの形で表すと

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} + \alpha \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

となる。

p70-73 : 2-八)

与えられた連立方程式について、拡大係数行列を考えて基本変形を施すと、

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

となる.

つまり、解は存在し、

$$x_1 = 3, \quad x_2 = 4, \quad x_3 = 1, \quad x_4 = 1$$

となる. ベクトルの形で表すと

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

となる.

p70-73 : 2-二)

与えられた連立方程式について、拡大係数行列を考えて基本変形を施すと、

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 2 & -2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 24 & 4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 10 & 3 \end{pmatrix}$$

となる. ただしここで第2列と第4列を入れ替えた.

つまり、解は存在し、2つの任意定数を含む. $x_2 = \alpha$, $x_5 = \beta$ とすると、

$$x_1 = -2\alpha + 2\beta, \quad x_2 = \alpha, \quad x_3 = 3 - 10\beta, \quad x_4 = 4 - 24\beta, \quad x_5 = \beta$$

となる. ベクトルの形で表すと

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 3 \\ 3 \\ 0 \end{pmatrix} + \alpha \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ -10 \\ -24 \\ 1 \end{pmatrix}$$

となる.

p70-73 : 3-イ)

$$\begin{aligned}
 & \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 4 & 3 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \\
 \xrightarrow{\text{第1列を掃き出す}} & \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -2 & -1 & -2 & 0 & 1 \end{array} \right) \\
 \xrightarrow{\text{第2列を掃き出す}} & \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & -1 & -2 & -3 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 2 & 1 \end{array} \right) \\
 \xrightarrow{\text{第3列を掃き出す}} & \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & -2 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 2 & 1 \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

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 : 3-ロ)

$P^{-1}AP = B$ とおくと,

$$\begin{aligned}
 A^n &= PB^nP^{-1} \\
 &= \begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 \\ -1 & -2 & -1 \\ 2 & 4 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2^n & 0 & 0 \\ 0 & 1^n & 0 \\ 0 & 0 & 0^n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -2 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \\ 0 & 2 & 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} -2^{n+1} + 3 & -2^n - 3 & 2^n - 3 \\ 2^{n+1} - 2 & 2^n + 2 & -2^n - 2 \\ -2^{n+2} + 4 & -2^{n+1} - 4 & 2^{n+1} - 4 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

となる。

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 : 9

3つの平面が1本の直線を共有する必要十分条件は、与式を x, y, z に関する方程式とみたときに、解が存在して1つの任意定数を含むことである。

これは

$$\begin{cases} r(A) = 2 \\ r(A) = r(\tilde{A}) \end{cases}$$

と同値であり、したがって、

$$r(A) = r(\tilde{A}) = 2$$

が必要十分条件である。

p70-73 : 10-イ)

証明. $AX = E$ をみたす n 次正則行列 X が存在するとする. このとき,

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} \\ x_{21} & x_{22} \end{pmatrix}$$

とおくと,

$$\begin{aligned} AX &= \begin{pmatrix} a & -b \\ b & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} \\ x_{21} & x_{22} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} ax_{11} - bx_{21} & ax_{12} - bx_{22} \\ bx_{11} + ax_{21} & bx_{12} + ax_{22} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

となり, これが E に等しいので,

$$\begin{cases} ax_{11} - bx_{21} = 1 \\ ax_{12} - bx_{22} = 0 \\ bx_{11} + ax_{21} = 0 \\ bx_{12} + ax_{22} = 1 \end{cases}$$

となり, これを変形すると,

$$\begin{cases} (a^2 + b^2)x_{11} = a \\ (a^2 + b^2)x_{12} = b \\ (a^2 + b^2)x_{21} = -b \\ (a^2 + b^2)x_{22} = a \end{cases}$$

となるから, このような $x_{11}, x_{12}, x_{21}, x_{22}$ が存在する必要十分条件は

$$a^2 + b^2 \neq 0$$

である. このことから直ちに主張が従う. \square

p70-73 : 10-口)

証明.

$$A' = \begin{pmatrix} a' & -b' \\ b' & a' \end{pmatrix}, \quad \alpha' = a' + b'i$$

とおく.

