

2020 入試対策  
過去問ライブラリー

# 筑波大学

## 理系数学22か年

1998 - 2019

外林康治 編著

電送数学舎

## まえがき

本書には、1998年度以降に出題された筑波大学（前期日程）の理系数学の全問題とその解答例を掲載しています。

過去問の演習をスムーズに進めるために、現行課程入試に対応した内容分類を行っています。なお、複数領域の融合問題の配置箇所は、鍵となっている分野です。

## 本書の構成

- 1 本書は2部構成になっています。「分野別問題一覧」と「分野別問題と解答例」です。
- 2 標準的な活用方法については、以下のように想定しています。
  - (1) 「分野別問題一覧」から問題を選び、答案をつくる。
  - (2) 「分野別問題と解答例」で、答案をチェックする。
  - (3) 1つの分野で、(1)と(2)を繰り返す。
  - (4) 完答できなかった問題だけを、再度、繰り返す。
  - (5) 出題の流れをウェブサイトの入試直前に確認する。

注 「行列」は範囲外ですので除外しました。

## PDF版とKindle版のリンクについて

本書では、対応する問題と解答例のページ間にハイパーリンクを張っています。問題編の **1**, **2**, … などの問題番号、解答編の **問題** の文字がリンク元です。

このハイパーリンクの作動状況について、PDF版とKindle版に違いがあります。

**【PDF版】** リンクが無効の場合、PDF Viewer を Adobe Acrobat Reader に変更することをおすすめします。

**【Kindle版】** 現状では、Kindle アプリで、リンクの作動しない端末があります。このときは「しおり」などを活用してください。

## 目 次

分野別問題一覧 .....	3
分野別問題と解答例 .....	33
関 数 .....	34
図形と式 .....	40
図形と計量 .....	51
ベクトル .....	53
整数と数列 .....	61
論 証 .....	74
複素数 .....	76
曲 線 .....	84
極 限 .....	108
微分法 .....	122
積分法 .....	147
積分の応用 .....	158

# 分野別問題一覧

関数／図形と式／図形と計量

ベクトル／整数と数列／論証

複素数／曲線／極限

微分法／積分法／積分の応用

■ 関数 |||||

1  $k > 0, 0 < \theta < \frac{\pi}{4}$  とする。放物線  $C: y = x^2 - kx$  と直線  $l: y = (\tan \theta)x$  の交点のうち、原点  $O$  と異なるものを  $P$  とする。放物線  $C$  の点  $O$  における接線を  $l_1$  とし、点  $P$  における接線を  $l_2$  とする。直線  $l_1$  の傾きが  $-\frac{1}{3}$  で、直線  $l_2$  の傾きが  $\tan 2\theta$  であるとき、以下の問いに答えよ。

- (1)  $k$  を求めよ。
- (2)  $\tan \theta$  を求めよ。
- (3) 直線  $l_1$  と  $l_2$  の交点を  $Q$  とする。  $\angle PQO = \alpha$  (ただし  $0 \leq \alpha \leq \pi$ ) とするとき、 $\tan \alpha$  を求めよ。 [2019]

2  $f(x), g(t)$  を、  $f(x) = x^3 - x^2 - 2x + 1, g(t) = \cos 3t - \cos 2t + \cos t$  とおく。

- (1)  $2g(t) - 1 = f(2\cos t)$  が成り立つことを示せ。
- (2)  $\theta = \frac{\pi}{7}$  のとき、  $2g(\theta)\cos \theta = 1 + \cos \theta - 2g(\theta)$  が成り立つことを示せ。
- (3)  $2\cos \frac{\pi}{7}$  は 3 次方程式  $f(x) = 0$  の解であることを示せ。 [2013]

3  $x$  の方程式  $|\log_{10} x| = px + q$  ( $p, q$  は実数) が 3 つの相異なる正の解をもち、次の 2 つの条件を満たすとする。

- (I) 3 つの解の比は、  $1 : 2 : 3$  である。
- (II) 3 つの解のうち最小のものは、  $\frac{1}{2}$  より大きく、  $1$  より小さい。

このとき、  $A = \log_{10} 2, B = \log_{10} 3$  とおき、  $p$  と  $q$  を  $A$  と  $B$  を用いて表せ。

[2012]

4 以下の問いに答えよ。

- (1) 等式  $\cos 3\theta = 4\cos^3 \theta - 3\cos \theta$  を示せ。
- (2)  $2\cos 80^\circ$  は 3 次方程式  $x^3 - 3x + 1 = 0$  の解であることを示せ。
- (3)  $x^3 - 3x + 1 = (x - 2\cos 80^\circ)(x - 2\cos \alpha)(x - 2\cos \beta)$  となる角度  $\alpha, \beta$  を求めよ。ただし  $0^\circ < \alpha < \beta < 180^\circ$  とする。 [2009]

5  $p, q$  を正の実数とする。  $x$  の方程式  $\log_{10}(px) \cdot \log_{10}(qx) + 1 = 0$  が  $1$  より大きい解をもつとき、点  $(\log_{10} p, \log_{10} q)$  の存在する範囲を座標平面上に図示せよ。

[2008]

6  $f(x) = x^4 + 2x^2 - 4x + 8$  とする。

- (1)  $(x^2 + t)^2 - f(x) = (px + q)^2$  が  $x$  の恒等式となるような整数  $t, p, q$  の値を 1 組求めよ。
- (2) (1) で求めた  $t, p, q$  の値を用いて方程式  $(x^2 + t)^2 = (px + q)^2$  を解くことにより、方程式  $f(x) = 0$  の解をすべて求めよ。 [2006]

■ 図形と式 |||

1  $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$  とする。放物線  $y = x^2$  上に 3 点  $O(0, 0)$ ,  $A(\tan \theta, \tan^2 \theta)$ ,  $B(-\tan \theta, \tan^2 \theta)$  をとる。三角形  $OAB$  の内心の  $y$  座標を  $p$  とし、外心の  $y$  座標を  $q$  とする。また、正の実数  $a$  に対して、直線  $y = a$  と放物線  $y = x^2$  で囲まれた図形の面積を  $S(a)$  で表す。

- (1)  $p, q$  を  $\cos \theta$  を用いて表せ。
- (2)  $\frac{S(p)}{S(q)}$  が整数であるような  $\cos \theta$  の値をすべて求めよ。 [2018]

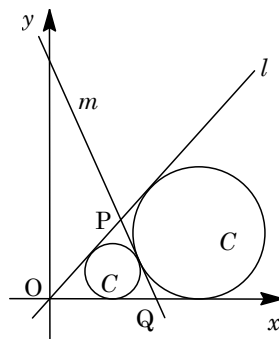
2  $a$  を正の実数とする。2 つの関数

$$y = \frac{1}{3}ax^2 - 2a^2x + \frac{7}{3}a^3, \quad y = -\frac{2}{3}ax^2 + 2a^2x - \frac{2}{3}a^3$$

のグラフは、2 点  $A, B$  で交わる。ただし、 $A$  の  $x$  座標は  $B$  の  $x$  座標より小さいとする。また、2 点  $A, B$  を結ぶ線分の垂直二等分線を  $l$  とする。

- (1) 2 点  $A, B$  の座標を  $a$  を用いて表せ。
- (2) 直線  $l$  の方程式を  $a$  を用いて表せ。
- (3) 原点と直線  $l$  の距離  $d$  を  $a$  を用いて表せ。また、 $a > 0$  の範囲で  $d$  を最大にする  $a$  の値を求めよ。 [2017]

3  $xy$  平面の直線  $y = (\tan 2\theta)x$  を  $l$  とする。ただし  $0 < \theta < \frac{\pi}{4}$  とする。図で示すように、円  $C_1, C_2$  を以下の(i)~



(iv)で定める。

(i) 円  $C_1$  は直線  $l$  および  $x$  軸の正の部分と接する。

(ii) 円  $C_1$  の中心は第 1 象限にあり、原点  $O$  から中心までの距離  $d_1$  は  $\sin 2\theta$  である。

(iii) 円  $C_2$  は直線  $l, x$  軸の正の部分、および円  $C_1$  と接する。

(iv) 円  $C_2$  の中心は第 1 象限にあり、原点  $O$  から中心までの距離  $d_2$  は  $d_1 > d_2$  を満たす。

円  $C_1$  と円  $C_2$  の共通接線のうち、 $x$  軸、直線  $l$  と異なる直線を  $m$  とし、直線  $m$  と直線  $l, x$  軸との交点をそれぞれ  $P, Q$  とする。

(1) 円  $C_1, C_2$  の半径を  $\sin \theta, \cos \theta$  を用いて表せ。

(2)  $\theta$  が  $0 < \theta < \frac{\pi}{4}$  の範囲を動くとき、線分  $PQ$  の長さの最大値を求めよ。

(3) (2)の最大値を与える  $\theta$  について直線  $m$  の方程式を求めよ。

[2016]

4 以下の問いに答えよ。

(1) 座標平面において、次の連立不等式の表す領域を図示せよ。

$$x^2 + y \leq 1, x - y \leq 1$$

(2) 2 つの放物線  $y = x^2 - 2x + k$  と  $y = -x^2 + 1$  が共有点をもつような実数  $k$  の値の範囲を求めよ。

(3)  $x, y$  が(1)の連立不等式を満たすとき、 $y - x^2 + 2x$  の最大値および最小値と、それらを与える  $x, y$  の値を求めよ。

[2015]

5  $f(x) = x^3 - x$  とする。 $y = f(x)$  のグラフに点  $P(a, b)$  から引いた接線は 3 本あるとする。3 つの接点  $A(\alpha, f(\alpha)), B(\beta, f(\beta)), C(\gamma, f(\gamma))$  を頂点とする三角形の重心を  $G$  とする。

(1)  $\alpha + \beta + \gamma, \alpha\beta + \beta\gamma + \gamma\alpha$  および  $\alpha\beta\gamma$  を  $a, b$  を用いて表せ。

(2) 点  $G$  の座標を  $a, b$  を用いて表せ。

(3) 点  $G$  の  $x$  座標が正で、 $y$  座標が負となるような点  $P$  の範囲を図示せよ。

[2014]

- 6 O を原点とする  $xy$  平面において、直線  $y=1$  の  $|x| \geq 1$  を満たす部分を  $C$  とする。
- (1)  $C$  上に点  $A(t, 1)$  をとるとき、線分  $OA$  の垂直二等分線の方程式を求めよ。
- (2) 点  $A$  が  $C$  全体を動くとき、線分  $OA$  の垂直二等分線が通過する範囲を求め、それを図示せよ。 [2011]

- 7  $xy$  平面上に 2 定点  $A(1, 0)$  と  $O(0, 0)$  をとる。また、 $m$  を 1 より大きい実数とする。
- (1)  $AP : OP = m : 1$  を満たす点  $P(x, y)$  の軌跡を求めよ。
- (2) 点  $A$  を通る直線で、(1) で求めた軌跡との共有点が 1 個のものを求めよ。また、その共有点の座標も求めよ。 [2007]

■ 図形と計量 |||

- 1 半径 1 の円を内接円とする三角形  $ABC$  が、辺  $AB$  と辺  $AC$  の長さが等しい二等辺三角形であるとする。辺  $BC, CA, AB$  と内接円の接点をそれぞれ  $P, Q, R$  とする。また、 $\alpha = \angle CAB, \beta = \angle ABC$  とし、三角形  $ABC$  の面積を  $S$  とする。
- (1) 線分  $AQ$  の長さを  $\alpha$  を用いて表し、線分  $QC$  の長さを  $\beta$  を用いて表せ。
- (2)  $t = \tan \frac{\beta}{2}$  とおく。このとき、 $S$  を  $t$  を用いて表せ。
- (3) 不等式  $S \geq 3\sqrt{3}$  が成り立つことを示せ。さらに、等号が成立するのは、三角形  $ABC$  が正三角形のときに限ることを示せ。 [2015]

■ ベクトル |||

- 1 四面体  $OABC$  について、 $OA = OB = OC$  および  $\angle AOB = \angle BOC = \angle COA$  が成り立つとする。 $0 < s < 1, 0 < t < 1$  を満たす実数  $s, t$  に対し、辺  $OA$  を  $s : 1-s$  に内分する点を  $D$  とし、辺  $OB$  を  $t : 1-t$  に内分する点を  $E$  とする。 $\overrightarrow{AF} = \overrightarrow{BG} = \overrightarrow{OC}$  となる点  $F, G$  をとり、線分  $EF$  と線分  $DG$  が 1 点で交わるとし、その交点を  $P$  とする。 $\overrightarrow{OA} = \vec{a}, \overrightarrow{OB} = \vec{b}, \overrightarrow{OC} = \vec{c}, \angle AOB = \theta$  とするとき、以下の問いに答えよ。
- (1)  $t = s$  であることを示し、 $\overrightarrow{OP}$  を  $s, \vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$  を用いて表せ。
- (2)  $\overrightarrow{EF} \perp \overrightarrow{DG}$  であるとき、 $\cos \theta$  を  $s$  を用いて表せ。
- (3)  $\overrightarrow{EF} \perp \overrightarrow{DG}$  かつ  $\sqrt{3}OP = OA$  であるとき、 $s$  の値を求めよ。 [2019]



**2** 四面体  $OABC$  において、 $\overrightarrow{OA}=\vec{a}$ 、 $\overrightarrow{OB}=\vec{b}$ 、 $\overrightarrow{OC}=\vec{c}$  とおく。このとき等式  $\vec{a}\cdot\vec{b}=\vec{b}\cdot\vec{c}=\vec{c}\cdot\vec{a}=1$  が成り立つとする。 $t$  は実数の定数で、 $0 < t < 1$  を満たすとする。線分  $OA$  を  $t:1-t$  に内分する点を  $P$  とし、線分  $BC$  を  $t:1-t$  に内分する点を  $Q$  とする。また、線分  $PQ$  の中点を  $M$  とする。

- (1)  $\overrightarrow{OM}$  を  $\vec{a}$ 、 $\vec{b}$ 、 $\vec{c}$  と  $t$  を用いて表せ。
- (2) 線分  $OM$  と線分  $BM$  の長さが等しいとき、線分  $OB$  の長さを求めよ。
- (3) 4 点  $O, A, B, C$  が点  $M$  を中心とする同一球面上にあるとする。このとき、 $\triangle OAB$  と  $\triangle OCB$  は合同であることを示せ。 [2016]

**3** 四面体  $OABC$  において、次が満たされているとする。

$$\overrightarrow{OA}\cdot\overrightarrow{OB}=\overrightarrow{OB}\cdot\overrightarrow{OC}=\overrightarrow{OC}\cdot\overrightarrow{OA}$$

点  $A, B, C$  を通る平面を  $\alpha$  とする。点  $O$  を通り平面  $\alpha$  と直交する直線と、平面  $\alpha$  との交点を  $H$  とする。

- (1)  $\overrightarrow{OA}$  と  $\overrightarrow{BC}$  は垂直であることを示せ。
- (2) 点  $H$  は  $\triangle ABC$  の垂心であること、すなわち  $\overrightarrow{AH}\perp\overrightarrow{BC}$ 、 $\overrightarrow{BH}\perp\overrightarrow{CA}$ 、 $\overrightarrow{CH}\perp\overrightarrow{AB}$  を示せ。
- (3)  $|\overrightarrow{OA}|=|\overrightarrow{OB}|=|\overrightarrow{OC}|=2$ 、 $\overrightarrow{OA}\cdot\overrightarrow{OB}=\overrightarrow{OB}\cdot\overrightarrow{OC}=\overrightarrow{OC}\cdot\overrightarrow{OA}=1$  とする。このとき、 $\triangle ABC$  の各辺の長さおよび線分  $OH$  の長さを求めよ。 [2012]

**4** 点  $O$  を原点とする座標平面上に、2 点  $A(1, 0)$ 、 $B(\cos\theta, \sin\theta)$  ( $90^\circ < \theta < 180^\circ$ ) をとり、以下の条件を満たす 2 点  $C, D$  を考える。

$$\overrightarrow{OA}\cdot\overrightarrow{OC}=1, \overrightarrow{OA}\cdot\overrightarrow{OD}=0, \overrightarrow{OB}\cdot\overrightarrow{OC}=0, \overrightarrow{OB}\cdot\overrightarrow{OD}=1$$

また、 $\triangle OAB$  の面積を  $S_1$ 、 $\triangle OCD$  の面積を  $S_2$  とおく。

- (1) ベクトル  $\overrightarrow{OC}$ 、 $\overrightarrow{OD}$  の成分を求めよ。
- (2)  $S_2 = 2S_1$  が成り立つとき、 $\theta$  と  $S_1$  の値を求めよ。
- (3)  $S = 4S_1 + 3S_2$  を最小にする  $\theta$  と、そのときの  $S$  の値を求めよ。 [2010]

**5** 座標空間において、原点  $O$  を通り方向ベクトル  $(\cos\theta, \sin\theta, 0)$  をもつ直線を  $L_\theta$  とする。点  $A(2, 0, 1)$  から直線  $L_\theta$  に下ろした垂線と  $L_\theta$  との交点を  $P_\theta$  とする。

- (1)  $\theta$  が実数全体を動くとき、 $P_\theta$  は  $xy$  平面内の円周上を動くことを示し、その中心の座標と半径を求めよ。
- (2)  $\theta$  が  $0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}$  の範囲を動くとする。三角形  $OAP_\theta$  の面積の最大値と、そのときの  $P_\theta$  の座標を求めよ。 [2006]

■ 整数と数列 |||||

1 正三角形  $OAB$  に対し、直線  $OA$  上の点  $P_1, P_2, P_3, \dots$  および直線  $OB$  上の点  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots$  を、次の (I), (II), (III) を満たすようにとる。

- (I)  $P_1 = A$  である。
- (II) 線分  $P_1Q_1, P_2Q_2, P_3Q_3, \dots$  はすべて直線  $OA$  に垂直である。
- (III) 線分  $Q_1P_2, Q_2P_3, Q_3P_4, \dots$  はすべて直線  $OB$  に垂直である。

$\overrightarrow{OA} = \vec{a}, \overrightarrow{OB} = \vec{b}$  とおく。点  $O$  を基準とする位置ベクトルが、整数  $k, l$  によって  $k\vec{a} + l\vec{b}$  と表される点全体の集合を  $S$  とする。 $n$  を自然数とするとき、以下の問いに答えよ。

- (1)  $\overrightarrow{OP_n}$  と  $\overrightarrow{OQ_n}$  を  $\vec{a}, \vec{b}$  を用いて表せ。
- (2)  $\overrightarrow{OR} = x\vec{a} + y\vec{b}$  で定まる点  $R$  が線分  $Q_nP_{n+1}$  上にあるとき、 $x$  を  $y$  を用いて表せ。  
また、線分  $Q_nP_{n+1}$  上にある  $S$  の点の個数を求めよ。
- (3) 三角形  $OP_{n+1}Q_n$  の周または内部にある  $S$  の点の個数を求めよ。 [2018]

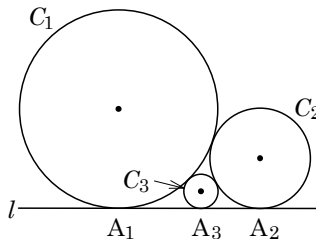
2 数列  $\{a_n\}$  が、 $a_1 = 1, a_2 = 3, a_{n+2} = 3a_{n+1}^2 - 6a_{n+1}a_n + 3a_n^2 + a_{n+1}$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) を満たすとする。また、 $b_n = a_{n+1} - a_n$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) とおく。以下の問いに答えよ。

- (1)  $b_n \geq 0$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) を示せ。
- (2)  $b_n$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) の一の位の数  $2$  であることを数学的帰納法を用いて証明せよ。
- (3)  $a_{2017}$  の一の位の数  $2$  を求めよ。 [2017]

3  $p$  と  $q$  は正の整数とする。2 次方程式  $x^2 - 2px - q = 0$  の 2 つの実数解を  $\alpha, \beta$  とする。ただし  $\alpha > \beta$  とする。数列  $\{a_n\}$  を、 $a_n = \frac{1}{2}(\alpha^{n-1} + \beta^{n-1})$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) によって定める。ただし、 $\alpha^0 = 1, \beta^0 = 1$  と定める。

- (1) すべての自然数  $n$  に対して、 $a_{n+2} = 2pa_{n+1} + qa_n$  であることを示せ。
- (2) すべての自然数  $n$  に対して、 $a_n$  は整数であることを示せ。
- (3) 自然数  $n$  に対し、 $\frac{\alpha^{n-1}}{2}$  以下の最大の整数を  $b_n$  とする。 $p$  と  $q$  が  $q < 2p + 1$  を満たすとき、 $b_n$  を  $a_n$  を用いて表せ。 [2015]

4 平面上の直線  $l$  に同じ側で接する 2 つの円  $C_1, C_2$  があり,  $C_1$  と  $C_2$  も互いに外接している。  $l, C_1, C_2$  で囲まれた領域内に, これら 3 つと互いに接する円  $C_3$  を作る。同様に  $l, C_n, C_{n+1}$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) で囲まれた領域内にあり, これら 3 つと互いに接する円を  $C_{n+2}$  とする。円  $C_n$  の半径を  $r_n$  とし,  $x_n = \frac{1}{\sqrt{r_n}}$  とおく。このとき, 以下の



問いに答えよ。ただし,  $r_1 = 16, r_2 = 9$  とする。

- (1)  $l$  が  $C_1, C_2, C_3$  と接する点を, それぞれ  $A_1, A_2, A_3$  とおく。線分  $A_1A_2, A_1A_3, A_2A_3$  の長さおよび  $r_3$  の値を求めよ。
- (2) ある定数  $a, b$  に対して  $x_{n+2} = ax_{n+1} + bx_n$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) となることを示せ。  
 $a, b$  の値も求めよ。
- (3) (2) で求めた  $a, b$  に対して, 2 次方程式  $t^2 = at + b$  の解を  $\alpha, \beta$  ( $\alpha > \beta$ ) とする。  
 $x_1 = c\alpha^2 + d\beta^2$  を満たす有理数  $c, d$  の値を求めよ。ただし,  $\sqrt{5}$  が無理数であることは証明なしで用いてよい。
- (4) (3) の  $c, d, \alpha, \beta$  に対して,  $x_n = c\alpha^{n+1} + d\beta^{n+1}$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) となることを示し, 数列  $\{r_n\}$  の一般項を  $\alpha, \beta$  を用いて表せ。 [2014]

5 3 つの数列  $\{a_n\}, \{b_n\}, \{c_n\}$  が

$$a_{n+1} = -b_n - c_n, \quad b_{n+1} = -c_n - a_n, \quad c_{n+1} = -a_n - b_n \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