和については

$$A + A' = \begin{pmatrix} a + a' & -(b + b') \\ b + b' & a + a' \end{pmatrix}, \quad \alpha + \alpha' = (a + a') + (b + b')i$$

となり, このときたしかに $A + A'$ と $\alpha + \alpha'$ が一対一に対応する.

積については

$$AA' = \begin{pmatrix} aa' - bb' & -(ab' + ba') \\ ab' + ba' & aa' - bb' \end{pmatrix}, \quad \alpha\alpha' = (aa' - bb') + (ab' + ba')i$$

となり, たしかに AA' と $\alpha\alpha'$ が一対一に対応する.

逆数については

$$A^{-1} = \frac{1}{a^2 + b^2} \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix}, \quad \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{a^2 + b^2}(a - bi)$$

となり, たしかに A^{-1} と $1/\alpha$ が一対一に対応する.以上の考察により証明された. \square

p70-73 : 10-ハ)

証明.

$$\alpha = r(\cos \theta + i \sin \theta)$$

と表せるとすると,

$$a + bi = r(\cos \theta + i \sin \theta)$$

であるから,

$$a = r \cos \theta, \quad b = r \sin \theta$$

とかけ, このとき

$$\begin{pmatrix} a & -b \\ b & a \end{pmatrix} = r \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

となる. これが証明すべきことであった. \square

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 : 12

証明. 以下の3つの命題が同値であることを示す.

- (1) A は正規行列である. すなわち $A^*A = AA^*$ である.
- (2) 任意の $x \in \mathbb{C}^n$ について, $\|Ax\| = \|A^*x\|$ が成立する.
- (3) 任意の $x, y \in \mathbb{C}^n$ について, $(Ax, Ay) = (A^*x, A^*y)$ が成立する.

(1) \implies (2) $x \in \mathbb{C}^n$ を任意にとる. このとき

$$\begin{aligned}\|Ax\|^2 &= (Ax, Ax) \\ &= (x, A^*Ax) \\ &= (x, AA^*x) \quad (\because \text{正規行列の定義}) \\ &= (A^*x, A^*x) = \|A^*x\|^2\end{aligned}$$

であるから, $\|Ax\| = \|A^*x\|$ が成立する.

(2) \implies (3) $x, y \in \mathbb{C}^n$ を任意にとる. このとき

$$\begin{aligned}\|A(x+y)\|^2 &= (A(x+y), A(x+y)) \\ &= \|Ax\|^2 + (Ax, Ay) + (Ay, Ax) + \|Ay\|^2 \\ &= \|Ax\|^2 + (Ax, Ay) + \overline{(Ax, Ay)} + \|Ay\|^2\end{aligned}$$

であり, 同様に計算すると

$$\|A^*(x+y)\|^2 = \|A^*x\|^2 + (A^*x, A^*y) + \overline{(A^*x, A^*y)} + \|A^*y\|^2$$

を得る. $\|A(x+y)\| = \|A^*(x+y)\|$, $\|Ax\| = \|A^*x\|$, $\|Ay\| = \|A^*y\|$ を仮定したので,

$$(Ax, Ay) + \overline{(Ax, Ay)} = (A^*x, A^*y) + \overline{(A^*x, A^*y)}$$

となり, これは $\operatorname{Re}(Ax, Ay) = \operatorname{Re}(A^*x, A^*y)$ であることを表す.

また, x を ix におきかえることで, $\operatorname{Im}(Ax, Ay) = \operatorname{Im}(A^*x, A^*y)$ も示される. ゆえにこのとき

$$(Ax, Ay) = (A^*x, A^*y).$$

(3) \implies (1) $x, y \in \mathbb{C}^n$ を任意にとる. このとき

$$(x, (A^*A - AA^*)y) = 0$$

である. いま x は任意に取ったので, $x = (A^*A - AA^*)y$ とすると,

$$\begin{aligned}\|(A^*A - AA^*)y\|^2 &= 0, \\ \therefore (A^*A - AA^*)y &= \mathbf{0}.\end{aligned}$$

ゆえに, y を任意に取ったことから $A^*A = AA^*$ となり, A は正規行列である.

以上の議論により証明された. \square

p70-73 : 13-イ)

まず,

$$\begin{aligned} [[X, Y], Z] &= [XY - YX, Z] \\ &= (XY - YX)Z - Z(XY - YX) \\ &= XYZ - YXZ - ZXY + ZYX. \end{aligned}$$

同様に計算すると,

$$\begin{aligned} [[Y, Z], X] &= YZX - ZYX - XYZ + XZY, \\ [[Z, X], Y] &= ZXY - XZY - YZX + YXZ. \end{aligned}$$

よって,

$$[[X, Y], Z] + [[Y, Z], X] + [[Z, X], Y] = 0$$

である.

p70-73 : 13-ロ)

証明. X, Y は交代行列だから,

$$X = -{}^tX, \quad Y = -{}^tY.$$

これを用いると,

$$\begin{aligned} [X, Y] &= XY - YX \\ &= (-{}^tX)(-{}^tY) - (-{}^tY)(-{}^tX) \\ &= {}^t(YX) - {}^t(XY) \\ &= -{}^t(XY - YX) \\ &= -{}^t[X, Y] \end{aligned}$$

となる. よってこのとき $[X, Y]$ は交代行列である. \square

p70-73 : 13-ハ)

証明. 以下では

$$Y = \begin{pmatrix} 0 & -z' & y' \\ z' & 0 & -x' \\ -y' & x' & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}$$

とおく.

【 $X + Y$ と $\mathbf{x} + \mathbf{y}$ について】

$$X + Y = \begin{pmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -z' & y' \\ z' & 0 & -x' \\ -y' & x' & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -(z+z') & y+y' \\ z+z' & 0 & -(x+x') \\ -(y+y') & x+x' & 0 \end{pmatrix}$$

であり, なおかつ

$$\mathbf{x} + \mathbf{y} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x+x' \\ y+y' \\ z+z' \end{pmatrix}$$

であるから, たしかに $X + Y$ と $\mathbf{x} + \mathbf{y}$ は対応する.

【 cX と $c\mathbf{x}$ について】

$$cX = c \begin{pmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -cz & cy \\ cz & 0 & -cx \\ -cy & cx & 0 \end{pmatrix}$$

であり, なおかつ

$$c\mathbf{x} = c \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} cx \\ cy \\ cz \end{pmatrix}$$

であるから, たしかに cX と $c\mathbf{x}$ は対応する.

【 $[X, Y]$ と $\mathbf{x} \times \mathbf{y}$ について】

$$\begin{aligned} [X, Y] &= \begin{pmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -z' & y' \\ z' & 0 & -x' \\ -y' & x' & 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & -z' & y' \\ z' & 0 & -x' \\ -y' & x' & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 & -z'x + x'z & y'x - x'y \\ z'x - x'z & 0 & -y'z + z'y \\ -y'x + x'y & z'y - y'z & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

であり, なおかつ

$$\mathbf{x} \times \mathbf{y} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} yz' - zy' \\ zx' - xz' \\ xy' - yx' \end{pmatrix}$$

であるから, たしかに $[X, Y]$ と $\mathbf{x} \times \mathbf{y}$ は対応する.

【 $X\mathbf{y}$ と $\mathbf{x} \times \mathbf{y}$ について】

$$\begin{pmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -zy' + yz' \\ zx' - xz' \\ -yx' + xy' \end{pmatrix}$$

であり, なおかつ

$$\boldsymbol{x} \times \boldsymbol{y} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} yz' - zy' \\ zx' - xz' \\ xy' - yx' \end{pmatrix}$$

であるから、たしかに $X\boldsymbol{y}$ と $\boldsymbol{x} \times \boldsymbol{y}$ は対応する.

□

p70-73 : 13-二)

証明. ハ) で証明したことから, $[X, Y]$ には $\boldsymbol{x} \times \boldsymbol{y}$ が対応する.