および  $a_1 = a, b_1 = b, c_1 = c$  を満たすとする。ただし,  $a, b, c$  は定数とする。

- (1)  $p_n = a_n + b_n + c_n$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) で与えられる数列  $\{p_n\}$  の初項から第  $n$  項までの和  $S_n$  を求めよ。
- (2) 数列  $\{a_n\}, \{b_n\}, \{c_n\}$  の一般項を求めよ。
- (3)  $q_n = (-1)^n \{(a_n)^2 + (b_n)^2 + (c_n)^2\}$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) で与えられる数列  $\{q_n\}$  の初項から第  $2n$  項までの和を  $T_n$  とする。  $a + b + c$  が奇数であれば, すべての自然数  $n$  に対して  $T_n$  が正の奇数であることを数学的帰納法を用いて示せ。 [2013]

〔6〕 数列  $\{a_n\}$  を,  $a_1 = 1$ ,  $(n+3)a_{n+1} - na_n = \frac{1}{n+1} - \frac{1}{n+2}$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) によって定める。

(1)  $b_n = n(n+1)(n+2)a_n$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) によって定まる数列  $\{b_n\}$  の一般項を求めよ。

(2) 等式  $p(n+1)(n+2) + qn(n+2) + rn(n+1) = b_n$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) が成り立つように, 定数  $p, q, r$  の値を定めよ。

(3)  $\sum_{k=1}^n a_k$  を  $n$  の式で表せ。 [2011]

〔7〕 自然数の数列  $\{a_n\}$ ,  $\{b_n\}$  は,  $(5+\sqrt{2})^n = a_n + b_n\sqrt{2}$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) を満たすものとする。

(1)  $\sqrt{2}$  は無理数であることを示せ。

(2)  $a_{n+1}$ ,  $b_{n+1}$  を  $a_n$ ,  $b_n$  を用いて表せ。

(3) すべての自然数  $n$  に対して,  $a_{n+1} + pb_{n+1} = q(a_n + pb_n)$  が成り立つような定数  $p, q$  を 2 組求めよ。

(4)  $a_n, b_n$  を  $n$  を用いて表せ。 [2009]

〔8〕 2 つの数列  $\{a_n\}$ ,  $\{b_n\}$  を次の漸化式によって定める。

$$a_1 = 3, b_1 = 1, a_{n+1} = \frac{1}{2}(3a_n + 5b_n), b_{n+1} = \frac{1}{2}(a_n + 3b_n)$$

(1) すべての自然数  $n$  について,  $a_n^2 - 5b_n^2 = 4$  であることを示せ。

(2) すべての自然数  $n$  について,  $a_n, b_n$  は自然数かつ  $a_n + b_n$  は偶数であることを証明せよ。 [2008]

〔9〕 (1) 一般項  $a_n$  が  $an^3 + bn^2 + cn$  で表される数列  $\{a_n\}$  において,  $n^2 = a_{n+1} - a_n$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) が成り立つように, 定数  $a, b, c$  を定めよ。

(2) (1)の結果を用いて,  $\sum_{k=1}^n k^2 = \frac{1}{6}n(n+1)(2n+1)$  となることを示せ。

(3)  $1, 2, \dots, n$  の相異なる 2 数の積のすべての和を  $S(n)$  とする。たとえば,  $S(3) = 1 \times 2 + 1 \times 3 + 2 \times 3 = 11$  である。 $S(n)$  を  $n$  の 4 次式で表せ。 [2007]

■ 論証 |||

1 以下の問いに答えよ。

- (1)  $a, b, c, x, y, z, M$  は正の実数とする。  $\frac{x}{a}, \frac{y}{b}, \frac{z}{c}$  がすべて  $M$  以下のとき、  

$$\frac{x+y+z}{a+b+c} \leq M$$
 であることを示せ。
- (2)  $\log_2 5$  と  $\log_3 5$  の大小を比較せよ。
- (3)  $n$  が正の整数のとき、  $1 < \frac{1 + \log_2 5 + (\log_2 5)^n}{1 + \log_3 5 + (\log_3 5)^n} < 2^n$  であることを示せ。 [2019]

■ 複素数 |||

1  $|z|^2 + 3 = 2(z + \bar{z})$  を満たす複素数  $z$  全体の集合を  $A$  とする。ただし  $\bar{z}$  は  $z$  の共役複素数である。

- (1) 集合  $A$  を複素数平面上に図示せよ。
- (2)  $A$  の要素  $z$  の偏角を  $\theta$  とする。ただし  $-\pi < \theta \leq \pi$  とする。  $z$  が  $A$  を動くとき、  $\theta$  のとりうる値の範囲を求めよ。
- (3)  $z^{60}$  が正の実数となる  $A$  の要素  $z$  の個数を求めよ。 [2019]

2 複素数  $\alpha$  に対して、複素数平面上の 3 点  $O(0), A(\alpha), B(\alpha^2)$  を考える。次の条件 (I), (II), (III) をすべて満たす複素数  $\alpha$  全体の集合を  $S$  とする。

- (I)  $\alpha$  は実数でも純虚数でもない。
- (II)  $|\alpha| > 1$  である。
- (III) 三角形  $OAB$  は直角三角形である。

このとき、以下の問いに答えよ。

- (1)  $\alpha$  が  $S$  に属するとき、  $\angle OAB = \frac{\pi}{2}$  であることを示せ。
- (2) 集合  $S$  を複素数平面上に図示せよ。
- (3)  $x, y$  を  $\alpha^2 = x + yi$  を満たす実数とする。  $\alpha$  が  $S$  を動くとき、  $xy$  平面上の点  $(x, y)$  の軌跡を求め、図示せよ。 [2018]

**3**  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$  とする。複素数平面上において、原点を中心とする半径 1 の円の上に異なる 5 点  $P_1(w_1)$ ,  $P_2(w_2)$ ,  $P_3(w_3)$ ,  $P_4(w_4)$ ,  $P_5(w_5)$  が反時計まわりに並んでおり、次の 2 つの条件 (I), (II) を満たすとする。

(I)  $(\cos^2 \alpha)(w_2 - w_1)^2 + (\sin^2 \alpha)(w_5 - w_1)^2 = 0$  が成り立つ。

(II)  $\frac{w_3}{w_2}$  と  $-\frac{w_4}{w_5}$  は方程式  $z^2 - \sqrt{3}z + 1 = 0$  の解である。

また、五角形  $P_1P_2P_3P_4P_5$  の面積を  $S$  とする。以下の問いに答えよ。

- (1) 五角形  $P_1P_2P_3P_4P_5$  の頂点  $P_1$  における内角  $\angle P_5P_1P_2$  を求めよ。
- (2)  $S$  を  $\alpha$  を用いて表せ。
- (3)  $R = |w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5|$  とする。このとき、 $R^2 + 2S$  は  $\alpha$  の値によらないことを示せ。 [2017]

**4** 複素数平面上を動く点  $z$  を考える。次の問いに答えよ。

- (1) 等式  $|z-1| = |z+1|$  を満たす点  $z$  の全体は虚軸であることを示せ。
- (2) 点  $z$  が原点を除いた虚軸上を動くとき、 $w = \frac{z+1}{z}$  が描く図形は直線から 1 点を除いたものとなる。この図形を描け。
- (3)  $\alpha$  を正の実数とする。点  $z$  が虚軸上を動くとき、 $w = \frac{z+1}{z-\alpha}$  が描く図形は円から 1 点を除いたものとなる。この円の中心と半径を求めよ。 [2016]

**5**  $\alpha$  を実数でない複素数とし、 $\beta$  を正の実数とする。以下の問いに答えよ。ただし、複素数  $w$  に対してその共役複素数を  $\bar{w}$  で表す。

- (1) 複素数平面上で、関係式  $\alpha \bar{z} + \bar{\alpha} z = |z|^2$  を満たす複素数  $z$  の描く図形を  $C$  とする。このとき、 $C$  は原点を通る円であることを示せ。
- (2) 複素数平面上で、 $(z-\alpha)(\beta-\bar{\alpha})$  が純虚数となる複素数  $z$  の描く図形を  $L$  とする。 $L$  は (1) で定めた  $C$  と 2 つの共有点をもつことを示せ。また、その 2 点を  $P$ ,  $Q$  とするとき、線分  $PQ$  の長さを  $\alpha$  と  $\bar{\alpha}$  を用いて表せ。
- (3)  $\beta$  の表す複素数平面上の点を  $R$  とする。(2) で定めた点  $P$ ,  $Q$  と点  $R$  を頂点とする三角形が正三角形であるとき、 $\beta$  を  $\alpha$  と  $\bar{\alpha}$  を用いて表せ。 [2015]

■ 曲線 |||||

1  $xy$  平面上に楕円  $C_1 : \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{9} = 1$  ( $a > \sqrt{13}$ ), および双曲線  $C_2 : \frac{x^2}{4} - \frac{y^2}{b^2} = 1$  ( $b > 0$ ) があり,  $C_1$  と  $C_2$  は同一の焦点をもつとする。また  $C_1$  と  $C_2$  の交点  $P(2\sqrt{1+\frac{t^2}{b^2}}, t)$  ( $t > 0$ ) における  $C_1, C_2$  の接線をそれぞれ  $l_1, l_2$  とする。

- (1)  $a$  と  $b$  の間に成り立つ関係式を求め, 点  $P$  の座標を  $a$  を用いて表せ。
- (2)  $l_1$  と  $l_2$  が直交することを示せ。
- (3)  $a$  が  $a > \sqrt{13}$  を満たしながら動くときの点  $P$  の軌跡を図示せよ。 [2014]

2 楕円  $C : \frac{x^2}{16} + \frac{y^2}{9} = 1$  の, 直線  $y = mx$  と平行な 2 接線を  $l_1, l_1'$  とし,  $l_1, l_1'$  に直交する  $C$  の 2 接線を  $l_2, l_2'$  とする。

- (1)  $l_1, l_1'$  の方程式を  $m$  を用いて表せ。
- (2)  $l_1$  と  $l_1'$  の距離  $d_1$  および  $l_2$  と  $l_2'$  の距離  $d_2$  をそれぞれ  $m$  を用いて表せ。ただし, 平行な 2 直線  $l, l'$  の距離とは,  $l$  上の 1 点と直線  $l'$  の距離である。
- (3)  $(d_1)^2 + (d_2)^2$  は  $m$  によらず一定であることを示せ。
- (4)  $l_1, l_1', l_2, l_2'$  で囲まれる長方形の面積  $S$  を  $d_1$  を用いて表せ。さらに  $m$  が変化するとき,  $S$  の最大値を求めよ。 [2013]

3 2 つの双曲線  $C : x^2 - y^2 = 1, H : x^2 - y^2 = -1$  を考える。双曲線  $H$  上の点  $P(s, t)$  に対して, 方程式  $sx - ty = 1$  で定まる直線を  $l$  とする。

- (1) 直線  $l$  は点  $P$  を通らないことを示せ。
- (2) 直線  $l$  と双曲線  $C$  は異なる 2 点  $Q, R$  で交わることを示し,  $\triangle PQR$  の重心  $G$  の座標を  $s, t$  を用いて表せ。
- (3) (2) における 3 点  $G, Q, R$  に対して,  $\triangle GQR$  の面積は点  $P(s, t)$  の位置によらず一定であることを示せ。 [2012]

〔4〕  $d$  を正の定数とする。2 点  $A(-d, 0)$ ,  $B(d, 0)$  からの距離の和が  $4d$  である点  $P$  の軌跡として定まる楕円  $E$  を考える。点  $A$ , 点  $B$ , 原点  $O$  から楕円  $E$  上の点  $P$  までの距離をそれぞれ  $AP$ ,  $BP$ ,  $OP$  とかく。このとき, 以下の問いに答えよ。

- (1) 楕円  $E$  の長軸と短軸の長さを求めよ。
- (2)  $AP^2 + BP^2$  および  $AP \cdot BP$  を,  $OP$  と  $d$  を用いて表せ。
- (3) 点  $P$  が楕円  $E$  全体を動くとき,  $AP^3 + BP^3$  の最大値と最小値を  $d$  を用いて表せ。

[2011]

〔5〕 直線  $l: mx + ny = 1$  が, 楕円  $C: \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$  ( $a > b > 0$ ) に接しながら動くとする。

- (1) 点  $(m, n)$  の軌跡は楕円になることを示せ。
- (2)  $C$  の焦点  $F_1(-\sqrt{a^2 - b^2}, 0)$  と  $l$  との距離を  $d_1$  とし, もう 1 つの焦点  $F_2(\sqrt{a^2 - b^2}, 0)$  と  $l$  との距離を  $d_2$  とする。このとき  $d_1 d_2 = b^2$  を示せ。 [2010]

〔6〕 点  $P(x, y)$  が双曲線  $\frac{x^2}{2} - y^2 = 1$  上を動くとき, 点  $P(x, y)$  と点  $A(a, 0)$  との距離の最小値を  $f(a)$  とする。

- (1)  $f(a)$  を  $a$  で表せ。
- (2)  $f(a)$  を  $a$  の関数とみなすとき,  $ab$  平面上に曲線  $b = f(a)$  の概形をかけ。

[2009]

〔7〕 放物線  $C: y = x^2$  上の異なる 2 点  $P(t, t^2)$ ,  $Q(s, s^2)$  ( $s < t$ ) における接線の交点を  $R(X, Y)$  とする。

- (1)  $X, Y$  を  $t, s$  を用いて表せ。
- (2) 点  $P, Q$  が  $\angle PRQ = \frac{\pi}{4}$  を満たしながら  $C$  上を動くとき, 点  $R$  は双曲線上を動くことを示し, かつ, その双曲線の方程式を求めよ。 [2008]

〔8〕  $xy$  平面上で, 2 次曲線  $C: x^2 + ay^2 + by = 0$  が直線  $L: y = 2x - 1$  に点  $P$  で接している。ただし,  $a \neq -\frac{1}{4}$  とする。

- (1)  $a$  と  $b$  の関係式を求めよ。
- (2)  $C$  が楕円, 放物線, 双曲線となるそれぞれの場合に,  $b$  の値の範囲を求めよ。
- (3)  $C$  が楕円となる場合の接点  $P$  の存在範囲を求め,  $xy$  平面上に図示せよ。 [2007]



9  $xy$  平面において、媒介変数  $t$  を用いて、 $x = 2\left(t + \frac{1}{t} + 1\right)$ ,  $y = t - \frac{1}{t}$  と表される曲線を  $C$  とする。

- (1) 曲線  $C$  の方程式を求め、その概形をかけ。
- (2) 点  $(a, 0)$  を通り曲線  $C$  に接する直線があるような  $a$  の値の範囲と、そのときの接線の方程式をすべて求めよ。 [2006]

10 実数  $a$  に対して、曲線  $C_a$  を方程式  $(x-a)^2 + ay^2 = a^2 + 3a + 1$  によって定める。

- (1)  $C_a$  は  $a$  の値と無関係に 4 つの定点を通ることを示し、その 4 定点の座標を求めよ。
- (2)  $a$  が正の実数全体を動くとき、 $C_a$  が通過する範囲を図示せよ。 [2005]

11 楕円  $C: \frac{x^2}{3} + y^2 = 1$  上の点で、 $x \geq 0$  の範囲にあり、定点  $A(0, -1)$  との距離が最大となる点を  $P$  とする。

- (1) 点  $P$  の座標と線分  $AP$  の長さを求めよ。
- (2) 点  $Q$  は楕円  $C$  上を動くとする。  $\triangle APQ$  の面積が最大となるとき、点  $Q$  の座標および  $\triangle APQ$  の面積を求めよ。 [2004]

12 2 点  $(0, 1)$ ,  $(0, -1)$  を焦点とする双曲線  $C_1$  と 2 点  $(1, 0)$ ,  $(-1, 0)$  を焦点とする楕円  $C_2$  は 2 点  $(0, \frac{1}{2})$ ,  $(0, -\frac{1}{2})$  のみを共有している。

- (1)  $C_1$  と  $C_2$  の方程式を、それぞれ求めよ。
- (2)  $C_1$  と漸近線を共有し、 $C_1$  と異なる双曲線を  $C_3$  とする。  $C_2$  と  $C_3$  が 2 点のみを共有するとき、 $C_3$  の方程式を求めよ。 [2003]

13  $a$  を正の実数とする。曲線  $C_a$  を極方程式  $r = 2a \cos(a - \theta)$  によって定める。このとき、次の問いに答えよ。

- (1)  $C_a$  は円になることを示し、その中心と半径を求めよ。
- (2)  $C_a$  が直線  $y = -x$  に接するような  $a$  をすべて求めよ。 [2002]

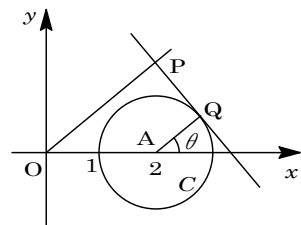
**14**  $C$  を双曲線  $2x^2 - 2y^2 = 1$  とする。  $l, m$  を点  $(1, 0)$  を通り、  $x$  軸とそれぞれ  $\theta, \theta + \frac{\pi}{4}$  の角をなす 2 直線とする。ここで  $\theta$  は  $\frac{\pi}{4}$  の整数倍でないとする。

- (1) 直線  $l$  は双曲線  $C$  と相異なる 2 点  $P, Q$  で交わることを示せ。
  - (2)  $PQ^2$  を、  $\theta$  を用いて表せ。
  - (3) 直線  $m$  と曲線  $C$  の交点を  $R, S$  とするとき、  $\frac{1}{PQ^2} + \frac{1}{RS^2}$  は  $\theta$  によらない定数となることを示せ。
- [2001]

**15** 次の問いに答えよ。

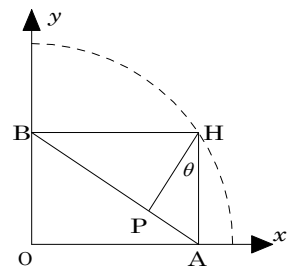
- (1) 点  $(3, 0)$  を通り、円  $(x+3)^2 + y^2 = 4$  と互いに外接する円の中心  $(X, Y)$  の軌跡を求めよ。
  - (2) (1)の軌跡上の点と定点  $(0, a)$  との距離の最小値を求めよ。
- [2000]

**16**  $xy$  平面上において、点  $A(2, 0)$  を中心とする半径 1 の円を  $C$  とする。  $C$  上の点  $Q$  における  $C$  の接線に原点  $O(0, 0)$  から下ろした垂線の足を  $P$  とする。図のように  $x$  軸と線分  $AQ$  のなす角を  $\theta$  とする。ただし、  $\theta$  は  $-\pi < \theta \leq \pi$  を動くものとする。



- (1) 点  $P(x, y)$  の座標  $(x, y)$  を  $\theta$  を用いて表せ。
  - (2) 点  $P(x, y)$  の  $x$  座標が最小になるとき、  $P$  の座標  $(x, y)$  を求めよ。
  - (3) 直線  $x = k$  が点  $P$  の軌跡と相異なる 4 点で交わるとき、  $k$  のとりうる値の範囲を求めよ。
- [1999]

**17**  $xy$  平面の第 1 象限内の点  $H$  が原点  $O$  を中心とする半径  $a$  の円周上にある。点  $H$  から  $x$  軸、  $y$  軸におろした垂線の足をそれぞれ  $A, B$  とし、さらに点  $H$  から線分  $AB$  におろした垂線の足を  $P$  とする。線分  $HP$  の長さを  $l$ 、  $\angle AHP = \theta$  とするとき、 次の問いに答えよ。



- (1)  $l$  を  $a$  と  $\theta$  で表せ。
  - (2) 点  $P(x, y)$  の座標  $(x, y)$  を  $a$  と  $\theta$  で表せ。
  - (3) 点  $H$  が円周上を動くとき、線分  $OP$  の長さの最小値を求めよ。
- [1998]

■ 極限 |||||

1 数列  $\{a_n\}$  を  $a_n = \frac{1}{2^n}$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) で定める。以下の問いに答えよ。

- (1)  $t > 0$  のとき、 $1 \leq \frac{e^t - 1}{t} \leq e^t$ であることを示せ。
- (2) 数列  $\{x_n\}$ ,  $\{y_n\}$ ,  $\{z_n\}$  を

$$x_n = \log(e^{a_n} + 1), y_n = \log(e^{a_n} - 1), z_n = y_n + \sum_{k=1}^n x_k \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

で定める。 $z_n$  は  $n$  によらない定数であることを示せ。

(3)  $\sum_{k=1}^{\infty} \log\left(\frac{e^{a_k} + 1}{2}\right)$  を求めよ。 [2019]

2  $f(x) = \int_0^x \frac{4\pi}{t^2 + \pi^2} dt$  とし、 $c \geq \pi$  とする。数列  $\{a_n\}$  を  $a_1 = c$ ,  $a_{n+1} = f(a_n)$  ( $n=1, 2, \dots$ ) で定める。

- (1)  $f(\pi)$  を求めよ。また、 $x \geq \pi$  のとき、 $0 < f'(x) \leq \frac{2}{\pi}$  が成り立つことを示せ。
- (2) すべての自然数  $n$  に対して、 $a_n \geq \pi$  が成り立つことを示せ。
- (3) すべての自然数  $n$  に対して、 $|a_{n+1} - \pi| \leq \frac{2}{\pi} |a_n - \pi|$  が成り立つことを示せ。また、 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n$  を求めよ。 [2018]

3  $xy$  平面において、 $x$  座標と  $y$  座標がともに整数である点を格子点という。また、実数  $a$  に対して、 $a$  以下の最大の整数を  $[a]$  で表す。記号  $[ ]$  をガウス記号という。以下の問いでは  $N$  を自然数とする。

- (1)  $n$  を  $0 \leq n \leq N$  を満たす整数とする。点  $(n, 0)$  と点  $(n, N \sin(\frac{\pi n}{2N}))$  を結ぶ線分上にある格子点の個数をガウス記号を用いて表せ。
- (2) 直線  $y = x$  と、 $x$  軸、および直線  $x = N$  で囲まれた領域 (境界を含む) にある格子点の個数を  $A(N)$  とおく。このとき  $A(N)$  を求めよ。
- (3) 曲線  $y = N \sin(\frac{\pi x}{2N})$  ( $0 \leq x \leq N$ ) と、 $x$  軸、および直線  $x = N$  で囲まれた領域 (境界を含む) にある格子点の個数を  $B(N)$  とおく。(2) の  $A(N)$  に対して  $\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{B(N)}{A(N)}$  を求めよ。 [2017]

4  $\triangle PQR$  において  $\angle RPQ = \theta$ ,  $\angle PQR = \frac{\pi}{2}$  と

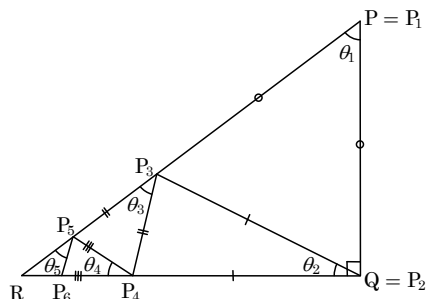
する。点  $P_n$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) を次で定める。

$$P_1 = P, P_2 = Q, P_n P_{n+2} = P_n P_{n+1}$$

ただし、点  $P_{n+2}$  は線分  $P_n R$  上にあるものとする。

実数  $\theta_n$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) を、 $\theta_n = \angle P_{n+1} P_n P_{n+2}$