また, イ) で証明したことより, $[[X, Y], Z] + [[Y, Z], X] + [[Z, X], Y] = 0$ であり, この左辺には $(\boldsymbol{x} \times \boldsymbol{y}) \times \boldsymbol{z} + (\boldsymbol{y} \times \boldsymbol{z}) \times \boldsymbol{x} + (\boldsymbol{z} \times \boldsymbol{x}) \times \boldsymbol{y}$ が対応し, 右辺には 0 が対応する.

以上の考察により

$$(\boldsymbol{x} \times \boldsymbol{y}) \times \boldsymbol{z} + (\boldsymbol{y} \times \boldsymbol{z}) \times \boldsymbol{x} + (\boldsymbol{z} \times \boldsymbol{x}) \times \boldsymbol{y} = 0$$

であることが示された. □

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

□ $C = AB = (c_{ik})$ 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, τ 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

p83 : 問-(イ)

多重線型性などを用いて変形すると,

$$\begin{aligned}
 (\text{与式}) &= - \begin{vmatrix} 2 & -5 & 3 & 10 \\ 1 & 0 & 2 & -3 \\ 5 & 3 & -2 & 2 \\ -3 & -2 & 4 & 2 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} 0 & -5 & -1 & 16 \\ 1 & 0 & 2 & -3 \\ 0 & 3 & -12 & 17 \\ 0 & -2 & 10 & -7 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 2 & -3 \\ 0 & -5 & -1 & 16 \\ 0 & 3 & -12 & 17 \\ 0 & -2 & 10 & -7 \end{vmatrix} \\
 &= 1 \cdot (-1)^{1+1} \begin{vmatrix} -5 & -1 & 16 \\ 3 & -12 & 17 \\ -2 & 10 & -7 \end{vmatrix} = 539
 \end{aligned}$$

となるので, この行列式の値は 539 である.

p83 : 問-(ロ)

多重線型性などを用いて変形すると,

$$\begin{aligned}
 (\text{与式}) &= - \begin{vmatrix} 2 & 3 & 5 & -4 \\ 1 & -7 & -8 & 6 \\ 3 & 10 & 6 & 1 \\ 5 & 2 & 4 & 3 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} 0 & 17 & 21 & -16 \\ 1 & -7 & -8 & 6 \\ 0 & 31 & 30 & -17 \\ 0 & 37 & 44 & -27 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & -7 & -8 & 6 \\ 0 & 17 & 21 & -16 \\ 0 & 31 & 30 & -17 \\ 0 & 37 & 44 & -27 \end{vmatrix} \\
 &= 1 \cdot (-1)^{1+1} \begin{vmatrix} 17 & 21 & -16 \\ 31 & 30 & -17 \\ 37 & 44 & -27 \end{vmatrix}
 \end{aligned}$$

となる. ここで, 第 2 列に第 1 列の -1 倍を加え, 第 3 列に第 1 列を加えると,

$$(\text{与式}) = \begin{vmatrix} 17 & 4 & 1 \\ 31 & -1 & 14 \\ 37 & 7 & 10 \end{vmatrix}$$

を得る. ここで, 第 1 列に第 3 列の -2 倍を加えると,

$$(\text{与式}) = \begin{vmatrix} 15 & 4 & 1 \\ 3 & -1 & 14 \\ 17 & 7 & 10 \end{vmatrix} = -750$$

となるため, この行列式の値は -750 である.

第3章・章末問題

p90-91 : 1-1)

$k \in \{2, 3, \dots, n\}$ として, 第1列に第 k 列の x^k 倍を加えると,

$$\begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & x & -1 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & x & -1 \\ a_n + a_{n-1}x + \cdots + a_1x^{n-1} + a_0x^n & a_{n-1} & a_{n-2} & \cdots & a_1 & a_0 \end{vmatrix}.$$

第1列で余因子展開すると,

$$\begin{aligned} (\text{与式}) &= (-1)^{n+2}(a_n + a_{n-1}x + \cdots + a_1x^{n-1} + a_0x^n) \begin{vmatrix} -1 & 0 & \cdots & 0 \\ x & -1 & \cdots & 0 \\ 0 & x & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & x & -1 \end{vmatrix} \\ &= (-1)^{n+2}(a_n + a_{n-1}x + \cdots + a_1x^{n-1} + a_0x^n) \cdot (-1)^{n-2} \begin{vmatrix} -1 & 0 \\ x & -1 \end{vmatrix} \quad (*) \\ &= (-1)^{n+2}(a_n + a_{n-1}x + \cdots + a_1x^{n-1} + a_0x^n) \cdot (-1)^{n-2} \\ &= (-1)^{2n}(a_n + a_{n-1}x + \cdots + a_1x^{n-1} + a_0x^n) \\ &= a_n + a_{n-1}x + \cdots + a_1x^{n-1} + a_0x^n \end{aligned}$$

となる. ただし (*) では同様の余因子展開を繰り返した.

以上の計算により,

$$(\text{与式}) = a_n + a_{n-1}x + \cdots + a_1x^{n-1} + a_0x^n.$$

p90-91 : 1-口)

与式の第 2 列から第 n 列までを第 1 列に足すと,

$$\begin{vmatrix} x + \sum_{k=1}^n a_k & a_1 & a_2 & \cdots & a_n \\ x + \sum_{k=1}^n a_k & x & a_2 & \cdots & a_n \\ x + \sum_{k=1}^n a_k & a_2 & x & \cdots & a_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x + \sum_{k=1}^n a_k & a_n & a_{n-1} & \cdots & x \end{vmatrix}$$

である. 第 2 行から第 n 行のそれぞれから第 1 行を引くと,

$$\begin{vmatrix} x + \sum_{k=1}^n a_k & a_1 & a_2 & \cdots & a_n \\ 0 & x - a_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a_2 - a_1 & x - a_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & a_n - a_1 & a_{n-1} - a_2 & \cdots & x - a_n \end{vmatrix}$$

である. 第 1 列で余因子展開すると,

$$\begin{aligned} & \left(x + \sum_{k=1}^n a_k \right) \begin{vmatrix} x - a_1 & 0 & \cdots & 0 \\ a_2 - a_1 & x - a_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_n - a_1 & a_{n-1} - a_2 & \cdots & x - a_n \end{vmatrix} \\ &= \left(x + \sum_{k=1}^n a_k \right) (x - a_1)(x - a_2) \cdots (x - a_n) \\ &= \left(x + \sum_{k=1}^n a_k \right) \prod_{k=1}^n (x - a_k). \end{aligned}$$

p90-91 : 1-二)

第1列で余因子展開すると

$$\begin{aligned}(\text{与式}) &= -a^2 \begin{vmatrix} a^2 & b^2 & 1 \\ c^2 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} + b^2 \begin{vmatrix} a^2 & b^2 & 1 \\ 0 & c^2 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} a^2 & b^2 & 1 \\ 0 & c^2 & 1 \\ c^2 & 0 & 1 \end{vmatrix} \\ &= -a^2(b^2 + c^2 - a^2) + b^2(b^2 - c^2 - a^2) - (a^2c^2 + b^2c^2 - c^4) \\ &= a^4 + b^4 + c^4 - 2a^2b^2 - 2b^2c^2 - 2c^2a^2.\end{aligned}$$

p90-91 : 2-イ)

証明. 余因子展開を用いると,

$$\begin{aligned}
 (\text{与式}) &= -a \begin{vmatrix} a & b & c \\ -d & 0 & f \\ -e & -f & 0 \end{vmatrix} + b \begin{vmatrix} a & b & c \\ 0 & d & e \\ -e & -f & 0 \end{vmatrix} - c \begin{vmatrix} a & b & c \\ 0 & d & e \\ -d & 0 & f \end{vmatrix} \\
 &= -a(-cdf + bfe - af^2) + b(be^2 - cde - adf) - c(-adf + bde - cd^2) \\
 &= af(cd - be + af) - be(-be + cd + af) + cf(af - be - cd) \\
 &= (af - be + cd)^2.
 \end{aligned}$$