( $0 < \theta_n < \pi$ ) で定める。



(1)  $\theta_2, \theta_3$  を  $\theta$  を用いて表せ。

(2)  $\theta_{n+1} + \frac{\theta_n}{2}$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) は  $n$  によらない定数であることを示せ。

(3)  $\lim_{n \rightarrow \infty} \theta_n$  を求めよ。

[2016]

5 曲線  $C: y = \frac{1}{x+2}$  ( $x > -2$ ) を考える。曲線  $C$  上の点  $P_1(0, \frac{1}{2})$  における接線を

$l_1$  とし、 $l_1$  と  $x$  軸との交点を  $Q_1$ 、点  $Q_1$  を通り  $x$  軸と垂直な直線と曲線  $C$  との交点を  $P_2$  とおく。以下同様に、自然数  $n$  ( $n \geq 2$ ) に対して、点  $P_n$  における接線を  $l_n$  とし、 $l_n$  と  $x$  軸との交点を  $Q_n$ 、点  $Q_n$  を通り  $x$  軸と垂直な直線と曲線  $C$  との交点を  $P_{n+1}$  とおく。

(1)  $l_1$  の方程式を求めよ。

(2)  $P_n$  の  $x$  座標を  $x_n$  ( $n \geq 1$ ) とする。 $x_{n+1}$  を  $x_n$  を用いて表し、 $x_n$  を  $n$  を用いて表せ。

(3)  $l_n$ ,  $x$  軸,  $y$  軸で囲まれる三角形の面積  $S_n$  を求め、 $\lim_{n \rightarrow \infty} S_n$  を求めよ。 [2012]

6  $e$  は自然対数の底とする。 $t > e$  において関数  $f(t)$ ,  $g(t)$  を次のように定める。

$$f(t) = \int_1^e \frac{t^2 \log x}{t-x} dx, \quad g(t) = \int_1^e \frac{x^2 \log x}{t-x} dx$$

(1)  $f(t) - g(t)$  を  $t$  の 1 次式で表せ。

(2)  $1 \leq x \leq e$  かつ  $t > e$  のとき  $\frac{1}{t-x} \leq \frac{1}{t-e}$  が成り立つことを用いて、 $\lim_{t \rightarrow \infty} g(t) = 0$  を示せ。

(3)  $\lim_{t \rightarrow \infty} (f(t) - \frac{bt^2}{t-a}) = 0$  となる定数  $a, b$  を求めよ。

[2008]

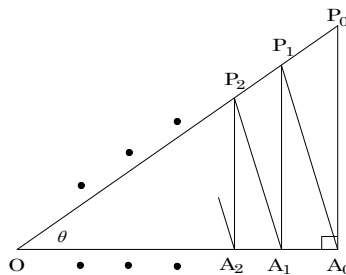
**7** 曲線  $C: y = e^x$  上の異なる 2 点  $A(a, e^a), P(t, e^t)$  における  $C$  のそれぞれの法線の交点を  $Q$  として、線分  $AQ$  の長さを  $L_a(t)$  で表す。さらに、 $r(a) = \lim_{t \rightarrow a} L_a(t)$

と定義する。

- (1)  $r(a)$  を求めよ。
- (2)  $a$  が実数全体を動くとき、 $r(a)$  の最小値を求めよ。

[2005]

**8** 直角三角形  $A_0P_0O$  の斜辺  $OP_0$  上に点の列  $P_1, P_2, \dots, P_n, \dots$  を、辺  $OA_0$  上に点の列  $A_1, A_2, \dots, A_n, \dots$  を、それぞれ次のように定める。まず、 $OP_1 = OA_0$  とする。次に点  $P_1$  から  $OA_0$  におろした垂線の足を  $A_1$  とする。次に  $OP_2 = OA_1$  とし、点  $P_2$  から  $OA_0$  におろした垂線の足を  $A_2$  とする。以下、この操作をくり返す。



$\angle P_0OA_0 = \theta, OA_0 = a$  とし、 $\triangle A_{n-1}P_{n-1}P_n$  の面積を  $S_n$  とする。 $S(\theta) = S_1 + S_2 + \dots + S_n + \dots$  とするとき、次の問いに答えよ。

- (1)  $S_1$  を  $a$  と  $\theta$  で表せ。
- (2)  $S(\theta)$  を  $a$  と  $\theta$  で表せ。
- (3)  $\lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{S(\theta)}{\theta}$  を求めよ。

[1998]

■ 微分法 |||||

**1**  $a, b, c$  を実数とし、 $\beta, m$  をそれぞれ  $0 < \beta < 1, m > 0$  を満たす実数とする。また、関数  $f(x) = x^3 + ax^2 + bx + c$  は  $x = \beta, -\beta$  で極値をとり、 $f(-1) = f(\beta) = -m, f(1) = f(-\beta) = m$  を満たすとする。

- (1)  $a, b, c$  および  $\beta, m$  の値を求めよ。
- (2) 関数  $g(x) = x^3 + px^2 + qx + r$  は、 $-1 \leq x \leq 1$  に対して  $f(-1) \leq g(x) \leq f(1)$  を満たすとする。 $h(x) = f(x) - g(x)$  とおくと、 $h(-1), h(-\beta), h(\beta), h(1)$  それぞれと 0 との大きさを比較することにより、 $h(x)$  を求めよ。

[2017]

2 関数  $f(x) = 2x^2 - 9x + 14 - \frac{9}{x} + \frac{2}{x^2}$  ( $x > 0$ ) について以下の問いに答えよ。

- (1) 方程式  $f(x) = 0$  の解をすべて求めよ。
- (2) 関数  $f(x)$  のすべての極値を求めよ。
- (3) 曲線  $y = f(x)$  と  $x$  軸とで囲まれた部分の面積を求めよ。 [2017]

3  $k$  を実数とする。  $xy$  平面の曲線  $C_1 : y = x^2$  と  $C_2 : y = -x^2 + 2kx + 1 - k^2$  が異なる共有点  $P, Q$  をもつとする。ただし点  $P, Q$  の  $x$  座標は正であるとする。また、原点を  $O$  とする。

- (1)  $k$  のとりうる値の範囲を求めよ。
- (2)  $k$  が(1)の範囲を動くとき、 $\triangle OPQ$  の重心  $G$  の軌跡を求めよ。
- (3)  $\triangle OPQ$  の面積を  $S$  とするとき、 $S^2$  を  $k$  を用いて表せ。
- (4)  $k$  が(1)の範囲を動くとする。 $\triangle OPQ$  の面積が最大となるような  $k$  の値と、そのときの重心  $G$  の座標を求めよ。 [2016]

4  $f(x) = \log(e^x + e^{-x})$  とおく。曲線  $y = f(x)$  の点  $(t, f(t))$  における接線を  $l$  とする。直線  $l$  と  $y$  軸の交点の  $y$  座標を  $b(t)$  とおく。

- (1) 次の等式を示せ。  $b(t) = \frac{2te^{-t}}{e^t + e^{-t}} + \log(1 + e^{-2t})$
- (2)  $x \geq 0$  のとき、 $\log(1+x) \leq x$  であることを示せ。
- (3)  $t \geq 0$  のとき、 $b(t) \leq \frac{2}{e^t + e^{-t}} + e^{-2t}$  であることを示せ。
- (4)  $b(0) = \lim_{x \rightarrow \infty} \int_0^x \frac{4t}{(e^t + e^{-t})^2} dt$  であることを示せ。 [2015]

5 関数  $f(x) = e^{-\frac{x^2}{2}}$  を  $x > 0$  で考える。  $y = f(x)$  のグラフの点  $(a, f(a))$  における接線を  $l_a$  とし、 $l_a$  と  $y$  軸との交点を  $(0, Y(a))$  とする。以下の問いに答えよ。ただし、実数  $k$  に対して  $\lim_{t \rightarrow \infty} t^k e^{-t} = 0$  であることは証明なしで用いてよい。

- (1)  $Y(a)$  がとりうる値の範囲を求めよ。
- (2)  $0 < a < b$  である  $a, b$  に対して、 $l_a$  と  $l_b$  が  $x$  軸上で交わるとき、 $a$  のとりうる値の範囲を求め、 $b$  を  $a$  で表せ。
- (3) (2)の  $a, b$  に対して、 $Z(a) = Y(a) - Y(b)$  とおく。  $\lim_{a \rightarrow +0} Z(a)$  および  $\lim_{a \rightarrow +0} \frac{Z'(a)}{a}$  を求めよ。 [2014]

6  $f(x) = \frac{1}{3}x^3 - \frac{1}{2}ax^2$  とおく。ただし  $a > 0$  とする。

- (1)  $f(-1) \leq f(3)$  となる  $a$  の範囲を求めよ。
- (2)  $f(x)$  の極小値が  $f(-1)$  以下になる  $a$  の範囲を求めよ。
- (3)  $-1 \leq x \leq 3$  における  $f(x)$  の最小値を  $a$  を用いて表せ。 [2010]

7  $n$  を自然数とし、1 から  $n$  までの自然数の積を  $n!$  で表す。このとき以下の問いに答えよ。

- (1) 単調に増加する連続関数  $f(x)$  に対して、不等式  $\int_{k-1}^k f(x) dx \leq f(k)$  を示せ。
- (2) 不等式  $\int_1^n \log x dx \leq \log n!$  を示し、不等式  $n^n e^{1-n} \leq n!$  を導け。
- (3)  $x \geq 0$  に対して、不等式  $x^n e^{1-x} \leq n!$  を示せ。 [2010]

8  $a \geq b > 0, x \geq 0$  とし、 $n$  は自然数とする。次の不等式を示せ。

- (1)  $0 \leq e^x - (1+x) \leq \frac{x^2 e^x}{2}$
- (2)  $a^n - b^n \leq n(a-b)a^{n-1}$
- (3)  $e^x - \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n \leq \frac{x^2 e^x}{2n}$  [2006]

9 関数  $f(x)$  を

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\log|x|}{x} & (|x| > 1) \\ ax^3 + bx^2 + cx + d & (|x| \leq 1) \end{cases}$$

と定める。ただし、 $a, b, c, d$  は定数とし、 $f(x)$  は  $x = \pm 1$  において微分可能とする。なお、 $\log$  は  $e = 2.718\dots$  を底とする自然対数である。

- (1)  $a, b, c, d$  の値を求めよ。
- (2)  $f(x)$  の最大値を求めよ。 [2004]

**10** 関数  $f(x) = \frac{x}{x^2 + ax + b}$  が定める曲線  $y = f(x)$  は原点で直線  $y = x$  に接している。

- (1)  $b$  の値を求めよ。
- (2)  $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x)$ ,  $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x)$  を求めよ。
- (3)  $f(x)$  が最大値と最小値をもつような  $a$  の値の範囲を求め、そのときの  $f(x)$  の最大値と最小値を求めよ。
- (4)  $f(x)$  が最大値をもつが最小値はもたないとき、 $a$  の値と  $f(x)$  の最大値を求めよ。

[2003]

**11**  $a$  を正の定数とし、関数  $f(x)$  を以下のように定める。

$$f(x) = \frac{\log x}{(1+x)^a} \quad (x > 0)$$

このとき、次の問いに答えよ。

- (1)  $e^{\frac{1}{a}}$  と  $e^{\frac{2}{a}}$  の間に  $f'(c) = 0$  となる  $c$  が存在することを示せ。
- (2)  $f'(c) = 0$  となる  $c$  はただ 1 つであり、関数  $f(x)$  は  $x = c$  で最大値をとることを示せ。

[2002]

**12** 曲線  $y = x(1-x)$  ( $0 \leq x \leq \frac{1}{2}$ ) を  $y$  軸のまわりに回転してできる容器に、単位時間あたり一定の割合  $V$  で水を注ぐ。

- (1) 水面の上昇する速度  $u$  を水面の高さ  $h$  の関数として表せ。
- (2) 空の容器に水がいっぱいになるまでの時間を求めよ。

[2001]

**13** 関数  $f_n(x) = \sin^{n+2}x + 2\cos^{n+2}x$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) について、次の問いに答えよ。

- (1) 閉区間  $\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$  における  $f_n(x)$  の最大値  $M_n$  と最小値  $L_n$  を求めよ。
- (2)  $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{L_n}$  を求めよ。

[2000]

**14** すべての正の実数  $x$  について  $x^{\sqrt{a}} \leq a^{\sqrt{x}}$  となる正の実数  $a$  を求めよ。

[2000]



**15**  $e$  を自然対数の底とする。関数  $f(x) = \frac{x - e^{x-1}}{1 + e^x}$  について、次の問いに答えよ。

(1)  $g(x) = (1 + e^x)^2 f'(x)$  とおくと、 $\lim_{x \rightarrow +\infty} g(x)$  および  $\lim_{x \rightarrow -\infty} g(x)$  を求めよ。必要ならば、 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x}{e^x} = 0$  を用いてもよい。

(2)  $f(x)$  はただ 1 つの極値をもち、さらにそれが極大値であることを示せ。 [1999]

**16** 関数  $f(x)$ ,  $g(x)$  を  $f(x) = \int_0^x e^{-t} \sin t dt$ ,  $g(x) = \int_0^x e^{-t} \cos t dt$  と定める。このとき、 $x \geq 0$  における  $f(x)$  の最大値と  $g(x)$  の最小値を求めよ。 [1999]

■ 積分法 |||||

**1** 自然数  $n$  に対し、関数  $F_n(x) = \int_x^{2x} e^{-t^n} dt$  ( $x \geq 0$ ) を考える。

(1) 関数  $F_n(x)$  ( $x \geq 0$ ) はただ 1 つの点で最大値をとることを示し、 $F_n(x)$  が最大となるような  $x$  の値  $a_n$  を求めよ。

(2) (1) で求めた  $a_n$  に対し、極限值  $\lim_{n \rightarrow \infty} \log a_n$  を求めよ。 [2011]

**2**  $f(x)$  を整式で表される関数とし、 $g(x) = \int_0^x e^t f(t) dt$  とおく。任意の実数  $x$  について、 $x(f(x) - 1) = 2 \int_0^x e^{-t} g(t) dt$  が成り立つとする。

(1)  $x f''(x) + (x + 2) f'(x) - f(x) = 1$  が成り立つことを示せ。

(2)  $f(x)$  は定数または 1 次式であることを示せ。

(3)  $f(x)$  および  $g(x)$  を求めよ。 [2009]

**3** (1)  $\int_0^\pi x^2 \cos^2 x dx$  を求めよ。

(2) 定数  $a$  に対して、 $f(x) = ax \sin x + x + \frac{\pi}{2}$  とおく。このとき、不等式

$$\int_0^\pi \{f'(x)\}^2 dx \geq f\left(\frac{\pi}{2}\right)$$

を満たす  $a$  の範囲を求めよ。ただし、 $f'(x)$  は  $f(x)$  の導関数とする。 [2007]

- 4 次の関係式を満たす関数  $f(x)$  がただ 1 つ存在するように、定数  $a$  の値を求めよ。

$$f(x) = ax + \frac{1}{4} \left( \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(t) \sin t dt \right)^4 \quad [2005]$$

- 5  $f(x) = \sin^3 x$  とする。

(1)  $f'(0)$  および  $f'(2\pi)$  を求めよ。

(2)  $\int_0^{2\pi} f(x) dx$  を求めよ。

(3)  $p(x)$  を  $x$  の 2 次式とすると、 $\int_0^{2\pi} p(x) f''(x) dx = 0$  を示せ。 [2004]

- 6 実数全体で定義された微分可能な関数  $f(x)$  が、次の 2 つの条件(i), (ii) を満たしている。

(i) すべての  $x$  について、 $f(x) > 0$  である。

(ii) すべての  $x, y$  について、 $f(x+y) = f(x)f(y)e^{-xy}$  が成り立つ。

(1)  $f(0) = 1$  を示せ。

(2)  $g(x) = \log f(x)$  とする。このとき、 $g'(x) = f'(0) - x$  が成り立つことを示せ。

(3)  $f'(0) = 2$  となるような  $f(x)$  を求めよ。 [2003]

- 7  $x \geq 0$  で定義された連続関数  $f(x)$  に対して、関数  $g(x)$  ( $x > 0$ ) を次のように定める。

$$g(x) = \int_0^x f(t) dt \quad (0 < x < 1), \quad g(x) = \int_{x-1}^x f(t) dt \quad (x \geq 1)$$

このとき、次の問いに答えよ。

(1)  $x \neq 1$  のにおける導関数  $g'(x)$  を求めよ。

(2)  $f(x) = 2\pi \cos(2\pi x)$  のとき、 $g(x)$  を求めよ。

(3) 次のような  $g(x)$  を定める  $f(x)$  を求めよ。

$$g(x) = \sin(2\pi x) + x \quad (0 < x < 1), \quad g(x) = 1 \quad (x \geq 1) \quad [2002]$$

- 8  $f(x)$  を  $0 \leq x \leq 1$  において連続かつ  $0 < x < 1$  において微分可能で  $f'(x) > 0$  を満たす関数とする。 $0 < t < 1$  に対し、 $I(t) = \int_0^1 |f(t) - f(x)| x dx$  とおく。

(1) 導関数  $I'(t)$  を求めよ。

(2)  $I(t)$  が最小となる  $t$  の値を求めよ。 [2001]

9 (1)  $x > 0$  に対して次の不等式を示せ。

$$x - \frac{x^2}{2} < \log(1+x) < x$$

(2)  $f(x)$  を  $0 \leq x \leq 1$  で連続で、 $f(x) \geq 0$  を満たす関数とする。

$$a_n = \left(1 + \frac{1}{n} f\left(\frac{1}{n}\right)\right) \left(1 + \frac{1}{n} f\left(\frac{2}{n}\right)\right) \cdots \left(1 + \frac{1}{n} f\left(\frac{n}{n}\right)\right), \quad I = \int_0^1 f(x) dx$$

とおくとき、 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = e^I$  であることを示せ。

[2001]

10  $e$  を自然対数の底とするとき、次の問いに答えよ。

(1)  $x \geq 0$  のとき、不等式  $e^x \geq 1+x$  を示せ。

(2)  $\tan \theta = M$  ( $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ ) のとき、等式  $\int_0^M \frac{1}{1+x^2} dx = \theta$  を示せ。

(3)  $M > 0$  のとき、不等式  $\int_0^M \frac{1}{e^{x^2}} dx < \frac{\pi}{2}$  を示せ。

[2000]

11 関数  $f(x) = \int_x^{2x+1} \frac{1}{t^2+1} dt$  について次の問いに答えよ。

(1)  $f(x) = 0$  となる  $x$  を求めよ。

(2)  $f'(x) = 0$  となる  $x$  を求めよ。

(3)  $f(x)$  の最大値を求めよ。

[1998]

■ 積分の応用 |||||

1  $0 \leq x \leq \pi$  の範囲において、関数  $f(x)$ ,  $g(x)$  を

$$f(x) = 1 + \sin x, \quad g(x) = -1 - \cos x$$

と定める。

(1)  $0 \leq x \leq \pi$  の範囲において、 $|f(x)| = |g(x)|$  を満たす  $x$  を求めよ。

(2) 曲線  $y = f(x)$ , 曲線  $y = g(x)$ , 直線  $x = 0$  および直線  $x = \pi$  で囲まれる部分を、 $x$  軸のまわりに 1 回転してできる立体の体積を求めよ。

[2019]

2 放物線  $C: y = x^2 + ax + b$  が 2 直線  $l_1: y = px$  ( $p > 0$ ),  $l_2: y = qx$  ( $q < 0$ ) と接している。また,  $C$  と  $l_1, l_2$  で囲まれた図形の面積を  $S$  とする。

- (1)  $a, b$  を  $p, q$  を用いてそれぞれ表せ。
- (2)  $S$  を  $p, q$  を用いて表せ。
- (3)  $l_1, l_2$  が直交するように  $p, q$  が動くとき,  $S$  の最小値を求めよ。 [2018]

3 2 つの曲線  $C_1: y = \frac{1}{\sqrt{2} \sin x}$  ( $0 < x < \pi$ ),  $C_2: y = \sqrt{2}(\sin x - \cos x)$

( $0 < x < \pi$ ) について以下の問いに答えよ。

- (1) 曲線  $C_1$  と曲線  $C_2$  の共有点の  $x$  座標を求めよ。
- (2) 曲線  $C_1$  と曲線  $C_2$  とで囲まれた図形を  $x$  軸のまわりに 1 回転させてできる回転体の体積  $V$  が  $\pi^2$  であることを示せ。 [2018]

4 関数  $f(x) = 2\sqrt{x}e^{-x}$  ( $x \geq 0$ ) について次の問いに答えよ。

- (1)  $f'(a) = 0, f''(b) = 0$  を満たす  $a, b$  を求め,  $y = f(x)$  のグラフの概形を描け。  
ただし,  $\lim_{x \rightarrow \infty} \sqrt{x}e^{-x} = 0$  であることは証明なしで用いてよい。
- (2)  $k \geq 0$  のとき  $V(k) = \int_0^k xe^{-2x} dx$  を  $k$  を用いて表せ。
- (3) (1) で求めた  $a, b$  に対して曲線  $y = f(x)$  と  $x$  軸および 2 直線  $x = a, x = b$  で囲まれた図形を  $x$  軸のまわりに 1 回転してできる回転体の体積を求めよ。 [2016]

5  $f(x), g(x), h(x)$  を

$$f(x) = \frac{1}{2}(\cos x - \sin x), \quad g(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin\left(x + \frac{\pi}{4}\right), \quad h(x) = \sin x$$

とおく。3 つの曲線  $y = f(x), y = g(x), y = h(x)$  の  $0 \leq x \leq \frac{\pi}{2}$  を満たす部分を, それぞれ  $C_1, C_2, C_3$  とする。

- (1)  $C_2$  と  $C_3$  の交点の座標を求めよ。
- (2)  $C_1$  と  $C_3$  の交点の  $x$  座標を  $\alpha$  とする。  $\sin \alpha, \cos \alpha$  の値を求めよ。
- (3)  $C_1, C_2, C_3$  によって囲まれる図形の面積を求めよ。 [2015]

6  $xy$  平面上の曲線  $C: y = x \sin x + \cos x - 1$  ( $0 < x < \pi$ ) に対して、以下の問いに答えよ。ただし  $3 < \pi < \frac{16}{5}$  であることは証明なしで用いてよい。

- (1) 曲線  $C$  と  $x$  軸の交点はただ 1 つであることを示せ。
- (2) 曲線  $C$  と  $x$  軸の交点を  $A(\alpha, 0)$  とする。  $\alpha > \frac{2}{3}\pi$  であることを示せ。
- (3) 曲線  $C$ ,  $y$  軸および直線  $y = \frac{\pi}{2} - 1$  で囲まれる部分の面積を  $S$  とする。また、 $xy$  平面の原点  $O$ , 点  $A$  および曲線  $C$  上の点  $B(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} - 1)$  を頂点とする三角形  $OAB$  の面積を  $T$  とする。  $S < T$  であることを示せ。 [2014]