となり, これが証明すべきことであつた. \square

p90-91 : 2-ロ)

証明. A を n 次行列とする. ${}^tA = -A$ であるから,

$$|{}^tA| = (-1)^n |A|.$$

ここで, n は奇数であるから,

$$|{}^tA| = -|A|.$$

また, 行列式の転置に関する不変性により, $|{}^tA| = |A|$ なので,

$$\begin{aligned}
 |A| &= -|A|, \\
 \therefore |A| &= 0
 \end{aligned}$$

となり, これが証明すべきことであつた. \square

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った. \square

□ 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 α^{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 α 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.

p90-91 : 6

証明. $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ のもとで, n 個の点を $(x_i, y_i) \in \mathbb{R}^2$ とする. このとき,

$$\begin{cases} a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + \cdots + a_nx_1^{n-1} = y_1 \\ a_0 + a_1x_2 + a_2x_2^2 + \cdots + a_nx_2^{n-1} = y_2 \\ \vdots \\ a_0 + a_1x_n + a_2x_n^2 + \cdots + a_nx_n^{n-1} = y_n \end{cases}$$

である, これを行列の形に表すと,

$$\begin{pmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^{n-1} \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \cdots & x_n^{n-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}$$

となる.

ここで,

$$A := \begin{pmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^{n-1} \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \cdots & x_n^{n-1} \end{pmatrix}$$

とおくと, $|{}^tA|$ はヴァンデルモンドの行列式である.

行列式の値は, 行列の転置に対して不変なので,

$$|A| = \prod_{i < j} (x_j - x_i)$$

となり, 条件によりこの値は 0 でない. ゆえに先の連立方程式はただ一つの解をもつ.

以上の考察によって, これら n 個の点を通る直線がただ一つ存在することが示された. \square

p90-91 : 8

与えられた行列式は,

$$\begin{cases} a_1x + b_1y = c_1 \\ a_2x + b_2y = c_2 \\ a_3x + b_3y = c_3 \end{cases}$$

の拡大係数行列の行列式を表す. 基本変形を施すと, この行列式は

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & g_1 \\ 0 & 1 & g_2 \\ 0 & 0 & g_3 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & t & h_1 \\ 0 & 0 & h_2 \\ 0 & 0 & h_3 \end{pmatrix} \quad (4)$$

の場合に変形できる.

- (I) (3) の場合, 行列式が 0 となる条件は $g_3 = 0$ である, このとき, 上の連立方程式の解 (x, y) は存在し一意に定まる. これは 3 直線が 1 点で交わることを表す.
- (II) (4) の場合, 行列式は常に 0 であり, このとき, 3 直線はすべて平行であるか一致するかである.

以上の考察により, 与えられた行列式が 0 であるのは

- (i) 3 直線が 1 点で交わる
- (ii) 3 直線が平行である
- (iii) 3 直線が一致する

のいずれかの場合である.

p90-91 : 9

証明. 3点 P_1, P_2, P_3 を通る平面の方程式を $ax + by + cz + d = 0$ とおく. このとき,

$$\begin{cases} ax + by + cz + d = 0 \\ ax_1 + by_1 + cz_1 + d = 0 \\ ax_2 + by_2 + cz_2 + d = 0 \\ ax_3 + by_3 + cz_3 + d = 0 \end{cases}$$

が成立する. すなわちこれは

$$\begin{pmatrix} x & y & z & 1 \\ x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \mathbf{0}$$

をみたす. これを a, b, c, d 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,

$$\begin{vmatrix} x & y & z & 1 \\ x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \end{vmatrix} = 0$$

が成立する. これが証明すべきことであつた. \square

p90-91 : 10

証明. 必要性・十分性をそれぞれ証明する.

- (1) A が正則かつ A^{-1} が整数行列であると仮定し, $\det A = \pm 1$ であることを示す.

A は整数行列であり, その行列式は, 各要素の和と積でかけているから $\det A \in \mathbb{Z}$ である. 同様に $\det(A^{-1}) \in \mathbb{Z}$ である. 逆行列の行列式は,

$$\det(A^{-1}) = \frac{1}{\det A}$$

であり, つまり $\det A, 1/\det A \in \mathbb{Z}$ である. これを満たす整数は ± 1 だけである.