7  $n$  は自然数とする。

- (1)  $1 \leq k \leq n$  を満たす自然数  $k$  に対して

$$\int_{\frac{k-1}{2n}\pi}^{\frac{k}{2n}\pi} \sin 2nt \cos t dt = (-1)^{k+1} \frac{2n}{4n^2 - 1} \left( \cos \frac{k}{2n}\pi + \cos \frac{k-1}{2n}\pi \right)$$

が成り立つことを示せ。

- (2) 媒介変数  $t$  によって、

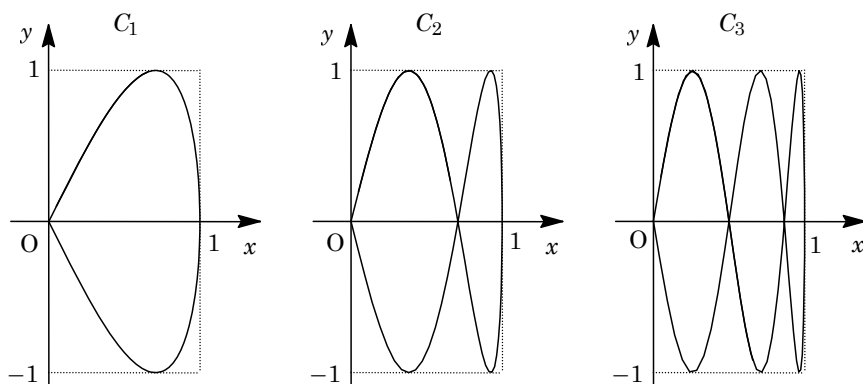
$$x = \sin t, \quad y = \sin 2nt \quad (0 \leq t \leq \pi)$$

と表される曲線  $C_n$  で囲まれた部分の面積  $S_n$  を求めよ。ただし必要なら

$$\sum_{k=1}^{n-1} \cos \frac{k}{2n}\pi = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\tan \frac{\pi}{4n}} - 1 \right) \quad (n \geq 2)$$

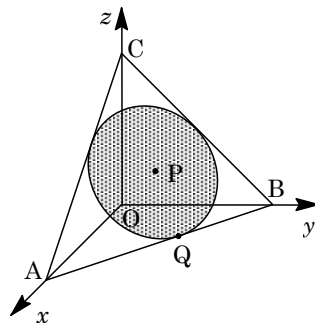
を用いてよい。

- (3) 極限值  $\lim_{n \rightarrow \infty} S_n$  を求めよ。



[2013]

8  $xyz$  空間において、点  $A(1, 0, 0)$ ,  $B(0, 1, 0)$ ,  $C(0, 0, 1)$  を通る平面上にあり、正三角形  $ABC$  に内接する円板を  $D$  とする。円板  $D$  の中心を  $P$ , 円板  $D$  と辺  $AB$  の接点を  $Q$  とする。



- (1) 点  $P$  と点  $Q$  の座標を求めよ。
- (2) 円板  $D$  が平面  $z=t$  と共有点をもつ  $t$  の範囲を求めよ。
- (3) 円板  $D$  と平面  $z=t$  の共通部分が線分であるとき、その線分の長さを  $t$  を用いて表せ。
- (4) 円板  $D$  を  $z$  軸のまわりに回転してできる立体の体積を求めよ。 [2013]

9 曲線  $C: y = \log x$  ( $x > 0$ ) を考える。自然数  $n$  に対して、曲線  $C$  上に点  $P(e^n, n)$ ,  $Q(e^{2n}, 2n)$  をとり、 $x$  軸上に点  $A(e^n, 0)$ ,  $B(e^{2n}, 0)$  をとる。四角形  $APQB$  を  $x$  軸のまわりに 1 回転してできる立体の体積を  $V(n)$  とする。また、線分  $PQ$  と曲線  $C$  で囲まれる部分を  $x$  軸のまわりに 1 回転させてできる立体の体積を  $S(n)$  とする。

- (1)  $V(n)$  を  $n$  の式で表せ。
- (2)  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{S(n)}{V(n)}$  を求めよ。 [2012]

10  $\alpha$  を  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$  を満たす定数とする。円  $C: x^2 + (y + \sin \alpha)^2 = 1$  および、その中心を通る直線  $l: y = (\tan \alpha)x - \sin \alpha$  を考える。このとき、以下の問いに答えよ。

- (1) 直線  $l$  と円  $C$  の 2 つの交点の座標を  $\alpha$  を用いて表せ。
- (2) 等式  $2 \int_{\cos \alpha}^1 \sqrt{1-x^2} dx + \int_{-\cos \alpha}^{\cos \alpha} \sqrt{1-x^2} dx = \frac{\pi}{2}$  が成り立つことを示せ。
- (3) 連立不等式  $y \leq (\tan \alpha)x - \sin \alpha$ ,  $x^2 + (y + \sin \alpha)^2 \leq 1$  の表す  $xy$  平面上の図形を  $D$  とする。図形  $D$  を  $x$  軸のまわりに 1 回転させてできる立体の体積を求めよ。

[2011]

**11** 3つの曲線

$$C_1: y = \sin x \left(0 \leq x < \frac{\pi}{2}\right), \quad C_2: y = \cos x \left(0 \leq x < \frac{\pi}{2}\right), \quad C_3: y = \tan x \left(0 \leq x < \frac{\pi}{2}\right)$$

について、以下の問いに答えよ。

- (1)  $C_1$  と  $C_2$  の交点,  $C_2$  と  $C_3$  の交点,  $C_3$  と  $C_1$  の交点のそれぞれについて  $y$  座標を求めよ。
- (2)  $C_1, C_2, C_3$  によって囲まれる図形の面積を求めよ。 [2010]

**12**  $xyz$  空間内において、 $yz$  平面上で放物線  $z = y^2$  と直線  $z = 4$  で囲まれる平面図形を  $D$  とする。点  $(1, 1, 0)$  を通り  $z$  軸に平行な直線を  $l$  とし、 $l$  のまわりに  $D$  を 1 回転させてできる立体を  $E$  とする。

- (1)  $D$  と平面  $z = t$  との交わりを  $D_t$  とする。ただし  $0 \leq t \leq 4$  とする。点  $P$  が  $D_t$  上を動くとき、点  $P$  と点  $(1, 1, t)$  との距離の最大値, 最小値を求めよ。
- (2) 平面  $z = t$  による  $E$  の切り口の面積  $S(t)$  ( $0 \leq t \leq 4$ ) を求めよ。
- (3)  $E$  の体積  $V$  を求めよ。 [2009]

**13**  $xyz$  空間内の点  $P(1, 0, 1)$  と、 $xy$  平面上の円  $C: x^2 + (y-2)^2 = 1$  に属する点  $Q(\cos \theta, 2 + \sin \theta, 0)$  を考える。

- (1) 直線  $PQ$  と平面  $z = t$  の交点の座標を  $(\alpha, \beta, t)$  とするとき、 $\alpha^2 + \beta^2$  を  $t$  と  $\theta$  で表せ。
- (2) 線分  $PQ$  を  $z$  軸のまわりに 1 回転させてできる曲面と平面  $z = 0, z = 1$  によって囲まれる立体の体積を  $\theta$  で表せ。
- (3)  $Q$  が  $C$  上を 1 周するとき、(2) で求めた体積の最大値, 最小値を求めよ。 [2008]

**14** 関数  $f(x) = b + \frac{1}{b} - e^{ax} - e^{-ax}$  について、以下の問いに答えよ。ただし、 $a > 0, b > 1$  とする。

- (1)  $f(x) \geq 0$  を満たす  $x$  の範囲を求めよ。
- (2) 曲線  $y = \sqrt{f(x)}$  と  $x$  軸で囲まれた図形を  $x$  軸のまわりに 1 回転させてできる回転体の体積  $V$  を求めよ。
- (3)  $a = b \log b$  のとき、(2) で求めた体積  $V$  を  $V(b)$  と表す。このとき、 $\lim_{b \rightarrow \infty} V(b) = 2\pi$  となることを示せ。 [2007]

**15** 座標空間において、 $|x| \leq z^2$  を満たす点  $(x, y, z)$  全体からなる立体を  $R$  とする。点  $(0, 0, 1)$  を通り、 $x$  軸と平行な直線を  $l$  とする。 $l$  を中心軸とする半径 1 の円柱を  $C$  とし、 $R$  と  $C$  の共通部分を  $T$  とする。

(1)  $-1 < h < 1$  を満たす定数  $h$  に対して、点  $(0, 0, 1+h)$  を通り  $z$  軸に垂直な平面による  $T$  の切り口の面積を求めよ。

(2)  $T$  の体積を求めよ。 [2006]

**16** 曲線  $C: y = \sin x$  ( $0 < x < \frac{\pi}{2}$ ) を考える。 $C$  上の点  $P$  における  $C$  の法線を  $l$  とする。

(1) 法線  $l$  が点  $Q(0, 1)$  を通るような点  $P$  がただ 1 つ存在することを示せ。

(2) (1) の条件を満たす点  $P$  に対し、直線  $l$ 、曲線  $C$ 、直線  $y = 1$  で囲まれる部分の面積を  $S_1$  とし、直線  $l$ 、曲線  $C$ 、 $x$  軸で囲まれる部分の面積を  $S_2$  とする。 $S_1$  と  $S_2$  の大きさを比較せよ。 [2005]

**17**  $f(x)$  は  $x \geq 0$  で連続で、 $f(0) = 0$  かつ  $x > 0$  において  $f'(x) > 0$  を満たすとする。 $t > 0$  に対して、曲線  $y = f(x)$  と  $x$  軸および直線  $x = t$  とで囲まれる図形を  $x$  軸のまわりに 1 回転してできる立体の体積を  $X(t)$ 、曲線  $y = f(x)$  と  $y$  軸および直線  $y = f(t)$  とで囲まれる図形を  $y$  軸のまわりに 1 回転してできる立体の体積を  $Y(t)$  とする。また、 $X(0) = Y(0) = 0$  とする。このとき、次を示せ。

(1)  $X'(t) = \pi f(t)^2$ 、 $Y'(t) = \pi t^2 f'(t)$  ( $t > 0$ ) である。

(2)  $f(x)$  が整式でかつ、すべての  $t \geq 0$  に対して  $X(t) = Y(t)$  が成り立つならば、 $f(x) = x$  ( $x \geq 0$ ) である。

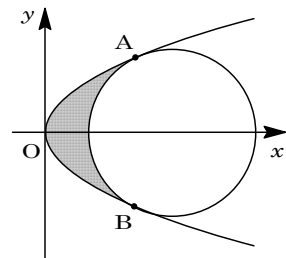
(3)  $f(x) = \frac{x}{1+x}$  ならば、 $X(t) = Y(t)$  ( $t \geq 0$ ) である。 [2004]

**18** 右の図のように、円  $(x-a)^2 + y^2 = r^2$  ( $r > \frac{1}{2}$ ) が放物線  $y^2 = x$  と 2 点  $A, B$  で接している。

(1) 点  $A$  の  $x$  座標および  $a$  を  $r$  で表せ。

(2) 円と放物線で囲まれた部分(網点部分)を  $x$  軸のまわりに回転してできる立体の体積を  $V(r)$  とする。このとき、

$\lim_{r \rightarrow \frac{1}{2}+0} \frac{V(r)}{\left(r - \frac{1}{2}\right)^3}$  を求めよ。 [2003]





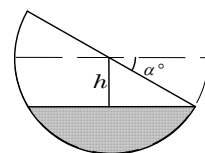
**19** 曲線  $C$  を次の方程式で定める。  $y = \sqrt{x^2 + 4} \ (x \geq 0)$

$C$  上の点  $P$  を通る傾き  $-1$  の直線が  $x$  軸と交わる点の  $x$  座標を  $2t$  とする。このとき、次の問いに答えよ。

- (1) 点  $P$  の  $x$  座標,  $y$  座標を  $t$  で表せ。
- (2) 点  $P$  が  $C$  上を動いたときの  $t$  の最小値を求めよ。
- (3) 原点を  $O$  とし, 線分  $OP$ , 曲線  $C$ ,  $y$  軸で囲まれる図形の面積  $S$  を  $t$  で表せ。

[2002]

**20** 水を満たした半径  $2$  の半球形の容器がある。これを静かに  $\alpha^\circ$  傾けたとき, 水面が  $h$  だけ下がり, こぼれ出た水の量と容器に残った水の量の比が  $11:5$  となった。 $h$  と  $\alpha$  を求めよ。



[1999]

**21** 関数  $f(x) = \frac{e^x}{x} \ (x > 0)$  について次の問いに答えよ。

- (1)  $y = f(x)$  のグラフの概形をかけ。
- (2)  $y = f(x)$  のグラフの  $1 \leq x \leq 2$  に対応する部分, 2 直線  $y = f(1)$ ,  $y = f(2)$ , および  $y$  軸で囲まれた部分を,  $y$  軸のまわりに  $1$  回転してできる回転体の体積を求めよ。

[1998]

## 分野別問題と解答例

関 数／図形と式／図形と計量

ベクトル／整数と数列／論 証

複素数／曲 線／極 限

微分法／積分法／積分の応用

**問 題**

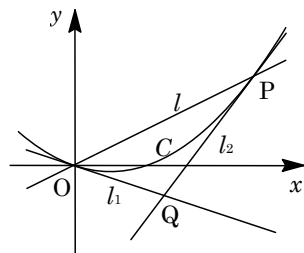
$k > 0$ ,  $0 < \theta < \frac{\pi}{4}$  とする。放物線  $C: y = x^2 - kx$  と直線  $l: y = (\tan \theta)x$  の交点のうち、原点  $O$  と異なるものを  $P$  とする。放物線  $C$  の点  $O$  における接線を  $l_1$  とし、点  $P$  における接線を  $l_2$  とする。直線  $l_1$  の傾きが  $-\frac{1}{3}$  で、直線  $l_2$  の傾きが  $\tan 2\theta$  であるとき、以下の問いに答えよ。

- (1)  $k$  を求めよ。
- (2)  $\tan \theta$  を求めよ。
- (3) 直線  $l_1$  と  $l_2$  の交点を  $Q$  とする。  $\angle PQO = \alpha$  (ただし  $0 \leq \alpha \leq \pi$ ) とするとき、 $\tan \alpha$  を求めよ。 [2019]

**解答例**

(1) 放物線  $C: y = x^2 - kx$  に対して、 $y' = 2x - k$

$C$  の点  $O$  における接線  $l_1$  の傾きが  $-\frac{1}{3}$  より  $-k = -\frac{1}{3}$  となり、 $k = \frac{1}{3}$  である。この値は  $k > 0$  を満たしている。



(2) (1)より、 $C: y = x^2 - \frac{1}{3}x$  で、 $y' = 2x - \frac{1}{3}$

ここで、直線  $l: y = (\tan \theta)x$  と連立すると、

$$x^2 - \frac{1}{3}x = (\tan \theta)x, \quad x(x - \frac{1}{3} - \tan \theta) = 0$$

これより、 $O$  と異なる交点  $P$  の  $x$  座標は、 $x = \frac{1}{3} + \tan \theta$  となる。

すると、点  $P$  における接線  $l_2$  の傾きが  $\tan 2\theta$  から、

$$2\left(\frac{1}{3} + \tan \theta\right) - \frac{1}{3} = \tan 2\theta, \quad \frac{1}{3} + 2\tan \theta = \frac{2\tan \theta}{1 - \tan^2 \theta} \dots\dots(*)$$

そして、 $(1 + 6\tan \theta)(1 - \tan^2 \theta) = 6\tan \theta$  から、 $6\tan^3 \theta + \tan^2 \theta - 1 = 0$  となり、

$$(2\tan \theta - 1)(3\tan^2 \theta + 2\tan \theta + 1) = 0$$

これより  $\tan \theta = \frac{1}{2}$  である。この値は  $0 < \theta < \frac{\pi}{4}$  ( $0 < \tan \theta < 1$ ) を満たしている。

(3)  $x$  軸の正の向きと、 $l_1$ ,  $l_2$  のなす角をそれぞれ  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  とおくと、(\*)より、

$$\tan \theta_1 = -\frac{1}{3}, \quad \tan \theta_2 = \tan 2\theta = \frac{1}{3} + 2 \cdot \frac{1}{2} = \frac{4}{3}$$

ここで、 $l_1$  と  $l_2$  の交点  $Q$  に対し、 $\angle PQO = \alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq \pi$ ) とすると、 $\alpha = \theta_1 - \theta_2$

$$\tan \alpha = \tan(\theta_1 - \theta_2) = \frac{\tan \theta_1 - \tan \theta_2}{1 + \tan \theta_1 \tan \theta_2} = \frac{-\frac{1}{3} - \frac{4}{3}}{1 + \left(-\frac{1}{3}\right) \cdot \frac{4}{3}} = \frac{-\frac{5}{3}}{\frac{5}{9}} = -3$$

**コメント**

放物線の接線を題材とし、三角関数を用いて 2 直線のなす角の処理を問う問題です。

## 問題

$f(x)$ ,  $g(t)$  を,  $f(x) = x^3 - x^2 - 2x + 1$ ,  $g(t) = \cos 3t - \cos 2t + \cos t$  とおく。

- (1)  $2g(t) - 1 = f(2\cos t)$  が成り立つことを示せ。  
 (2)  $\theta = \frac{\pi}{7}$  のとき,  $2g(\theta)\cos\theta = 1 + \cos\theta - 2g(\theta)$  が成り立つことを示せ。  
 (3)  $2\cos\frac{\pi}{7}$  は 3 次方程式  $f(x) = 0$  の解であることを示せ。 [2013]

## 解答例

- (1)  $f(x) = x^3 - x^2 - 2x + 1$ ,  $g(t) = \cos 3t - \cos 2t + \cos t$  に対し,  

$$2g(t) - 1 = 2\cos 3t - 2\cos 2t + 2\cos t - 1$$

$$= 2(4\cos^3 t - 3\cos t) - 2(2\cos^2 t - 1) + 2\cos t - 1$$

$$= 8\cos^3 t - 4\cos^2 t - 4\cos t + 1 = f(2\cos t)$$
- (2)  $h(\theta) = 2g(\theta)(\cos\theta + 1)$  とおくと,  

$$h(\theta) = 2(\cos 3\theta - \cos 2\theta + \cos\theta)(\cos\theta + 1)$$

$$= 2(\cos 3\theta \cos\theta - \cos 2\theta \cos\theta + \cos^2\theta + \cos 3\theta - \cos 2\theta + \cos\theta)$$

$$= \cos 4\theta + \cos 2\theta - \cos 3\theta - \cos\theta + 1 + \cos 2\theta + 2(\cos 3\theta - \cos 2\theta + \cos\theta)$$

$$= \cos 4\theta + \cos 3\theta + \cos\theta + 1$$
- ここで,  $\theta = \frac{\pi}{7}$  のとき,  

$$\cos 4\theta + \cos 3\theta = \cos \frac{4}{7}\pi + \cos \frac{3}{7}\pi = -\cos \frac{3}{7}\pi + \cos \frac{3}{7}\pi = 0$$
- よって,  $h(\theta) = \cos\theta + 1$  となり,  $2g(\theta)\cos\theta + 2g(\theta) = \cos\theta + 1$  から,  

$$2g(\theta)\cos\theta = 1 + \cos\theta - 2g(\theta)$$
- (3) (2)より,  $2g(\theta)(\cos\theta + 1) = \cos\theta + 1$  であり,  $\cos\theta + 1 \neq 0$  より  $2g(\theta) = 1$  すると, (1)より  $f(2\cos\theta) = 0$  となり,  $2\cos\theta = 2\cos\frac{\pi}{7}$  は  $f(x) = 0$  の解である。

## コメント

三角関数の計算はやや難しいものの, 誘導に従えば, (3)の結論へとスムーズにつながります。

**問題**

$x$  の方程式  $|\log_{10} x| = px + q$  ( $p, q$  は実数) が 3 つの相異なる正の解をもち、次の 2 つの条件を満たすとする。

- (I) 3 つの解の比は、 $1 : 2 : 3$  である。
- (II) 3 つの解のうち最小のものは、 $\frac{1}{2}$  より大きく、 $1$  より小さい。

このとき、 $A = \log_{10} 2$ 、 $B = \log_{10} 3$  とおき、 $p$  と  $q$  を  $A$  と  $B$  を用いて表せ。

[2012]

**解答例**

$|\log_{10} x| = px + q$  の解を  $x = \alpha, \beta, \gamma$  ( $\alpha < \beta < \gamma$ )

とおくと、条件より、

$$\beta = 2\alpha, \gamma = 3\alpha$$

また、 $\frac{1}{2} < \alpha < 1$  より、 $1 < \beta < 2$ 、 $\frac{3}{2} < \gamma < 3$  となり、

$$-\log_{10} \alpha = p\alpha + q \cdots \cdots \textcircled{1}$$

$$\log_{10} \beta = p\beta + q, \log_{10} 2\alpha = 2p\alpha + q \cdots \cdots \textcircled{2}$$

$$\log_{10} \gamma = p\gamma + q, \log_{10} 3\alpha = 3p\alpha + q \cdots \cdots \textcircled{3}$$

$$\textcircled{1}\textcircled{2} \text{より, } \log_{10} 2\alpha + \log_{10} \alpha = p\alpha, \log_{10} 2 + 2\log_{10} \alpha = p\alpha \cdots \cdots \textcircled{4}$$

$$\textcircled{1}\textcircled{3} \text{より, } \log_{10} 3\alpha + \log_{10} \alpha = 2p\alpha, \log_{10} 3 + 2\log_{10} \alpha = 2p\alpha \cdots \cdots \textcircled{5}$$

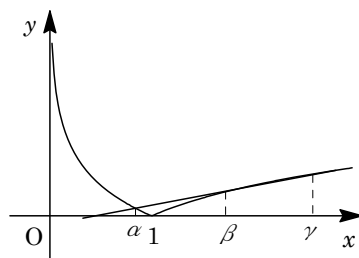
$$\textcircled{4}\textcircled{5} \text{より, } 2\log_{10} 2 - \log_{10} 3 + 2\log_{10} \alpha = 0 \text{ から, } \log_{10} \alpha = \frac{1}{2}\log_{10} \frac{3}{4} = \log_{10} \frac{\sqrt{3}}{2}$$

よって、 $\alpha = \frac{\sqrt{3}}{2}$  となり、 $\textcircled{4}$  に代入すると、

$$\frac{\sqrt{3}}{2} p = \log_{10} 2 + \log_{10} \frac{3}{4} = \log_{10} \frac{3}{2} = B - A, \quad p = \frac{2}{\sqrt{3}}(B - A)$$

さらに、 $\textcircled{1}$  に代入すると、

$$q = -\log_{10} \frac{\sqrt{3}}{2} - (B - A) = -\frac{1}{2}B + A - B + A = 2A - \frac{3}{2}B$$