- (2) $\det A = \pm 1$ であることを仮定し, A が正則かつ A^{-1} が整数行列であることを示す. $\det A \neq 0$ より A の正則性がわかる. また, A の余因子行列を \tilde{A} とすると, 余因子は A の各要素の和と積によって表現される. つまり, 余因子は整数であるから \tilde{A} は整数行列である. また

$$A^{-1} = \frac{1}{\det A} \tilde{A}$$

となる. $\det A = \pm 1$ であり, 余因子は整数であるから, A^{-1} は整数行列である.

以上の議論により証明された. \square

p90-91 : 11

イ ${}^t A_\sigma$ は $(j, \sigma(j))$ 成分が 1 でそれ以外が 0 である行列である. いま $A = (\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n)$ とすると,

$$\begin{aligned} {}^t A_\sigma A_\sigma &= \begin{pmatrix} (\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_1) & (\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2) & \cdots & (\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_n) \\ (\mathbf{a}_2, \mathbf{a}_1) & (\mathbf{a}_2, \mathbf{a}_2) & \cdots & (\mathbf{a}_2, \mathbf{a}_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\mathbf{a}_n, \mathbf{a}_1) & (\mathbf{a}_n, \mathbf{a}_2) & \cdots & (\mathbf{a}_n, \mathbf{a}_n) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \\ &= E \end{aligned}$$

となり, A は直交行列である.

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.

p106-107 : 問 1

求める $E \rightarrow F$ の取り替え行列を $P = (p_{ij})$ とし,

$$\begin{aligned} e_1 &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, & e_2 &= \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, & e_3 &= \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \\ f_1 &= \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \\ 4 \end{pmatrix}, & f_2 &= \begin{pmatrix} 4 \\ 1 \\ 8 \end{pmatrix}, & f_3 &= \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \\ 6 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

とする. ここで,

$$f_i = \sum_{j=1}^3 p_{ji} e_j = p_{1i} e_1 + p_{2i} e_2 + p_{3i} e_3$$

であり, $i = 1, 2, 3$ の場合についての連立方程式を作ると

$$f_1 = p_{11} e_1 + p_{21} e_2 + p_{31} e_3$$

$$f_2 = p_{12} e_1 + p_{22} e_2 + p_{32} e_3$$

$$f_3 = p_{13} e_1 + p_{23} e_2 + p_{33} e_3$$

これを解くことにより

$$p_{11} = \frac{9}{2}, \quad p_{21} = -\frac{1}{2}, \quad p_{31} = -\frac{1}{2},$$

$$p_{12} = 5, \quad p_{22} = -2, \quad p_{32} = 3,$$

$$p_{13} = \frac{13}{2}, \quad p_{23} = -\frac{3}{2}, \quad p_{33} = -\frac{1}{2}$$

なので,

$$P = \begin{pmatrix} 9/2 & 5 & 13/2 \\ -1/2 & -2 & -3/2 \\ -1/2 & 3 & -1/2 \end{pmatrix}$$

である. また

$$(f_1, f_2, \dots, f_n) = (e_1, e_2, \dots, e_n)P$$

であるから

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} 3 & 4 & 3 \\ -1 & 1 & -2 \\ 4 & 8 & 6 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} P \\ P &= \begin{pmatrix} 3 & 4 & 3 \\ -1 & 1 & -2 \\ 4 & 8 & 6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \end{aligned}$$

から求めることもできる.

p106-107 : 問 2

まず,

$$\mathbf{f}_i = \sum_{j=1}^2 p_{ji} \mathbf{e}_j = p_{1i} \mathbf{e}_1 + p_{2i} \mathbf{e}_2$$

である, これにより

$$\mathbf{f}_1 = p_{11} \mathbf{e}_1 + p_{21} \mathbf{e}_2,$$

$$\mathbf{f}_2 = p_{12} \mathbf{e}_1 + p_{22} \mathbf{e}_2$$

であるから,

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} = p_{11} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} + p_{21} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix} = p_{12} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} + p_{22} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$

となり, これにより

$$p_{11} = -1, \quad p_{21} = 1, \quad p_{12} = -1, \quad p_{22} = 2$$

であるから, 基底の取り替え $E \rightarrow F$ の行列は

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

である.

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.

p122 : 問

まず,

$$\mathbf{a}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{a}_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{a}_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

とおく. 正規直交基底のひとつを \mathbf{e}_1 とすると, $\|\mathbf{a}_1\| = \sqrt{2}$ により,

$$\mathbf{e}_1 = \frac{1}{\|\mathbf{a}_1\|} \mathbf{a}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

となる. また,

$$\mathbf{a}'_2 = \mathbf{a}_2 - (\mathbf{a}_2, \mathbf{e}_1) \mathbf{e}_1$$

とすると,

$$\mathbf{a}'_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} - \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix}$$

である. これを用いると,

$$\mathbf{e}_2 = \frac{1}{\|\mathbf{a}'_2\|} \mathbf{a}'_2 = \frac{1}{\sqrt{6}/2} \cdot \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix}$$

となる. また,

$$\mathbf{a}'_3 = \mathbf{a}_3 - (\mathbf{a}_3, \mathbf{e}_1) \mathbf{e}_1 - (\mathbf{a}_3, \mathbf{e}_2) \mathbf{e}_2$$

とすると,

$$\mathbf{a}'_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} - \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} - \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix} \right\} \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}$$

となり,

$$\mathbf{e}_3 = \frac{1}{\|\mathbf{a}'_3\|} \mathbf{a}'_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

となる.

以上の考察により, 求める正規直交基底は

$$\left\langle \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix}, \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\rangle$$

である.

第4章・章末問題

p127-130 : 1

$s, t, u, v \in \mathbb{R}$ とし.

$$s\mathbf{a}_1 + t\mathbf{a}_2 = u\mathbf{a}_3 + v\mathbf{a}_4$$

とおく. これにより,

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & -1 & 9 \\ 0 & 3 & 5 & 1 \\ 4 & -3 & 2 & 4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s \\ t \\ u \\ v \end{pmatrix} = \mathbf{o},$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s \\ t \\ u \\ v \end{pmatrix} = \mathbf{o},$$

$$\begin{pmatrix} s \\ t \\ u \\ v \end{pmatrix} = a \begin{pmatrix} -3 \\ -2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (a \text{ は任意の定数})$$

とかけるので, $W_1 \cap W_2$ の次元は 1 であり, その基底は

$$s\mathbf{a}_1 + t\mathbf{a}_2 = -a \begin{pmatrix} 1 \\ 8 \\ 6 \\ 6 \end{pmatrix}$$

により,

$$\left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ 8 \\ 6 \\ 6 \end{pmatrix} \right\rangle$$

である.

p127-130 : 2

W_1 に関して, $x_3 = s, x_4 = t$ とおくと,

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} -9 \\ 3 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

とかけると, $\dim W_1 = 2$ であり, その基底は

$$\left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -9 \\ 3 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\rangle$$

である. W_2 に関しても同様にして, $\dim W_2 = 2$ であり, その基底は

$$\left\langle \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1 \\ 3 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\rangle$$

である. したがって $W_1 + W_2$ は

$$\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -9 \\ 3 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1 \\ 3 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

によって生成される.

ここで,

$$x \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + y \begin{pmatrix} -9 \\ 3 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + z \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + w \begin{pmatrix} -1 \\ 3 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{o}$$

とすると,

$$\begin{pmatrix} 1 & -9 & 0 & -1 \\ -1 & 3 & -1 & 3 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{pmatrix} = \mathbf{o}$$

となり, これに基本変形を施すと,

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 8 \\ 0 & 1 & 0 & -8 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ z \\ y \\ w \end{pmatrix} = \mathbf{o}$$

となる. したがって, $W_1 + W_2$ の次元は 3 であり, その基底は

$$\left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -9 \\ 3 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\rangle$$

である.

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