**コメント**

簡明な設定のうまくまとまった問題です。ただ、 $A, B$  という置き換えのため、同値な答が、複数、出現するような気がします。

## 問題

以下の問いに答えよ。

- (1) 等式  $\cos 3\theta = 4\cos^3\theta - 3\cos\theta$  を示せ。
- (2)  $2\cos 80^\circ$  は 3 次方程式  $x^3 - 3x + 1 = 0$  の解であることを示せ。
- (3)  $x^3 - 3x + 1 = (x - 2\cos 80^\circ)(x - 2\cos \alpha)(x - 2\cos \beta)$  となる角度  $\alpha, \beta$  を求めよ。  
ただし  $0^\circ < \alpha < \beta < 180^\circ$  とする。 [2009]

## 解答例

- (1)  $\cos 3\theta = \cos(2\theta + \theta) = \cos 2\theta \cos \theta - \sin 2\theta \sin \theta = (2\cos^2\theta - 1)\cos\theta - 2\sin^2\theta \cos\theta$   
 $= (2\cos^2\theta - 1)\cos\theta - 2(1 - \cos^2\theta)\cos\theta = 4\cos^3\theta - 3\cos\theta$
- (2)  $x = 2\cos 80^\circ$  とおくと,  $\cos 80^\circ = \frac{x}{2}$  となり, (1)より,  
 $\cos 240^\circ = 4\cos^3 80^\circ - 3\cos 80^\circ$   
 よって,  $-\frac{1}{2} = 4\left(\frac{x}{2}\right)^3 - 3\cdot\frac{x}{2}$  から,  $x^3 - 3x + 1 = 0$  となる。
- (3)  $x^3 - 3x + 1 = (x - 2\cos 80^\circ)(x - 2\cos \alpha)(x - 2\cos \beta)$  より,  $x^3 - 3x + 1 = 0$  の解を  
 $x = 2\cos\theta$  ( $0^\circ < \theta < 180^\circ$ ) とおくと, (2)より,  
 $\cos 3\theta = -\frac{1}{2}$   
 $0^\circ < 3\theta < 540^\circ$  から,  $3\theta = 120^\circ, 240^\circ, 480^\circ$  となり,  
 $\theta = 40^\circ, 80^\circ, 160^\circ$   
 よって,  $0^\circ < \alpha < \beta < 180^\circ$  から,  $\alpha = 40^\circ, \beta = 160^\circ$  である。

## コメント

3 倍角の公式を用いて, 3 次方程式の解を求める有名問題です。

**問題**

$p, q$  を正の実数とする。 $x$  の方程式  $\log_{10}(px) \cdot \log_{10}(qx) + 1 = 0$  が 1 より大きい解をもつとき、点  $(\log_{10} p, \log_{10} q)$  の存在する範囲を座標平面上に図示せよ。 [2008]

**解答例**

与えられた方程式  $\log_{10}(px) \cdot \log_{10}(qx) + 1 = 0$  から、

$$(\log_{10} p + \log_{10} x)(\log_{10} q + \log_{10} x) + 1 = 0 \cdots \cdots \textcircled{1}$$

ここで、 $\log_{10} x = X, \log_{10} p = P, \log_{10} q = Q$  とおくと、 $\textcircled{1}$  より、

$$(P + X)(Q + X) + 1 = 0, X^2 + (P + Q)X + PQ + 1 = 0 \cdots \cdots \textcircled{2}$$

さて、 $\textcircled{1}$  が  $x > 1$  の解をもつ条件は、 $\textcircled{2}$  が  $X > 0$  の解をもつ条件に対応するので、

(i)  $PQ + 1 > 0$  ( $PQ > -1$ ) のとき

$\textcircled{2}$  が  $X > 0$  の解をもつ条件は、

$$D = (P + Q)^2 - 4(PQ + 1) \geq 0 \cdots \cdots \textcircled{3}, -(P + Q) > 0 \cdots \cdots \textcircled{4}$$

$\textcircled{3}$  より、 $(P - Q)^2 - 4 \geq 0, (P - Q + 2)(P - Q - 2) \geq 0$

$\textcircled{4}$  より、 $Q < -P$

(ii)  $PQ + 1 = 0$  ( $PQ = -1$ ) のとき

$\textcircled{2}$  の解は  $X = 0, X = -(P + Q)$  となることより、 $X > 0$  の解をもつ条件は、

$$-(P + Q) > 0, Q < -P$$

(iii)  $PQ + 1 < 0$  ( $PQ < -1$ ) のとき

$\textcircled{2}$  はつねに  $X > 0$  の解をもつ。

以上より、点  $(\log_{10} p, \log_{10} q)$ 、すなわち点  $(P, Q)$

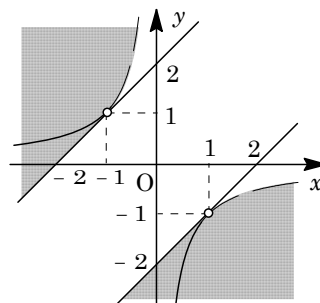
が満たす条件は、

(i)  $xy > -1$  かつ  $(x - y + 2)(x - y - 2) \geq 0$  かつ  $y < -x$

(ii)  $xy = -1$  かつ  $y < -x$

(iii)  $xy < -1$

この領域を図示すると、右図の網点部となる。ただし、実線の境界は領域に含み、破線の境界は領域に含まない。



**コメント**

対数の絡んだ解の配置の問題です。基本的ですが、慎重な処理が必要です。

## 問題

$f(x) = x^4 + 2x^2 - 4x + 8$  とする。

- (1)  $(x^2 + t)^2 - f(x) = (px + q)^2$  が  $x$  の恒等式となるような整数  $t, p, q$  の値を 1 組求めよ。
- (2) (1) で求めた  $t, p, q$  の値を用いて方程式  $(x^2 + t)^2 = (px + q)^2$  を解くことにより、方程式  $f(x) = 0$  の解をすべて求めよ。 [2006]

## 解答例

- (1)  $(x^2 + t)^2 - f(x) = (px + q)^2$  より、  
 $(2t - 2)x^2 + 4x + t^2 - 8 = p^2x^2 + 2pqx + q^2 \cdots \cdots \textcircled{1}$   
 $\textcircled{1}$  が  $x$  の恒等式となることより、  
 $2t - 2 = p^2 \cdots \cdots \textcircled{2}$ ,  $4 = 2pq \cdots \cdots \textcircled{3}$ ,  $t^2 - 8 = q^2 \cdots \cdots \textcircled{4}$   
 $p, q$  は整数なので、 $\textcircled{3}$  より  $p = 2, q = 1$  とすると、 $t = 3$  で  $\textcircled{2}\textcircled{4}$  は満たされる。  
よって、 $\textcircled{1}$  が恒等式となる 1 組の整数値は、 $(t, p, q) = (3, 2, 1)$
- (2) (1) より、 $f(x) = (x^2 + 3)^2 - (2x + 1)^2$  なので、方程式  $f(x) = 0$  は、  
 $(x^2 + 3)^2 - (2x + 1)^2 = 0$ ,  $(x^2 + 3 + 2x + 1)(x^2 + 3 - 2x - 1) = 0$   
 $(x^2 + 2x + 4)(x^2 - 2x + 2) = 0$   
よって、 $f(x) = 0$  の解は、 $x = -1 \pm \sqrt{3}i$ ,  $x = 1 \pm i$  である。

## コメント

4 次方程式を誘導つきで解く問題です。(1)では、1 組の解を求めればよいので、すべての場合をチェックしたわけではありません。



**問 題**

$0 < \theta < \frac{\pi}{2}$  とする。放物線  $y = x^2$  上に 3 点  $O(0, 0)$ ,  $A(\tan\theta, \tan^2\theta)$ ,  $B(-\tan\theta, \tan^2\theta)$  をとる。三角形  $OAB$  の内心の  $y$  座標を  $p$  とし、外心の  $y$  座標を  $q$  とする。また、正の実数  $a$  に対して、直線  $y = a$  と放物線  $y = x^2$  で囲まれた図形の面積を  $S(a)$  で表す。

- (1)  $p, q$  を  $\cos\theta$  を用いて表せ。  
 (2)  $\frac{S(p)}{S(q)}$  が整数であるような  $\cos\theta$  の値をすべて求めよ。 [2018]

**解答例**

- (1) まず、 $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$  のとき、 $O(0, 0)$ ,  $A(\tan\theta, \tan^2\theta)$ ,  $B(-\tan\theta, \tan^2\theta)$  に対し、線分  $AB$  と  $y$  軸との交点を  $C$  とおく。

さて、二等辺三角形  $OAB$  の内心は、 $y$  軸と  $\angle OAB$  の二等分線の交点であり、その  $y$  座標を  $p$  とする。

ここで、直線  $OA$  の傾きは  $\tan\theta$  なので、 $OA$  と  $x$  軸の正の向きとのなす角は  $\theta$  である。これより、 $\angle OAB = \theta$  となるので、

$$\begin{aligned} p &= OC - AC \tan \frac{\theta}{2} = \tan^2\theta - \tan\theta \tan \frac{\theta}{2} = \tan\theta \left( \tan\theta - \sqrt{\frac{1-\cos\theta}{1+\cos\theta}} \right) \\ &= \tan\theta \left( \tan\theta - \sqrt{\frac{(1-\cos\theta)^2}{1-\cos^2\theta}} \right) = \frac{\sin\theta}{\cos\theta} \left( \frac{\sin\theta}{\cos\theta} - \frac{1-\cos\theta}{\sin\theta} \right) \\ &= \frac{\sin\theta}{\cos\theta} \cdot \frac{1-\cos\theta}{\cos\theta \sin\theta} = \frac{1-\cos\theta}{\cos^2\theta} \end{aligned}$$

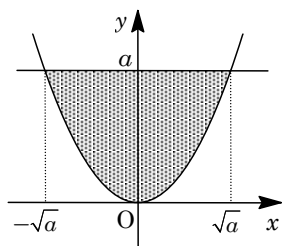
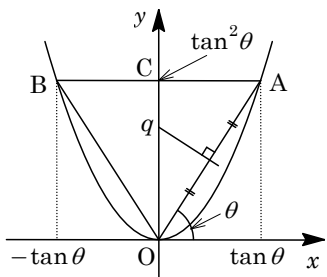
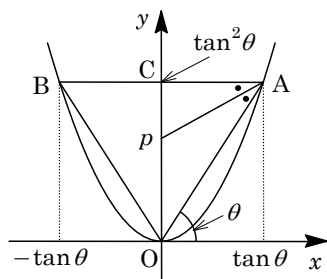
また、二等辺三角形  $OAB$  の外心は、 $y$  軸と線分  $OA$  の垂直二等分線の交点であり、その  $y$  座標を  $q$  とすると、 $OA = \sqrt{\tan^2\theta + \tan^4\theta} = \tan\theta \sqrt{1 + \tan^2\theta} = \frac{\tan\theta}{\cos\theta}$

で、 $\angle AOC = \frac{\pi}{2} - \theta$  から、

$$q = \frac{1}{2} OA \cdot \frac{1}{\cos\angle AOC} = \frac{\tan\theta}{2\cos\theta} \cdot \frac{1}{\sin\theta} = \frac{1}{2\cos^2\theta}$$

- (2) まず、直線  $y = a$  ( $a > 0$ ) と放物線  $y = x^2$  で囲まれた図形の面積  $S(a)$  は、 $y$  軸に関する対称性から、

$$\begin{aligned} S(a) &= 2 \left\{ a\sqrt{a} - \int_0^{\sqrt{a}} x^2 dx \right\} = 2a\sqrt{a} - \frac{2}{3} a\sqrt{a} \\ &= \frac{4}{3} a\sqrt{a} = \frac{4}{3} a^{\frac{3}{2}} \end{aligned}$$



$$(1) \text{より, } S(p) = \frac{4}{3} \cdot \frac{(1 - \cos \theta)^{\frac{3}{2}}}{\cos^3 \theta}, \quad S(q) = \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{2\sqrt{2} \cos^3 \theta} \text{ となり,}$$

$$\frac{S(p)}{S(q)} = 2\sqrt{2}(1 - \cos \theta)^{\frac{3}{2}} = \{2(1 - \cos \theta)\}^{\frac{3}{2}}$$

条件から,  $\{2(1 - \cos \theta)\}^{\frac{3}{2}} = k$  ( $k$  は自然数) と表せ,

$$8(1 - \cos \theta)^3 = k^2 \cdots \cdots (*)$$

ここで,  $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$  より  $0 < \cos \theta < 1$  となり,  $0 < 8(1 - \cos \theta)^3 < 8$  なので,  $(*)$  を満たす  $k$  は,  $k = 1, 2$  である。

$$(i) \quad k = 1 \text{ のとき} \quad 8(1 - \cos \theta)^3 = 1 \text{ より } 1 - \cos \theta = \frac{1}{2} \text{ となり, } \cos \theta = \frac{1}{2}$$

$$(ii) \quad k = 2 \text{ のとき} \quad 8(1 - \cos \theta)^3 = 4 \text{ より } 1 - \cos \theta = \frac{1}{\sqrt[3]{2}} \text{ となり, } \cos \theta = 1 - \frac{1}{\sqrt[3]{2}}$$

### コメント

(1)はいろいろな方法が考えられ, 解答例では図形的に処理しましたが, それ以外に角の二等分線や辺の垂直二等分線の方程式を立てて計算しても構いません。

## 問題

$a$  を正の実数とする。2つの関数

$$y = \frac{1}{3}ax^2 - 2a^2x + \frac{7}{3}a^3, \quad y = -\frac{2}{3}ax^2 + 2a^2x - \frac{2}{3}a^3$$

のグラフは、2点 A, B で交わる。ただし、A の  $x$  座標は B の  $x$  座標より小さいとする。また、2点 A, B を結ぶ線分の垂直二等分線を  $l$  とする。

- (1) 2点 A, B の座標を  $a$  を用いて表せ。
- (2) 直線  $l$  の方程式を  $a$  を用いて表せ。
- (3) 原点と直線  $l$  の距離  $d$  を  $a$  を用いて表せ。また、 $a > 0$  の範囲で  $d$  を最大にする  $a$  の値を求めよ。

[2017]

## 解答例

- (1)  $a > 0$  のとき、 $y = \frac{1}{3}ax^2 - 2a^2x + \frac{7}{3}a^3$ ,  $y = -\frac{2}{3}ax^2 + 2a^2x - \frac{2}{3}a^3$  を連立すると、

$$\frac{1}{3}ax^2 - 2a^2x + \frac{7}{3}a^3 = -\frac{2}{3}ax^2 + 2a^2x - \frac{2}{3}a^3$$

$$ax^2 - 4a^2x + 3a^3 = 0, \quad a(x-a)(x-3a) = 0$$

よって、 $x = a, 3a$  より、 $A(a, \frac{2}{3}a^3)$ ,  $B(3a, -\frac{2}{3}a^3)$  である。

- (2) 線分 AB の垂直二等分線  $l$  上の点  $P(x, y)$  に対して、 $AP = BP$  から、

$$(x-a)^2 + (y - \frac{2}{3}a^3)^2 = (x-3a)^2 + (y + \frac{2}{3}a^3)^2$$

$$-2ax + a^2 - \frac{4}{3}a^3y = -6ax + 9a^2 + \frac{4}{3}a^3y$$

よって、 $4ax - \frac{8}{3}a^3y - 8a^2 = 0$  より、 $l: 3x - 2a^2y - 6a = 0$  となる。

- (3) 原点と直線  $l$  の距離  $d$  は、 $d = \frac{|-6a|}{\sqrt{9+4a^4}} = \frac{6a}{\sqrt{9+4a^4}}$

ここで、 $d$  を最大とする  $a > 0$  を求めるために、 $d = \frac{6}{\sqrt{\frac{9}{a^2} + 4a^2}}$  と変形すると、

$$\frac{9}{a^2} + 4a^2 \geq 2\sqrt{\frac{9}{a^2} \cdot 4a^2} = 12$$

等号は  $\frac{9}{a^2} = 4a^2$  ( $a = \sqrt{\frac{3}{2}} = \frac{\sqrt{6}}{2}$ ) のときに成立する。

よって、 $d$  を最大にする  $a$  の値は、 $a = \frac{\sqrt{6}}{2}$  である。

## コメント

放物線と直線に関する基本的な問題です。

**問題**

$xy$  平面の直線  $y = (\tan 2\theta)x$  を  $l$  とする。ただし  $0 < \theta < \frac{\pi}{4}$  とする。図で示すように、円  $C_1, C_2$  を以下の(i)~

(iv)で定める。

(i) 円  $C_1$  は直線  $l$  および  $x$  軸の正の部分と接する。

(ii) 円  $C_1$  の中心は第 1 象限にあり、原点  $O$  から中心までの距離  $d_1$  は  $\sin 2\theta$  である。

(iii) 円  $C_2$  は直線  $l, x$  軸の正の部分, および円  $C_1$  と接する。

(iv) 円  $C_2$  の中心は第 1 象限にあり、原点  $O$  から中心までの距離  $d_2$  は  $d_1 > d_2$  を満たす。

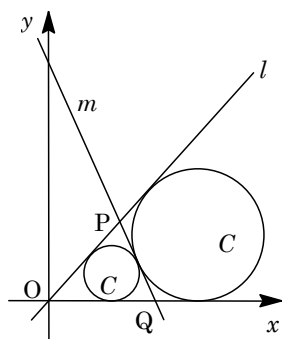
円  $C_1$  と円  $C_2$  の共通接線のうち、 $x$  軸、直線  $l$  と異なる直線を  $m$  とし、直線  $m$  と直線  $l, x$  軸との交点をそれぞれ  $P, Q$  とする。

(1) 円  $C_1, C_2$  の半径を  $\sin \theta, \cos \theta$  を用いて表せ。

(2)  $\theta$  が  $0 < \theta < \frac{\pi}{4}$  の範囲を動くとき、線分  $PQ$  の長さの最大値を求めよ。

(3) (2)の最大値を与える  $\theta$  について直線  $m$  の方程式を求めよ。

[2016]



**解答例**

(1) 円  $C_1, C_2$  の半径を、それぞれ  $r_1, r_2$  とする。

すると、 $d_1 = \sin 2\theta = 2\sin \theta \cos \theta$  から、

$$r_1 = d_1 \sin \theta = 2\sin^2 \theta \cos \theta$$

また、 $r_2 = d_2 \sin \theta, d_1 - d_2 = r_1 + r_2$  から、

$$2\sin \theta \cos \theta - d_2 = 2\sin^2 \theta \cos \theta + d_2 \sin \theta$$

$$(1 + \sin \theta)d_2 = 2\sin \theta \cos \theta(1 - \sin \theta)$$

よって、 $d_2 = \frac{2\sin \theta \cos \theta(1 - \sin \theta)}{1 + \sin \theta}$  となり、

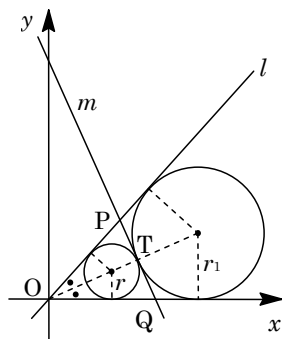
$$r_2 = \frac{2\sin^2 \theta \cos \theta(1 - \sin \theta)}{1 + \sin \theta}$$

(2) 円  $C_1$  と  $C_2$  の接点を  $T$  とおくと、 $OT \perp PQ$  から、

$$PQ = 2OT \tan \theta = 2(d_1 - r_1) \tan \theta = 2(2\sin \theta \cos \theta - 2\sin^2 \theta \cos \theta) \tan \theta$$

$$= 4\sin \theta \cos \theta(1 - \sin \theta) \tan \theta = 4\sin^2 \theta(1 - \sin \theta)$$

ここで、 $t = \sin \theta$  とおくと、 $0 < \theta < \frac{\pi}{4}$  から  $0 < t < \frac{\sqrt{2}}{2}$  となり、 $PQ = f(t)$  として、



$$f(t) = 4t^2(1-t) = 4t^2 - 4t^3$$

$$f'(t) = 8t - 12t^2 = 4t(2 - 3t)$$

すると、 $f(t)$  の増減は右表のようになり、PQ  
の最大値は  $f\left(\frac{2}{3}\right) = 4 \cdot \frac{4}{9} \cdot \frac{1}{3} = \frac{16}{27}$  である。

$t$	0	...	$\frac{2}{3}$	...	$\frac{\sqrt{2}}{2}$
$f'(t)$		+	0	-	
$f(t)$		↗		↘	

(3) (2)から、 $\sin\theta = \frac{2}{3}$  より  $\cos\theta = \frac{\sqrt{5}}{3}$  となり、このとき直線  $m$  の傾きは、

$$\tan\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) = -\frac{\cos\theta}{\sin\theta} = -\frac{\sqrt{5}}{2}$$

また、 $PQ = \frac{16}{27}$  から  $TQ = \frac{8}{27}$  となり、 $OQ = \frac{TQ}{\sin\theta} = \frac{8}{27} \cdot \frac{3}{2} = \frac{4}{9}$  から点  $Q$  の座標は  $Q\left(\frac{4}{9}, 0\right)$  である。すると、直線  $m$  の方程式は、

$$y = -\frac{\sqrt{5}}{2}\left(x - \frac{4}{9}\right) = -\frac{\sqrt{5}}{2}x + \frac{2}{9}\sqrt{5}$$

### コメント

円と接線の関係をもとに、微分を利用して最大・最小へと繋ぐ問題です。問題文に参考図が書かれているため、解きやすくなっています。

**問題**

以下の問いに答えよ。

- (1) 座標平面において、次の連立不等式の表す領域を図示せよ。

$$x^2 + y \leq 1, \quad x - y \leq 1$$

- (2) 2つの放物線  $y = x^2 - 2x + k$  と  $y = -x^2 + 1$  が共有点をもつような実数  $k$  の値の範囲を求めよ。
- (3)  $x, y$  が(1)の連立不等式を満たすとき、 $y - x^2 + 2x$  の最大値および最小値と、それらを与える  $x, y$  の値を求めよ。 [2015]

**解答例**

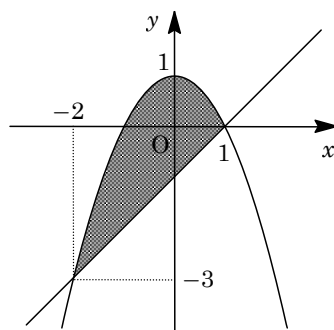
- (1) 領域  $D: x^2 + y \leq 1, x - y \leq 1$  の境界線は、

$$x^2 + y = 1 \cdots \cdots \textcircled{1}, \quad x - y = 1 \cdots \cdots \textcircled{2}$$

①②を連立すると、 $x^2 + x - 2 = 0$  より、

$$(x, y) = (1, 0), (-2, -3)$$

よって、領域  $D$  は右図の網点部となる。なお、境界線は領域に含む。



- (2)  $y = x^2 - 2x + k \cdots \cdots \textcircled{3}$  と ①を連立すると、

$$x^2 - 2x + k = -x^2 + 1, \quad 2x^2 - 2x + k - 1 = 0 \cdots \cdots \textcircled{4}$$

共有点をもつことより、 $D/4 = 1 - 2(k - 1) \geq 0$  となり、 $k \leq \frac{3}{2}$  である。

- (3) まず、 $y - x^2 + 2x = k$  とおくと、③と一致する。

そして、③を  $y = (x - 1)^2 + k - 1$  と変形すると、軸が  $x = 1$  の放物線となり、以下、この放物線が領域  $D$  と共有点をもつ  $k$  の値の範囲を求める。

すると、 $k$  の値の最大値は、(2)から  $k = \frac{3}{2}$  である。このとき、④より  $x = \frac{1}{2}$ 、①より  $y = \frac{3}{4}$  である。また、 $k$  の値が最小となるのは、③が点  $(-2, -3)$  を通るときで、このとき  $k = -11$  となる。

以上より、 $y - x^2 + 2x$  の最大値は  $\frac{3}{2}$  ( $x = \frac{1}{2}, y = \frac{3}{4}$ ) であり、最小値は  $-11$  ( $x = -2, y = -3$ ) となる。

**コメント**

領域と最大・最小についての基本問題です。細かすぎるほどの誘導がついています。

**問題**

$f(x) = x^3 - x$  とする。  $y = f(x)$  のグラフに点  $P(a, b)$  から引いた接線は 3 本あるとする。 3 つの接点  $A(\alpha, f(\alpha))$ ,  $B(\beta, f(\beta))$ ,  $C(\gamma, f(\gamma))$  を頂点とする三角形の重心を  $G$  とする。

- (1)  $\alpha + \beta + \gamma$ ,  $\alpha\beta + \beta\gamma + \gamma\alpha$  および  $\alpha\beta\gamma$  を  $a, b$  を用いて表せ。
- (2) 点  $G$  の座標を  $a, b$  を用いて表せ。
- (3) 点  $G$  の  $x$  座標が正で,  $y$  座標が負となるような点  $P$  の範囲を図示せよ。 [2014]

**解答例**

(1)  $f(x) = x^3 - x$  に対し,  $f'(x) = 3x^2 - 1$  となり, 点  $(t, t^3 - t)$  における接線は,  
 $y - (t^3 - t) = (3t^2 - 1)(x - t)$ ,  $y = (3t^2 - 1)x - 2t^3$   
 点  $P(a, b)$  を通ることより,  $b = (3t^2 - 1)a - 2t^3$ ,  $2t^3 - 3at^2 + a + b = 0 \dots\dots\dots ①$   
 ここで,  $g(t) = 2t^3 - 3at^2 + a + b$  とおくと,  $g'(t) = 6t^2 - 6at = 6t(t - a)$  となり,  
 条件より,  $t$  についての 3 次方程式①が, 異なる 3 実数解をもつことから,

$$a \neq 0, g(0) \cdot g(a) = (a + b)(-a^3 + a + b) < 0 \dots\dots\dots ②$$

②のもとで, ①の 3 つの実数解が  $t = \alpha, \beta, \gamma$  なので,

$$\alpha + \beta + \gamma = \frac{3}{2}a, \alpha\beta + \beta\gamma + \gamma\alpha = 0, \alpha\beta\gamma = -\frac{a + b}{2}$$

(2)  $\triangle ABC$  の重心  $G(x, y)$  とおくと, (1)より,  $x = \frac{1}{3}(\alpha + \beta + \gamma) = \frac{1}{2}a \dots\dots\dots ③$

$$\begin{aligned} y &= \frac{1}{3}(\alpha^3 - \alpha + \beta^3 - \beta + \gamma^3 - \gamma) \\ &= \frac{1}{3}\{(\alpha + \beta + \gamma)(\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 - \alpha\beta - \beta\gamma - \gamma\alpha) + 3\alpha\beta\gamma - (\alpha + \beta + \gamma)\} \\ &= \frac{1}{3}\left\{\frac{3}{2}a\left(\frac{9}{4}a^2 - 3 \cdot 0\right) - 3 \cdot \frac{a + b}{2} - \frac{3}{2}a\right\} = \frac{9}{8}a^3 - a - \frac{1}{2}b \dots\dots\dots ④ \end{aligned}$$

よって,  $G\left(\frac{1}{2}a, \frac{9}{8}a^3 - a - \frac{1}{2}b\right)$  となる。

(3) 条件から, ③④について,  $\frac{1}{2}a > 0$  かつ  $\frac{9}{8}a^3 - a - \frac{1}{2}b < 0$  となり,

$$a > 0 \dots\dots\dots ⑤, b > \frac{9}{4}a^3 - 2a \dots\dots\dots ⑥$$

そこで, ②⑤⑥の共通部分を求めるために,  $a + b = 0$  と  $b = \frac{9}{4}a^3 - 2a$  を連立して,

$$-a = \frac{9}{4}a^3 - 2a, 9a^3 - 4a = 0$$

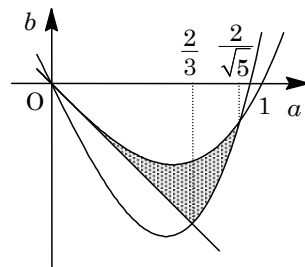
$a > 0$  より,  $a = \frac{2}{3}$  となる。

また、 $-a^3 + a + b = 0$  と  $b = \frac{9}{4}a^3 - 2a$  を連立し、

$$a^3 - a = \frac{9}{4}a^3 - 2a, \quad 5a^3 - 4a = 0$$

$a > 0$  より、 $a = \frac{2}{\sqrt{5}}$  となる。

よって、点  $P(a, b)$  の存在範囲は右図の網点部である。  
ただし、境界は含まない。



### コメント

領域の図示をテーマとした標準的な問題です。ただ、記述量は非常に多いため、上の解答例では、3次曲線の概形については省いています。



**問題**

O を原点とする  $xy$  平面において、直線  $y=1$  の  $|x| \geq 1$  を満たす部分を  $C$  とする。

- (1)  $C$  上に点  $A(t, 1)$  をとるとき、線分  $OA$  の垂直二等分線の方程式を求めよ。
- (2) 点  $A$  が  $C$  全体を動くとき、線分  $OA$  の垂直二等分線が通過する範囲を求め、それを図示せよ。 [2011]

**解答例**

- (1) 線分  $OA$  の垂直二等分線の方程式は、中点が  $(\frac{t}{2}, \frac{1}{2})$ 、 $\overline{OA} = (t, 1)$  より、

$$t(x - \frac{1}{2}) + (y - \frac{1}{2}) = 0, \quad 2tx + 2y - t^2 - 1 = 0 \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

- (2) ①を  $t$  についてまとめると、 $t^2 - 2xt - 2y + 1 = 0 \dots\dots\dots \textcircled{2}$

すると、 $|t| \geq 1$  のとき直線①が通過する点  $(x, y)$  は、 $t$  についての 2 次方程式②が  $|t| \geq 1$  に少なくとも 1 つの実数解をもつ  $(x, y)$  の条件として求められる。

ここで、 $f(t) = t^2 - 2xt - 2y + 1 = (t - x)^2 - x^2 - 2y + 1$  とおくと、

- (i)  $|x| \geq 1$  ( $x \leq -1, 1 \leq x$ ) のとき

求める条件は、 $f(x) = -x^2 - 2y + 1 \leq 0$  より、

$$y \geq -\frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{2}$$

- (ii)  $|x| < 1$  ( $-1 < x < 1$ ) のとき

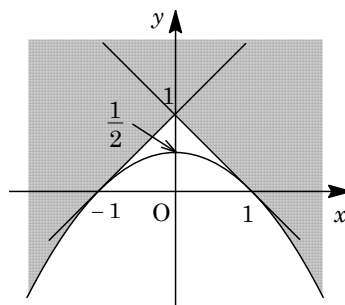
求める条件は、 $f(1) = 1 - 2x - 2y + 1 \leq 0$  または

$f(-1) = 1 + 2x - 2y + 1 \leq 0$  より、

$$y \geq -x + 1 \text{ または } y \geq x + 1$$

- (i)(ii) より、求める領域は右図の網点部となる。

ただし、境界は領域に含む。



**コメント**

直線の通過領域を求める頻出問題です。2 次方程式の実数解の条件として処理をしています。

**問題**

$xy$  平面上に 2 定点  $A(1, 0)$  と  $O(0, 0)$  をとる。また、 $m$  を 1 より大きい実数とする。

- (1)  $AP : OP = m : 1$  を満たす点  $P(x, y)$  の軌跡を求めよ。  
 (2) 点  $A$  を通る直線で、(1) で求めた軌跡との共有点が 1 個のものを求めよ。また、その共有点の座標も求めよ。 [2007]

**解答例**

(1)  $AP : OP = m : 1$  より、 $AP = mOP$  すなわち  $AP^2 = m^2OP^2$  となり、  
 $(x-1)^2 + y^2 = m^2(x^2 + y^2)$ ,  $(m^2 - 1)x^2 + (m^2 - 1)y^2 + 2x - 1 = 0$

$m > 1$  より、 $x^2 + y^2 + \frac{2}{m^2 - 1}x - \frac{1}{m^2 - 1} = 0$   
 $(x + \frac{1}{m^2 - 1})^2 + y^2 = (\frac{m}{m^2 - 1})^2 \dots\dots\dots(*)$

よって、点  $P$  の軌跡は、中心  $(-\frac{1}{m^2 - 1}, 0)$ 、半径  $\frac{m}{m^2 - 1}$  の円である。

(2)  $A(1, 0)$  を通る直線  $l$  を、 $x = 1$  または  $y = a(x - 1)$  ( $a$  は実数) とおく。

(i)  $l : x = 1$  のとき

円(\*)の中心と直線の距離は、 $1 + \frac{1}{m^2 - 1} = \frac{m^2}{m^2 - 1}$  となるが、 $m > 1$  より、

$$\frac{m^2}{m^2 - 1} > \frac{m}{m^2 - 1}$$

よって、直線  $x = 1$  と円(\*)の共有点はない。

(ii)  $l : y = a(x - 1)$  のとき

条件から、円(\*)の中心と直線  $ax - y - a = 0$  の距離が、半径に等しいことより、

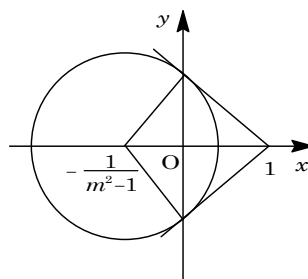
$$\frac{|-\frac{a}{m^2 - 1} - a|}{\sqrt{a^2 + 1}} = \frac{m}{m^2 - 1}, \quad \frac{m|a|}{\sqrt{a^2 + 1}} = 1$$

よって、 $m^2 a^2 = a^2 + 1$  から、 $a = \pm \frac{1}{\sqrt{m^2 - 1}}$  となり、

$$l : y = \pm \frac{1}{\sqrt{m^2 - 1}}(x - 1)$$

さて、直線  $l$  の法線方向の単位ベクトル  $\vec{n}$  の成分は、

$$\vec{n} = \frac{1}{\sqrt{a^2 + 1}}(a, -1) = \frac{\sqrt{m^2 - 1}}{m} \left( \pm \frac{1}{\sqrt{m^2 - 1}}, -1 \right) = \pm \left( \frac{1}{m}, \mp \frac{\sqrt{m^2 - 1}}{m} \right)$$



以上より, 接点の座標  $(x, y)$  は, 右上図より,

$$(x, y) = \left(-\frac{1}{m^2-1}, 0\right) + \frac{m}{m^2-1} \left(\frac{1}{m}, \mp \frac{\sqrt{m^2-1}}{m}\right) = \left(0, \mp \frac{1}{\sqrt{m^2-1}}\right)$$

### コメント

接点の座標を求めるときに, 少し工夫をし, 単位ベクトルを利用して計算量を減らしています。

**問 題**

半径 1 の円を内接円とする三角形 ABC が、辺 AB と辺 AC の長さが等しい二等辺三角形であるとする。辺 BC, CA, AB と内接円の接点をそれぞれ P, Q, R とする。また、 $\alpha = \angle CAB$ ,  $\beta = \angle ABC$  とし、三角形 ABC の面積を  $S$  とする。

- (1) 線分 AQ の長さを  $\alpha$  を用いて表し、線分 QC の長さを  $\beta$  を用いて表せ。
- (2)  $t = \tan \frac{\beta}{2}$  とおく。このとき、 $S$  を  $t$  を用いて表せ。
- (3) 不等式  $S \geq 3\sqrt{3}$  が成り立つことを示せ。さらに、等号が成立するのは、三角形 ABC が正三角形のときに限ることを示せ。 [2015]

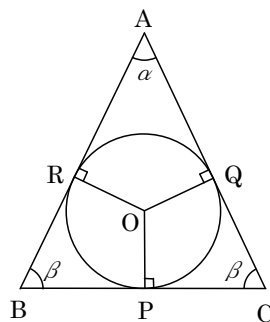
**解答例**

- (1) 二等辺三角形 ABC の半径 1 の内接円の中心を O とおくと、 $\triangle AOQ$  において、

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{AQ}, \quad AQ = \frac{1}{\tan \frac{\alpha}{2}}$$

$$\triangle COQ \text{ において同様に, } QC = \frac{1}{\tan \frac{\beta}{2}}$$

- (2) まず、 $BC = 2PC = 2QC = \frac{2}{\tan \frac{\beta}{2}} = \frac{2}{t}$



また、A, O, P は同一直線上にあるので、

$$AP = PC \tan \beta = QC \tan \beta = \frac{1}{\tan \frac{\beta}{2}} \cdot \frac{2 \tan \frac{\beta}{2}}{1 - \tan^2 \frac{\beta}{2}} = \frac{1}{t} \cdot \frac{2t}{1 - t^2} = \frac{2}{1 - t^2}$$

よって、 $\triangle ABC$  の面積  $S$  は、 $S = \frac{1}{2} BC \cdot AP = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{t} \cdot \frac{2}{1 - t^2} = \frac{2}{t(1 - t^2)}$

- (3)  $\frac{\beta}{2} = \frac{\pi - \alpha}{4}$  より  $0 < \frac{\beta}{2} < \frac{\pi}{4}$  となり、 $0 < \tan \frac{\beta}{2} < 1$  すなわち  $0 < t < 1$  である。さて、 $f(t) = t(1 - t^2)$  とおくと、 $S = \frac{2}{f(t)}$  となり、

$$f'(t) = 1 - 3t^2$$

すると、 $f(t)$  の増減は右表のようになり、 $0 < t < 1$  において  $0 < f(t) \leq \frac{2}{3\sqrt{3}}$  であり、

$$S \geq 2 \cdot \frac{3\sqrt{3}}{2} = 3\sqrt{3}$$

$t$	0	...	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	...	1
$f'(t)$		+	0	-	
$f(t)$	0	↗	$\frac{2}{3\sqrt{3}}$	↘	0

等号が成り立つのは、 $t = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \tan \frac{\beta}{2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \right)$  のときなので、 $\beta = \frac{\pi}{3}$  である。このとき  $\alpha = \frac{\pi}{3}$  となり、 $\triangle ABC$  は正三角形である。

### コメント

三角比と図形についての基本問題です。加えて、最小値を求めるときに微分法を利用するように構成されています。

**問題**

四面体  $OABC$  について、 $OA = OB = OC$  および  $\angle AOB = \angle BOC = \angle COA$  が成り立つとする。 $0 < s < 1$ ,  $0 < t < 1$  を満たす実数  $s, t$  に対し、辺  $OA$  を  $s:1-s$  に内分する点を  $D$  とし、辺  $OB$  を  $t:1-t$  に内分する点を  $E$  とする。 $\overrightarrow{AF} = \overrightarrow{BG} = \overrightarrow{OC}$  となる点  $F, G$  をとり、線分  $EF$  と線分  $DG$  が 1 点で交わるとし、その交点を  $P$  とする。 $\overrightarrow{OA} = \vec{a}$ ,  $\overrightarrow{OB} = \vec{b}$ ,  $\overrightarrow{OC} = \vec{c}$ ,  $\angle AOB = \theta$  とするとき、以下の問いに答えよ。

- (1)  $t = s$  であることを示し、 $\overrightarrow{OP}$  を  $s, \vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$  を用いて表せ。
- (2)  $\overrightarrow{EF} \perp \overrightarrow{DG}$  であるとき、 $\cos \theta$  を  $s$  を用いて表せ。
- (3)  $\overrightarrow{EF} \perp \overrightarrow{DG}$  かつ  $\sqrt{3}OP = OA$  であるとき、 $s$  の値を求めよ。 [2019]

**解答例**

- (1)  $\overrightarrow{OA} = \vec{a}$ ,  $\overrightarrow{OB} = \vec{b}$ ,  $\overrightarrow{OC} = \vec{c}$  とし、

$$\overrightarrow{OD} = s\vec{a}, \overrightarrow{OE} = t\vec{b} \quad (0 < s < 1, 0 < t < 1)$$

$$\overrightarrow{OF} = \vec{a} + \vec{c}, \overrightarrow{OG} = \vec{b} + \vec{c}$$

さて、 $DP:PG = 1-k:k$ ,  $EP:PF = 1-l:l$  とおくと、

$$\overrightarrow{OP} = k\overrightarrow{OD} + (1-k)\overrightarrow{OG} = ks\vec{a} + (1-k)(\vec{b} + \vec{c})$$

$$= ks\vec{a} + (1-k)\vec{b} + (1-k)\vec{c} \cdots \cdots \textcircled{1}$$

$$\overrightarrow{OP} = l\overrightarrow{OE} + (1-l)\overrightarrow{OF} = lt\vec{b} + (1-l)(\vec{a} + \vec{c})$$

$$= (1-l)\vec{a} + lt\vec{b} + (1-l)\vec{c} \cdots \cdots \textcircled{2}$$

ここで、 $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$  は 1 次独立なので、 $\textcircled{1}\textcircled{2}$  から、

$$ks = 1-l \cdots \cdots \textcircled{3}, \quad 1-k = lt \cdots \cdots \textcircled{4}, \quad 1-k = 1-l \cdots \cdots \textcircled{5}$$

$\textcircled{5}$  より  $k = l$  を  $\textcircled{3}\textcircled{4}$  に代入すると、 $ls = 1-l$  かつ  $1-l = lt$  から、 $ls = lt$  となる。

ここで、 $l = 0$  とすると  $k = 0$  となり、 $\textcircled{3}$  が成立しないことより、 $t = s$  である。

このとき、 $\textcircled{3}$  から  $ks = 1-k$  より  $k = \frac{1}{s+1}$  となるので、 $\textcircled{1}$  に代入して、

$$\overrightarrow{OP} = \frac{s}{s+1}\vec{a} + \frac{s}{s+1}\vec{b} + \frac{s}{s+1}\vec{c} = \frac{s}{s+1}(\vec{a} + \vec{b} + \vec{c})$$

- (2) (1) より、 $\overrightarrow{EF} = \overrightarrow{OF} - \overrightarrow{OE} = \vec{a} - s\vec{b} + \vec{c}$ ,  $\overrightarrow{DG} = \overrightarrow{OG} - \overrightarrow{OD} = -s\vec{a} + \vec{b} + \vec{c}$

条件より、 $\overrightarrow{EF} \perp \overrightarrow{DG}$  なので  $\overrightarrow{EF} \cdot \overrightarrow{DG} = 0$  となり、

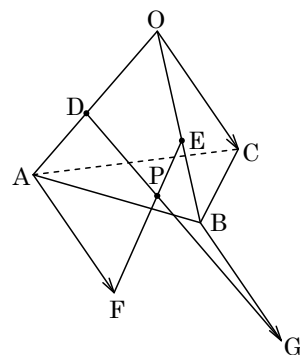
$$(\vec{a} - s\vec{b} + \vec{c}) \cdot (-s\vec{a} + \vec{b} + \vec{c}) = 0 \cdots \cdots \textcircled{6}$$

ここで、 $OA = OB = OC = 1$  とおいても一般性を失わないので、

$$|\vec{a}| = |\vec{b}| = |\vec{c}| = 1, \quad \vec{a} \cdot \vec{b} = \vec{b} \cdot \vec{c} = \vec{c} \cdot \vec{a} = \cos \theta$$

すると、 $\textcircled{6}$  より、 $-s + \cos \theta + \cos \theta + s^2 \cos \theta - s - s \cos \theta - s \cos \theta + \cos \theta + 1 = 0$

$$(s^2 - 2s + 3)\cos \theta = 2s - 1, \quad \cos \theta = \frac{2s - 1}{s^2 - 2s + 3} \cdots \cdots \textcircled{7}$$



(3) (1)より,  $|\overline{OP}| = \frac{s}{s+1} |\vec{a} + \vec{b} + \vec{c}|$  となり,

$$\begin{aligned} |\overline{OP}|^2 &= \left(\frac{s}{s+1}\right)^2 |\vec{a} + \vec{b} + \vec{c}|^2 = \left(\frac{s}{s+1}\right)^2 (1+1+1+2\cos\theta+2\cos\theta+2\cos\theta) \\ &= 3\left(\frac{s}{s+1}\right)^2 (1+2\cos\theta) \end{aligned}$$

ここで,  $\overline{EF} \perp \overline{DG}$  なので, ⑦を代入して,

$$|\overline{OP}|^2 = 3\left(\frac{s}{s+1}\right)^2 \left(1 + \frac{4s-2}{s^2-2s+3}\right) = 3\left(\frac{s}{s+1}\right)^2 \cdot \frac{s^2+2s+1}{s^2-2s+3} = \frac{3s^2}{s^2-2s+3}$$

さらに,  $\sqrt{3}OP = OA$  から  $3|\overline{OP}|^2 = 1$  となるので,  $\frac{9s^2}{s^2-2s+3} = 1$  より,

$$8s^2 + 2s - 3 = 0, \quad (4s+3)(2s-1) = 0$$

よって,  $0 < s < 1$  から,  $s = \frac{1}{2}$  である。

### コメント

空間ベクトルの図形への応用問題です。問題の状況設定がやや繁雑ですが, 誘導に従えば, 方針に迷うことはないでしょう。

## 問題

四面体  $OABC$  において、 $\overrightarrow{OA}=\vec{a}$ 、 $\overrightarrow{OB}=\vec{b}$ 、 $\overrightarrow{OC}=\vec{c}$  とおく。このとき等式  $\vec{a}\cdot\vec{b}=\vec{b}\cdot\vec{c}=\vec{c}\cdot\vec{a}=1$  が成り立つとする。 $t$  は実数の定数で、 $0 < t < 1$  を満たすとする。線分  $OA$  を  $t:1-t$  に内分する点を  $P$  とし、線分  $BC$  を  $t:1-t$  に内分する点を  $Q$  とする。また、線分  $PQ$  の中点を  $M$  とする。

- (1)  $\overrightarrow{OM}$  を  $\vec{a}$ 、 $\vec{b}$ 、 $\vec{c}$  と  $t$  を用いて表せ。
- (2) 線分  $OM$  と線分  $BM$  の長さが等しいとき、線分  $OB$  の長さを求めよ。
- (3) 4 点  $O, A, B, C$  が点  $M$  を中心とする同一球面上にあるとする。このとき、 $\triangle OAB$  と  $\triangle OCB$  は合同であることを示せ。

[2016]

## 解答例

- (1)  $OP:PA=t:1-t$ 、 $BQ:QC=t:1-t$ 、 $PM=QM$  より、

$$\overrightarrow{OM} = \frac{1}{2}\overrightarrow{OP} + \frac{1}{2}\overrightarrow{OQ} = \frac{t}{2}\vec{a} + \frac{1-t}{2}\vec{b} + \frac{t}{2}\vec{c}$$

- (2)  $\overrightarrow{BM} = \overrightarrow{OM} - \overrightarrow{OB} = \frac{t}{2}\vec{a} - \frac{1+t}{2}\vec{b} + \frac{t}{2}\vec{c}$

さて、 $AC$  の中点を  $D$  とすると、 $\overrightarrow{OD} = \frac{1}{2}\vec{a} + \frac{1}{2}\vec{c}$  から、

$$\overrightarrow{OM} = t\overrightarrow{OD} + \frac{1-t}{2}\vec{b}, \quad \overrightarrow{BM} = t\overrightarrow{OD} - \frac{1+t}{2}\vec{b}$$

ここで、条件から  $|\overrightarrow{OM}| = |\overrightarrow{BM}|$  なので、 $|t\overrightarrow{OD} + \frac{1-t}{2}\vec{b}|^2 = |t\overrightarrow{OD} - \frac{1+t}{2}\vec{b}|^2$  となり、

$$t(1-t)\overrightarrow{OD}\cdot\vec{b} + \frac{(1-t)^2}{4}|\vec{b}|^2 = -t(1+t)\overrightarrow{OD}\cdot\vec{b} + \frac{(1+t)^2}{4}|\vec{b}|^2$$

すると、 $2t\overrightarrow{OD}\cdot\vec{b} = t|\vec{b}|^2$  から、 $|\vec{b}|^2 = 2\overrightarrow{OD}\cdot\vec{b} = (\vec{a} + \vec{c})\cdot\vec{b}$

よって、条件  $\vec{a}\cdot\vec{b} = \vec{b}\cdot\vec{c} = \vec{c}\cdot\vec{a} = 1$  より、 $|\vec{b}| = \sqrt{1+1} = \sqrt{2}$

- (3) (2) と同様にして、 $\overrightarrow{CM} = \overrightarrow{OM} - \overrightarrow{OC} = \frac{t}{2}\vec{a} + \frac{1-t}{2}\vec{b} + \frac{t-2}{2}\vec{c}$

さて、 $BA$  を  $t:1-t$  に内分する点を  $E$  とすると、 $\overrightarrow{OE} = t\vec{a} + (1-t)\vec{b}$  から、

$$\overrightarrow{OM} = \frac{1}{2}\overrightarrow{OE} + \frac{t}{2}\vec{c}, \quad \overrightarrow{CM} = \frac{1}{2}\overrightarrow{OE} + \frac{t-2}{2}\vec{c}$$

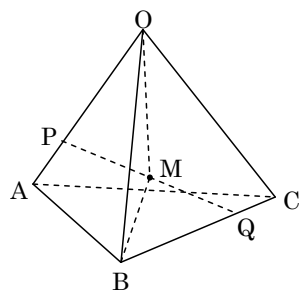
ここで、条件から  $|\overrightarrow{OM}| = |\overrightarrow{CM}|$  なので、 $|\frac{1}{2}\overrightarrow{OE} + \frac{t}{2}\vec{c}|^2 = |\frac{1}{2}\overrightarrow{OE} + \frac{t-2}{2}\vec{c}|^2$  となり、

$$2t\overrightarrow{OE}\cdot\vec{c} + t^2|\vec{c}|^2 = 2(t-2)\overrightarrow{OE}\cdot\vec{c} + (t-2)^2|\vec{c}|^2$$

すると、 $|\vec{c}|^2 = \frac{1}{1-t}\overrightarrow{OE}\cdot\vec{c} = \frac{1}{1-t}\{t\vec{a} + (1-t)\vec{b}\}\cdot\vec{c} = \frac{1}{1-t}$  となり、 $|\vec{c}| = \sqrt{\frac{1}{1-t}}$

同様に、 $\overrightarrow{AM} = \overrightarrow{OM} - \overrightarrow{OA} = \frac{t-2}{2}\vec{a} + \frac{1-t}{2}\vec{b} + \frac{t}{2}\vec{c}$  となり、条件から  $|\overrightarrow{OM}| = |\overrightarrow{AM}|$

より、 $|\frac{1}{2}\overrightarrow{OQ} + \frac{t}{2}\vec{a}|^2 = |\frac{1}{2}\overrightarrow{OQ} + \frac{t-2}{2}\vec{a}|^2$  なので、





$$|\vec{a}|^2 = \frac{1}{1-t} \overrightarrow{OQ} \cdot \vec{a} = \frac{1}{1-t} \{(1-t)\vec{b} + t\vec{c}\} \cdot \vec{a} = \frac{1}{1-t}, \quad |\vec{a}| = \sqrt{\frac{1}{1-t}}$$

そこで,  $\triangle OAB$  と  $\triangle OCB$  において,  $OA = OC = \sqrt{\frac{1}{1-t}}$ ,  $OB = \sqrt{2}$  (共通)

さらに,  $\vec{a} \cdot \vec{b} = \vec{b} \cdot \vec{c} = 1$  から,  $\sqrt{\frac{2}{1-t}} \cos \angle AOB = \sqrt{\frac{2}{1-t}} \cos \angle COB$  から,

$$\cos \angle AOB = \cos \angle COB, \quad \angle AOB = \angle COB$$

よって,  $\triangle OAB$  と  $\triangle OCB$  は合同である。

### コメント

空間ベクトルの四面体への応用問題です。量的にやや多いので, (2)(3)で, ベクトルの置換えを行っています。

**問題**

四面体  $OABC$  において、次が満たされているとする。

$$\vec{OA} \cdot \vec{OB} = \vec{OB} \cdot \vec{OC} = \vec{OC} \cdot \vec{OA}$$

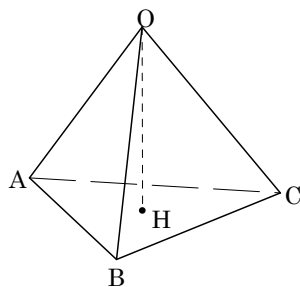
点  $A, B, C$  を通る平面を  $\alpha$  とする。点  $O$  を通り平面  $\alpha$  と直交する直線と、平面  $\alpha$  との交点を  $H$  とする。

- (1)  $\vec{OA}$  と  $\vec{BC}$  は垂直であることを示せ。
- (2) 点  $H$  は  $\triangle ABC$  の垂心であること、すなわち  $\vec{AH} \perp \vec{BC}$ ,  $\vec{BH} \perp \vec{CA}$ ,  $\vec{CH} \perp \vec{AB}$  を示せ。
- (3)  $|\vec{OA}| = |\vec{OB}| = |\vec{OC}| = 2$ ,  $\vec{OA} \cdot \vec{OB} = \vec{OB} \cdot \vec{OC} = \vec{OC} \cdot \vec{OA} = 1$  とする。このとき、 $\triangle ABC$  の各辺の長さおよび線分  $OH$  の長さを求めよ。 [2012]

**解答例**

- (1) 条件より、 $\vec{OA} \cdot \vec{OB} = \vec{OB} \cdot \vec{OC} = \vec{OC} \cdot \vec{OA}$  なので、  

$$\vec{OC} \cdot \vec{OA} - \vec{OA} \cdot \vec{OB} = 0, \vec{OA} \cdot (\vec{OC} - \vec{OB}) = 0$$
 よって、 $\vec{OA} \cdot \vec{BC} = 0$  となり、 $\vec{OA} \perp \vec{BC}$  である。



- (2) 条件より、 $\vec{OH} \perp \vec{BC}$  なので  $\vec{OH} \cdot \vec{BC} = 0$  から、  

$$(\vec{OA} + \vec{AH}) \cdot \vec{BC} = 0$$

ここで、(1)の結論を用いると  $\vec{AH} \cdot \vec{BC} = 0$ , すなわち  $\vec{AH} \perp \vec{BC}$  である。

同様にして、 $\vec{OA} \cdot \vec{OB} = \vec{OB} \cdot \vec{OC}$  から、 $\vec{OB} \cdot \vec{CA} = 0$  ……①  
 $\vec{OH} \perp \vec{CA}$  から、 $\vec{OH} \cdot \vec{CA} = (\vec{OB} + \vec{BH}) \cdot \vec{CA} = 0$  となり、①より、  

$$\vec{BH} \cdot \vec{CA} = 0, \vec{BH} \perp \vec{CA}$$

さらに、 $\vec{OB} \cdot \vec{OC} = \vec{OC} \cdot \vec{OA}$  から、 $\vec{OC} \cdot \vec{AB} = 0$  ……②  
 $\vec{OH} \perp \vec{AB}$  から、 $\vec{OH} \cdot \vec{AB} = (\vec{OC} + \vec{CH}) \cdot \vec{AB} = 0$  となり、②より、  

$$\vec{CH} \cdot \vec{AB} = 0, \vec{CH} \perp \vec{AB}$$

- (3)  $|\vec{OA}| = |\vec{OB}| = |\vec{OC}| = 2$ ,  $\vec{OA} \cdot \vec{OB} = \vec{OB} \cdot \vec{OC} = \vec{OC} \cdot \vec{OA} = 1$  のとき、  

$$|\vec{AB}|^2 = |\vec{OB} - \vec{OA}|^2 = |\vec{OB}|^2 - 2\vec{OB} \cdot \vec{OA} + |\vec{OA}|^2 = 4 - 2 + 4 = 6$$

よって、 $AB = |\vec{AB}| = \sqrt{6}$  となり、同様にして、 $BC = CA = \sqrt{6}$

すると、 $\triangle ABC$  は正三角形となり、その垂心  $H$  は重心に一致し、

$$AH = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{6} \sin 60^\circ = \frac{2\sqrt{6}}{3} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{2}$$

これより、 $OH = \sqrt{OA^2 - AH^2} = \sqrt{2}$  となる。

**コメント**

条件の対称性から「同様にして」という表現で、細部の記述を省略しています。

**問題**

点  $O$  を原点とする座標平面上に、2 点  $A(1, 0)$ ,  $B(\cos \theta, \sin \theta)$  ( $90^\circ < \theta < 180^\circ$ ) をとり、以下の条件を満たす 2 点  $C, D$  を考える。

$$\overrightarrow{OA} \cdot \overrightarrow{OC} = 1, \overrightarrow{OA} \cdot \overrightarrow{OD} = 0, \overrightarrow{OB} \cdot \overrightarrow{OC} = 0, \overrightarrow{OB} \cdot \overrightarrow{OD} = 1$$

また、 $\triangle OAB$  の面積を  $S_1$ ,  $\triangle OCD$  の面積を  $S_2$  とおく。

- (1) ベクトル  $\overrightarrow{OC}$ ,  $\overrightarrow{OD}$  の成分を求めよ。
- (2)  $S_2 = 2S_1$  が成り立つとき、 $\theta$  と  $S_1$  の値を求めよ。
- (3)  $S = 4S_1 + 3S_2$  を最小にする  $\theta$  と、そのときの  $S$  の値を求めよ。 [2010]

**解答例**

(1)  $\overrightarrow{OA} = (1, 0)$ ,  $\overrightarrow{OB} = (\cos \theta, \sin \theta)$  ( $90^\circ < \theta < 180^\circ$ ) に対し、 $\overrightarrow{OC} = (p, q)$ ,  $\overrightarrow{OD} = (r, s)$  とおく。

まず、 $\overrightarrow{OA} \cdot \overrightarrow{OC} = 1$ ,  $\overrightarrow{OB} \cdot \overrightarrow{OC} = 0$  より、

$$p = 1 \cdots \cdots \textcircled{1}, \quad p \cos \theta + q \sin \theta = 0 \cdots \cdots \textcircled{2}$$

$$\textcircled{1}\textcircled{2} \text{より, } q = -\frac{\cos \theta}{\sin \theta} \text{ となり, } \overrightarrow{OC} = \left(1, -\frac{\cos \theta}{\sin \theta}\right)$$

また、 $\overrightarrow{OA} \cdot \overrightarrow{OD} = 0$ ,  $\overrightarrow{OB} \cdot \overrightarrow{OD} = 1$  より、

$$r = 0 \cdots \cdots \textcircled{3}, \quad r \cos \theta + s \sin \theta = 1 \cdots \cdots \textcircled{4}$$

$$\textcircled{3}\textcircled{4} \text{より, } s = \frac{1}{\sin \theta} \text{ となり, } \overrightarrow{OD} = \left(0, \frac{1}{\sin \theta}\right)$$

(2)  $\triangle OAB$  の面積を  $S_1$ ,  $\triangle OCD$  の面積を  $S_2$  は、

$$S_1 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot \sin \theta = \frac{1}{2} \sin \theta, \quad S_2 = \frac{1}{2} \left| 1 \cdot \frac{1}{\sin \theta} + 0 \cdot \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \right| = \frac{1}{2 \sin \theta}$$

$$S_2 = 2S_1 \text{ より, } \frac{1}{2 \sin \theta} = \sin \theta, \quad \sin^2 \theta = \frac{1}{2}$$

$$90^\circ < \theta < 180^\circ \text{ より, } \sin \theta = \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ から, } \theta = 135^\circ$$

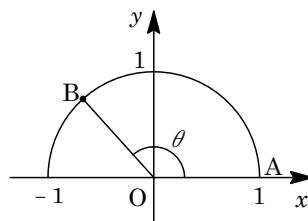
$$\text{このとき, } S_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{4} \text{ となる。}$$

(3) (2)より、 $S = 4S_1 + 3S_2 = 2 \sin \theta + \frac{3}{2 \sin \theta}$  となり、 $\sin \theta > 0$  から、

$$2 \sin \theta + \frac{3}{2 \sin \theta} \geq 2 \sqrt{2 \sin \theta \cdot \frac{3}{2 \sin \theta}} = 2\sqrt{3}$$

等号は、 $2 \sin \theta = \frac{3}{2 \sin \theta}$  すなわち  $\sin \theta = \frac{\sqrt{3}}{2}$  ( $\theta = 120^\circ$ ) のとき成立する。

よって、 $\theta = 120^\circ$  のとき、 $S$  は最小値  $2\sqrt{3}$  をとる。



**コメント**

ベクトルの成分計算についての基本問題です。

## 問題

座標空間において、原点  $O$  を通り方向ベクトル  $(\cos \theta, \sin \theta, 0)$  をもつ直線を  $L_\theta$  とする。点  $A(2, 0, 1)$  から直線  $L_\theta$  に下ろした垂線と  $L_\theta$  との交点を  $P_\theta$  とする。

- (1)  $\theta$  が実数全体を動くとき、 $P_\theta$  は  $xy$  平面内の円周上を動くことを示し、その中心の座標と半径を求めよ。
- (2)  $\theta$  が  $0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}$  の範囲を動くとする。三角形  $OAP_\theta$  の面積の最大値と、そのときの  $P_\theta$  の座標を求めよ。

[2006]

## 解答例

- (1)  $t$  を実数とし、 $\vec{u} = (\cos \theta, \sin \theta, 0)$  とおくと、

$$L_\theta : (x, y, z) = t\vec{u} = t(\cos \theta, \sin \theta, 0)$$

これより、 $L_\theta$  上の点  $P_\theta$  は、 $P_\theta(t \cos \theta, t \sin \theta, 0)$  とおくことができる。

ここで、 $A(2, 0, 1)$  から、

$$\vec{AP}_\theta = (t \cos \theta - 2, t \sin \theta, -1)$$

条件より、 $AP_\theta$  と  $L_\theta$  は直交するので、 $\vec{AP}_\theta \cdot \vec{u} = 0$

$$\cos \theta(t \cos \theta - 2) + t \sin^2 \theta = 0, \quad t = 2 \cos \theta$$

よって、 $P_\theta(2 \cos^2 \theta, 2 \sin \theta \cos \theta, 0)$  と表せる。

さて、 $P_\theta(x, y, z)$  とおくと、

$$x = 2 \cos^2 \theta, \quad y = 2 \sin \theta \cos \theta, \quad z = 0$$

すると、 $x = 1 + \cos 2\theta$ 、 $y = \sin 2\theta$  から、点  $P_\theta$  の描く円の方程式は

$$(x-1)^2 + y^2 = 1, \quad z = 0$$

すなわち、 $xy$  平面上で、中心  $(1, 0, 0)$ 、半径  $1$  の円を描く。

- (2)  $\vec{OA} = (2, 0, 1)$ 、 $\vec{OP}_\theta = (2 \cos^2 \theta, 2 \sin \theta \cos \theta, 0)$  より、 $0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}$  のとき、

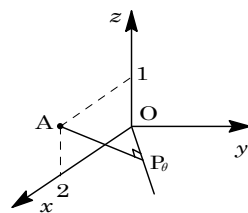
$$\vec{OA} \cdot \vec{OP}_\theta = 4 \cos^2 \theta, \quad |\vec{OA}| = \sqrt{5}$$

$$|\vec{OP}_\theta| = \sqrt{4 \cos^4 \theta + 4 \sin^2 \theta \cos^2 \theta} = \sqrt{4 \cos^2 \theta (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta)} = 2 \cos \theta$$

ここで、 $\triangle OAP_\theta$  の面積を  $S$  とおくと、

$$S = \frac{1}{2} \sqrt{|\vec{OA}|^2 |\vec{OP}_\theta|^2 - (\vec{OA} \cdot \vec{OP}_\theta)^2} = \frac{1}{2} \sqrt{5 \cdot 4 \cos^2 \theta - 16 \cos^4 \theta}$$

$$= \sqrt{5 \cos^2 \theta - 4 \cos^4 \theta} = \sqrt{-4 \left( \cos^2 \theta - \frac{5}{8} \right)^2 + \frac{25}{16}}$$



すると、 $\cos \theta = \sqrt{\frac{5}{8}} = \frac{\sqrt{10}}{4}$ 、 $\sin \theta = \sqrt{1 - \frac{5}{8}} = \frac{\sqrt{6}}{4}$  のとき、 $S$  は最大値  $\sqrt{\frac{25}{16}} = \frac{5}{4}$  をとる。このとき、 $P_\theta$  の座標は、 $x = 2 \times \frac{5}{8}$ 、 $y = 2 \times \frac{\sqrt{10}}{4} \times \frac{\sqrt{6}}{4}$  から、

$$P_\theta \left( \frac{5}{4}, \frac{\sqrt{15}}{4}, 0 \right)$$

### コメント

(2)では、有名な三角形の面積公式を利用しています。

**問題**

正三角形  $OAB$  に対し、直線  $OA$  上の点  $P_1, P_2, P_3, \dots$  および直線  $OB$  上の点  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots$  を、次の (I), (II), (III) を満たすようにとる。

- (I)  $P_1 = A$  である。
- (II) 線分  $P_1Q_1, P_2Q_2, P_3Q_3, \dots$  はすべて直線  $OA$  に垂直である。
- (III) 線分  $Q_1P_2, Q_2P_3, Q_3P_4, \dots$  はすべて直線  $OB$  に垂直である。

$\vec{OA} = \vec{a}, \vec{OB} = \vec{b}$  とおく。点  $O$  を基準とする位置ベクトルが、整数  $k, l$  によって  $k\vec{a} + l\vec{b}$  と表される点全体の集合を  $S$  とする。 $n$  を自然数とすると、以下の問いに答えよ。

- (1)  $\vec{OP}_n$  と  $\vec{OQ}_n$  を  $\vec{a}, \vec{b}$  を用いて表せ。
- (2)  $\vec{OR} = x\vec{a} + y\vec{b}$  で定まる点  $R$  が線分  $Q_nP_{n+1}$  上にあるとき、 $x$  を  $y$  を用いて表せ。  
また、線分  $Q_nP_{n+1}$  上にある  $S$  の点の個数を求めよ。
- (3) 三角形  $OP_{n+1}Q_n$  の周または内部にある  $S$  の点の個数を求めよ。 [2018]

**解答例**

(1)  $OA = OB = L$  とおくと、 $OP_1 = L, OQ_1 = OP_1 \tan \frac{\pi}{3} = 2L$

$$OP_2 = OQ_1 \tan \frac{\pi}{3} = 4L, OQ_2 = OP_2 \tan \frac{\pi}{3} = 8L, \dots$$

同様に考えると、 $OP_n = 4^{n-1}L, OQ_n = 2 \cdot 4^{n-1}L$

よって、 $\vec{OP}_n = 4^{n-1}\vec{a}, \vec{OQ}_n = 2 \cdot 4^{n-1}\vec{b}$  である。

- (2) 点  $R$  が線分  $Q_nP_{n+1}$  上にあるとき、 $0 \leq t \leq 1$  として、(1) の結果を代入すると、

$$\begin{aligned} \vec{OR} &= (1-t)\vec{OP}_{n+1} + t\vec{OQ}_n \\ &= 4^n(1-t)\vec{a} + 2 \cdot 4^{n-1}t\vec{b} \dots\dots\dots \textcircled{1} \end{aligned}$$

また、条件より、 $\vec{OR} = x\vec{a} + y\vec{b} \dots\dots\dots \textcircled{2}$

①②から、 $\vec{a}$  と  $\vec{b}$  は 1 次独立なので、 $x = 4^n(1-t), y = 2 \cdot 4^{n-1}t$  となり、

$$x = 4^n - 4^n \cdot \frac{y}{2 \cdot 4^{n-1}} = 4^n - 2y \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

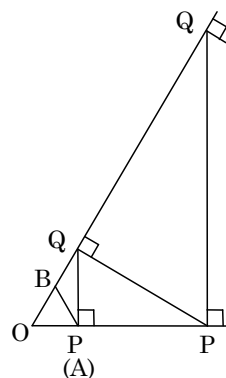
また、③から  $y$  が整数のとき  $x$  も整数となるので、③を満たす整数の組  $(x, y)$  の個数、すなわち  $S$  の点の個数は、 $0 \leq y \leq 2 \cdot 4^{n-1}$  から  $2 \cdot 4^{n-1} + 1$  である。

- (3) 点  $R$  が  $\triangle OP_{n+1}Q_n$  の周または内部にあるとき、 $r \geq 0, s \geq 0, r+s \leq 1$  として、

$$\vec{OR} = r\vec{OP}_{n+1} + s\vec{OQ}_n = 4^n r\vec{a} + 2 \cdot 4^{n-1} s\vec{b}$$

ここで、 $\vec{OR} = x\vec{a} + y\vec{b}$  とすると、(2) と同様に、

$$x = 4^n r \dots\dots\dots \textcircled{4}, y = 2 \cdot 4^{n-1} s \dots\dots\dots \textcircled{5}$$



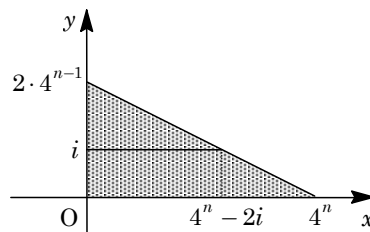
④⑤より,  $r = \frac{x}{4^n}$ ,  $s = \frac{y}{2 \cdot 4^{n-1}}$  となるので,  $r \geq 0$ ,  $s \geq 0$  より,

$$x \geq 0 \cdots \cdots \textcircled{6}, \quad y \geq 0 \cdots \cdots \textcircled{7}$$

さらに,  $r + s \leq 1$  より  $\frac{x}{4^n} + \frac{y}{2 \cdot 4^{n-1}} \leq 1$  となり,

$$x + 2y \leq 4^n \cdots \cdots \textcircled{8}$$

したがって, ⑥⑦⑧を満たす整数の組  $(x, y)$  の  
個数, すなわち  $S$  の点の個数を  $N$  とすると,



$$\begin{aligned} N &= \sum_{i=0}^{2 \cdot 4^{n-1}} (4^n - 2i + 1) = (4^n + 1)(2 \cdot 4^{n-1} + 1) - 2 \cdot \frac{1}{2} (2 \cdot 4^{n-1})(2 \cdot 4^{n-1} + 1) \\ &= (4^n + 1 - 2 \cdot 4^{n-1})(2 \cdot 4^{n-1} + 1) = (2 \cdot 4^{n-1} + 1)^2 \end{aligned}$$

**コメント**

ベクトルの絡んだ数列の応用問題です。ただ, メインではない(1)は, やや雑な記述になっています。

## 問題

数列  $\{a_n\}$  が、 $a_1 = 1$ ,  $a_2 = 3$ ,  $a_{n+2} = 3a_{n+1}^2 - 6a_{n+1}a_n + 3a_n^2 + a_{n+1}$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) を満たすとする。また、 $b_n = a_{n+1} - a_n$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) とおく。以下の問いに答えよ。

- (1)  $b_n \geq 0$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) を示せ。
- (2)  $b_n$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) の一の位の数 が 2 であることを数学的帰納法を用いて証明せよ。
- (3)  $a_{2017}$  の一の位の数 を求めよ。 [2017]

## 解答例

- (1)  $a_1 = 1$ ,  $a_2 = 3$ ,  $a_{n+2} = 3a_{n+1}^2 - 6a_{n+1}a_n + 3a_n^2 + a_{n+1}$  に対して、

$$a_{n+2} - a_{n+1} = 3(a_{n+1} - a_n)^2$$

ここで、 $b_n = a_{n+1} - a_n$  とおくと、 $b_1 = 2 \geq 0$ ,  $b_{n+1} = 3b_n^2 \dots\dots\dots$ ①

よって、帰納的に、 $b_n \geq 0$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) である。

- (2) 以下、 $b_n$  の一の位の数 が 2 であることを数学的帰納法を用いて証明する。

(i)  $n = 1$  のとき  $b_1 = 2$  より成立している。

(ii)  $n = k$  のとき  $b_k$  の一の位の数 が 2 であると仮定する。

これより、 $l_k$  を 0 以上の整数として、 $b_k = 10l_k + 2$  とおくと、①から、

$$b_{k+1} = 3b_k^2 = 3(10l_k + 2)^2 = 300l_k^2 + 120l_k + 12 = 10(30l_k^2 + 12l_k + 1) + 2$$

よって、 $b_{k+1}$  の一の位の数 は 2 である。

(i)(ii) より、 $b_n$  の一の位の数 は 2 である。

- (3) (2) より、 $l_n$  を 0 以上の整数として、 $b_n = 10l_n + 2$  とおくことができ、

$$a_{n+1} - a_n = 10l_n + 2 \dots\dots\dots$$
②

すると、 $n \geq 2$  において、②から、 $a_n = a_1 + \sum_{k=1}^{n-1} (10l_k + 2)$  となり、

$$a_{2017} = 1 + 10 \sum_{k=1}^{2016} l_k + 2 \cdot 2016 = 10 \sum_{k=1}^{2016} l_k + 4033 = 10 \left( \sum_{k=1}^{2016} l_k + 403 \right) + 3$$

したがって、 $a_{2017}$  の一の位の数 は 3 である。

## コメント

整数と漸化式の融合問題です。(1)は簡単に記しましたが、丁寧に書いたら数学的帰納法です。また、(2)(3)は合同式を用いると、少し簡略になります。



**問 題**

$p$  と  $q$  は正の整数とする。2 次方程式  $x^2 - 2px - q = 0$  の 2 つの実数解を  $\alpha, \beta$  とする。ただし  $\alpha > \beta$  とする。数列  $\{a_n\}$  を、 $a_n = \frac{1}{2}(\alpha^{n-1} + \beta^{n-1})$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) によって定める。ただし、 $\alpha^0 = 1, \beta^0 = 1$  と定める。

- (1) すべての自然数  $n$  に対して、 $a_{n+2} = 2pa_{n+1} + qa_n$  であることを示せ。
- (2) すべての自然数  $n$  に対して、 $a_n$  は整数であることを示せ。
- (3) 自然数  $n$  に対し、 $\frac{\alpha^{n-1}}{2}$  以下の最大の整数を  $b_n$  とする。 $p$  と  $q$  が  $q < 2p + 1$  を満たすとき、 $b_n$  を  $a_n$  を用いて表せ。

[2015]

**解答例**

(1) 2 次方程式  $x^2 - 2px - q = 0$  の 2 つの実数解を  $\alpha, \beta$  とすると、

$$\alpha + \beta = 2p, \alpha\beta = -q \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

ここで、 $a_n = \frac{1}{2}(\alpha^{n-1} + \beta^{n-1}) \dots\dots\dots \textcircled{2}$  より、 $\textcircled{1}$  を利用すると、

$$\begin{aligned} 2pa_{n+1} + qa_n &= (\alpha + \beta) \cdot \frac{1}{2}(\alpha^n + \beta^n) - \alpha\beta \cdot \frac{1}{2}(\alpha^{n-1} + \beta^{n-1}) \\ &= \frac{1}{2}(\alpha^{n+1} + \alpha\beta^n + \alpha^n\beta + \beta^{n+1}) - \frac{1}{2}(\alpha^n\beta + \alpha\beta^n) = \frac{1}{2}(\alpha^{n+1} + \beta^{n+1}) \end{aligned}$$

よって、 $a_{n+2} = 2pa_{n+1} + qa_n \dots\dots\dots \textcircled{3}$  が成り立つ。

(2)  $a_1 = \frac{1}{2}(\alpha^0 + \beta^0) = 1, a_2 = \frac{1}{2}(\alpha + \beta) = p$  となり、ともに整数である。

すると、 $\textcircled{3}$  から帰納的に、すべての自然数  $n$  に対して  $a_n$  は整数である。

(3)  $f(x) = x^2 - 2px - q$  とおくと、条件より、

$$f(0) = -q < 0, f(-1) = 1 + 2p - q > 0$$

これより、 $f(x) = 0$  の実数解  $\alpha, \beta$  ( $\alpha > \beta$ ) は、 $\alpha > 0, -1 < \beta < 0$  となる。

$$\textcircled{2} \text{ より、} \frac{\alpha^{n-1}}{2} = a_n - \frac{\beta^{n-1}}{2} \dots\dots\dots \textcircled{4} \text{ となり、} -1 < \beta^{n-1} < 1 \text{ から } -\frac{1}{2} < \frac{\beta^{n-1}}{2} < \frac{1}{2}$$

すると、 $\frac{\alpha^{n-1}}{2}$  以下の最大の整数  $b_n$  は、

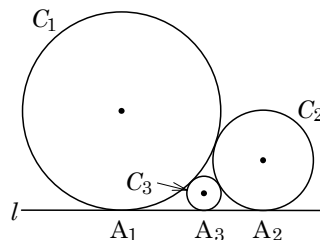
- (i)  $n$  が偶数 ( $n-1$  が奇数) のとき  $-\frac{1}{2} < \frac{\beta^{n-1}}{2} < 0$  から、 $\textcircled{4}$  より  $b_n = a_n$  である。
- (ii)  $n$  が奇数 ( $n-1$  が偶数) のとき  $0 < \frac{\beta^{n-1}}{2} < \frac{1}{2}$  から、 $\textcircled{4}$  より  $b_n = a_n - 1$  である。

**コメント**

隣接 3 項間型の漸化式の標準問題です。(3)の問題文の  $q < 2p + 1$  という意味深な不等式は、グラフを対応させると、 $\beta$  が  $-1$  より大きいことを示しています。

**問題**

平面上の直線  $l$  に同じ側で接する 2 つの円  $C_1, C_2$  があり、 $C_1$  と  $C_2$  も互いに外接している。 $l, C_1, C_2$  で囲まれた領域内に、これら 3 つと互いに接する円  $C_3$  を作る。同様に  $l, C_n, C_{n+1}$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) で囲まれた領域内にあり、これら 3 つと互いに接する円を  $C_{n+2}$  とする。円  $C_n$  の半径を  $r_n$  とし、 $x_n = \frac{1}{\sqrt{r_n}}$  とおく。このとき、以下の問



いに答えよ。ただし、 $r_1 = 16, r_2 = 9$  とする。

- (1)  $l$  が  $C_1, C_2, C_3$  と接する点を、それぞれ  $A_1, A_2, A_3$  とおく。線分  $A_1A_2, A_1A_3, A_2A_3$  の長さおよび  $r_3$  の値を求めよ。
- (2) ある定数  $a, b$  に対して  $x_{n+2} = ax_{n+1} + bx_n$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) となることを示せ。  
 $a, b$  の値も求めよ。
- (3) (2) で求めた  $a, b$  に対して、2 次方程式  $t^2 = at + b$  の解を  $\alpha, \beta$  ( $\alpha > \beta$ ) とする。  
 $x_1 = c\alpha^2 + d\beta^2$  を満たす有理数  $c, d$  の値を求めよ。ただし、 $\sqrt{5}$  が無理数であることは証明なしで用いてよい。
- (4) (3) の  $c, d, \alpha, \beta$  に対して、 $x_n = c\alpha^{n+1} + d\beta^{n+1}$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) となることを示し、数列  $\{r_n\}$  の一般項を  $\alpha, \beta$  を用いて表せ。

[2014]

**解答例**

(1) 右図より、 $A_1A_2 = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 - (r_1 - r_2)^2} = 2\sqrt{r_1r_2}$

となり、同様に、

$$A_1A_3 = 2\sqrt{r_1r_3}, \quad A_2A_3 = 2\sqrt{r_2r_3}$$

ここで、 $A_1A_2 = A_1A_3 + A_2A_3$  より、

$$2\sqrt{r_1r_2} = 2\sqrt{r_1r_3} + 2\sqrt{r_2r_3} \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

$r_1 = 16, r_2 = 9$  なので、 $\textcircled{1}$  から、

$$2 \cdot 4 \cdot 3 = 2 \cdot 4\sqrt{r_3} + 2 \cdot 3\sqrt{r_3}, \quad \sqrt{r_3} = \frac{12}{7}$$

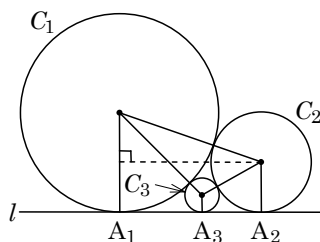
よって、 $r_3 = \frac{144}{49}, A_1A_2 = 24, A_1A_3 = \frac{96}{7}, A_2A_3 = \frac{72}{7}$

(2)  $\textcircled{1}$  と同様にして、 $2\sqrt{r_n r_{n+1}} = 2\sqrt{r_n r_{n+2}} + 2\sqrt{r_{n+1} r_{n+2}}$

両辺を  $2\sqrt{r_n r_{n+1} r_{n+2}}$  で割って、 $\frac{1}{\sqrt{r_{n+2}}} = \frac{1}{\sqrt{r_{n+1}}} + \frac{1}{\sqrt{r_n}}$  となり、 $x_n = \frac{1}{\sqrt{r_n}}$  から、

$$x_{n+2} = x_{n+1} + x_n \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

条件より、 $x_{n+2} = ax_{n+1} + bx_n$  なので、 $a = b = 1$



(3) 2次方程式  $t^2 = t + 1$  の解を  $\alpha, \beta$  ( $\alpha > \beta$ ) とすると,  $\alpha = \frac{1+\sqrt{5}}{2}, \beta = \frac{1-\sqrt{5}}{2}$

ここで,  $x_1 = c\alpha^2 + d\beta^2$  から,  $\frac{1}{4} = c\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^2 + d\left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right)^2$  となり,

$$1 = c(6 + 2\sqrt{5}) + d(6 - 2\sqrt{5})$$

$c, d$  が有理数,  $\sqrt{5}$  が無理数なので,  $6c + 6d = 1 \cdots \cdots \textcircled{3}, 2c - 2d = 0 \cdots \cdots \textcircled{4}$

$$\textcircled{3}\textcircled{4} \text{より, } c = d = \frac{1}{12}$$

(4)  $x_n = \frac{1}{12}\alpha^{n+1} + \frac{1}{12}\beta^{n+1}$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) となることを数学的帰納法で示す。

(i)  $n = 1, 2$  のとき  $n = 1$  のときは(3)より成立し,

$$\frac{1}{12}\alpha^3 + \frac{1}{12}\beta^3 = \frac{1}{12}\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^3 + \frac{1}{12}\left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right)^3 = \frac{1}{12} \cdot \frac{2(1+15)}{8} = \frac{1}{3}$$

すると,  $x_2 = \frac{1}{\sqrt{r_2}} = \frac{1}{3}$  より,  $n = 2$  のときも成立する。

(ii)  $n = k, k+1$  のとき

$$x_k = \frac{1}{12}\alpha^{k+1} + \frac{1}{12}\beta^{k+1}, x_{k+1} = \frac{1}{12}\alpha^{k+2} + \frac{1}{12}\beta^{k+2} \text{ と仮定すると, } \textcircled{2} \text{より,}$$

$$\begin{aligned} x_{k+2} &= x_{k+1} + x_k = \frac{1}{12}\alpha^{k+2} + \frac{1}{12}\beta^{k+2} + \frac{1}{12}\alpha^{k+1} + \frac{1}{12}\beta^{k+1} \\ &= \frac{1}{12}\alpha^{k+1}(\alpha + 1) + \frac{1}{12}\beta^{k+1}(\beta + 1) = \frac{1}{12}\alpha^{k+1} \cdot \frac{3+\sqrt{5}}{2} + \frac{1}{12}\beta^{k+1} \cdot \frac{3-\sqrt{5}}{2} \\ &= \frac{1}{12}\alpha^{k+1} \cdot \alpha^2 + \frac{1}{12}\beta^{k+1} \cdot \beta^2 = \frac{1}{12}\alpha^{k+3} + \frac{1}{12}\beta^{k+3} \end{aligned}$$

よって,  $n = k+2$  のときも成立する。

(i)(ii)より,  $x_n = \frac{1}{12}\alpha^{n+1} + \frac{1}{12}\beta^{n+1}$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )

さらに,  $x_n = \frac{1}{\sqrt{r_n}}$  から,  $r_n = \frac{1}{x_n^2} = \frac{144}{(\alpha^{n+1} + \beta^{n+1})^2}$  である。

## コメント

有名な構図の問題で, 本年度は名大・理系で出題されています。ただ, 筑波大では, 良くも悪くも, 誘導が丁寧です。

## 問題

3つの数列 $\{a_n\}$ ,  $\{b_n\}$ ,  $\{c_n\}$ が

$$a_{n+1} = -b_n - c_n, \quad b_{n+1} = -c_n - a_n, \quad c_{n+1} = -a_n - b_n \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

および $a_1 = a$ ,  $b_1 = b$ ,  $c_1 = c$ を満たすとする。ただし,  $a, b, c$ は定数とする。

- (1)  $p_n = a_n + b_n + c_n$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ )で与えられる数列 $\{p_n\}$ の初項から第 $n$ 項までの和 $S_n$ を求めよ。
- (2) 数列 $\{a_n\}$ ,  $\{b_n\}$ ,  $\{c_n\}$ の一般項を求めよ。
- (3)  $q_n = (-1)^n \{(a_n)^2 + (b_n)^2 + (c_n)^2\}$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ )で与えられる数列 $\{q_n\}$ の初項から第 $2n$ 項までの和を $T_n$ とする。 $a+b+c$ が奇数であれば, すべての自然数 $n$ に対して $T_n$ が正の奇数であることを数学的帰納法を用いて示せ。 [2013]

## 解答例

- (1) 条件より,  $a_1 = a$ ,  $b_1 = b$ ,  $c_1 = c$ であり,  $n=1, 2, 3, \dots$ において,

$$a_{n+1} = -b_n - c_n, \quad b_{n+1} = -c_n - a_n, \quad c_{n+1} = -a_n - b_n$$

さて,  $p_n = a_n + b_n + c_n$ とすると,  $p_1 = a + b + c$ であり,

$$p_{n+1} = a_{n+1} + b_{n+1} + c_{n+1} = -2(a_n + b_n + c_n) = -2p_n$$

よって,  $p_n = p_1(-2)^{n-1} = (a+b+c)(-2)^{n-1}$ となり, 第 $n$ 項までの和 $S_n$ は,

$$S_n = \frac{(a+b+c)\{1-(-2)^n\}}{1-(-2)} = \frac{a+b+c}{3}\{1-(-2)^n\}$$

- (2) (1)より,  $a_{n+1} = -b_n - c_n = a_n - p_n$ となり,  $n \geq 2$ において,

$$a_n = a_1 - \sum_{k=1}^{n-1} p_k = a - \frac{a+b+c}{3}\{1-(-2)^{n-1}\} \quad (n=1 \text{ のときも成立})$$

同様にして,  $b_n = b - \frac{a+b+c}{3}\{1-(-2)^{n-1}\}$ ,  $c_n = c - \frac{a+b+c}{3}\{1-(-2)^{n-1}\}$

- (3)  $q_n = (-1)^n \{(a_n)^2 + (b_n)^2 + (c_n)^2\}$ ,  $T_n = \sum_{l=1}^{2n} q_l$ に対し,  $a+b+c$ が奇数のとき,

すべての自然数 $n$ において $T_n$ は正の奇数であることを数学的帰納法を用いて示す。

- (i)  $n=1$ のとき  $T_1 = q_1 + q_2$ より,

$$\begin{aligned} T_1 &= -(a_1)^2 - (b_1)^2 - (c_1)^2 + (a_2)^2 + (b_2)^2 + (c_2)^2 \\ &= -a^2 - b^2 - c^2 + (-b-c)^2 + (-c-a)^2 + (-a-b)^2 \\ &= a^2 + b^2 + c^2 + 2bc + 2ca + 2ab = (a+b+c)^2 \end{aligned}$$

よって,  $T_1$ は正の奇数である。

(ii)  $n = k$  のとき  $T_k$  が正の奇数であると仮定すると,

$$\begin{aligned} T_{k+1} &= T_k + q_{2k+1} + q_{2k+2} \\ &= T_k - (a_{2k+1})^2 - (b_{2k+1})^2 - (c_{2k+1})^2 + (a_{2k+2})^2 + (b_{2k+2})^2 + (c_{2k+2})^2 \\ &= T_k + (a_{2k+1} + b_{2k+1} + c_{2k+1})^2 = T_k + (p_{2k+1})^2 \end{aligned}$$

ここで, (1) から,  $(p_{2k+1})^2 = \{(a+b+c)(-2)^{2k}\}^2 = (a+b+c)^2 \cdot 16^k$  となり,  $(p_{2k+1})^2$  は正の偶数であるので,  $T_{k+1}$  は正の奇数となる。

(i)(ii) より, すべての自然数  $n$  において  $T_n$  は正の奇数である。

### コメント

連立漸化式の基本的な問題です。ただ, 出現する文字が多く, 気疲れしてしまいます。(3)は, 証明ですが, やや省略気味に記しています。

## 問題

数列  $\{a_n\}$  を,  $a_1 = 1$ ,  $(n+3)a_{n+1} - na_n = \frac{1}{n+1} - \frac{1}{n+2}$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) によつ

て定める。

(1)  $b_n = n(n+1)(n+2)a_n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) によつて定まる数列  $\{b_n\}$  の一般項を求めよ。

(2) 等式  $p(n+1)(n+2) + qn(n+2) + rn(n+1) = b_n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) が成り立つように, 定数  $p, q, r$  の値を定めよ。

(3)  $\sum_{k=1}^n a_k$  を  $n$  の式で表せ。 [2011]

## 解答例

(1) 条件より,  $a_1 = 1$ ,  $(n+3)a_{n+1} - na_n = \frac{1}{n+1} - \frac{1}{n+2}$  から,

$$(n+1)(n+2)(n+3)a_{n+1} - n(n+1)(n+2)a_n = (n+2) - (n+1)$$

$b_n = n(n+1)(n+2)a_n$  より,  $b_{n+1} - b_n = 1$  となるので,

$$b_n = b_1 + (n-1) = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot a_1 + n - 1 = n + 5$$

(2) (1)より,  $p(n+1)(n+2) + qn(n+2) + rn(n+1) = n+5$  の係数を比べて,

$$p+q+r=0 \cdots \cdots \textcircled{1}, \quad 3p+2q+r=1 \cdots \cdots \textcircled{2}, \quad 2p=5 \cdots \cdots \textcircled{3}$$

$\textcircled{3}$ より,  $p = \frac{5}{2}$  となり,  $\textcircled{1}\textcircled{2}$ に代入して,  $q+r = -\frac{5}{2}$ ,  $2q+r = -\frac{13}{2}$

これより,  $q = -4$ ,  $r = \frac{3}{2}$

(3) (1)より,  $a_n = \frac{n+5}{n(n+1)(n+2)}$  となり, (2)の結果を用いると,

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{p}{n} + \frac{q}{n+1} + \frac{r}{n+2} = \frac{5}{2n} - \frac{4}{n+1} + \frac{3}{2(n+2)} \\ &= \frac{5}{2n} - \frac{5+3}{2(n+1)} + \frac{3}{2(n+2)} = \frac{5}{2} \left( \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \right) - \frac{3}{2} \left( \frac{1}{n+1} - \frac{1}{n+2} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{よつて, } \sum_{k=1}^n a_k &= \frac{5}{2} \left( 1 - \frac{1}{n+1} \right) - \frac{3}{2} \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{n+2} \right) = \frac{5}{2} \cdot \frac{n}{n+1} - \frac{3}{2} \cdot \frac{n}{2(n+2)} \\ &= \frac{10n(n+2) - 3n(n+1)}{4(n+1)(n+2)} = \frac{n(7n+17)}{4(n+1)(n+2)} \end{aligned}$$

## コメント

(3)の解法は, 上のようなものが想定されていると思われませんが, もし  $4 = \frac{5+3}{2}$  に気付かなかつたときは, (2)を無視し,  $a_n = \frac{1}{(n+1)(n+2)} + \frac{5}{n(n+1)(n+2)}$  として和を求めます。

**問 題**

自然数の数列  $\{a_n\}$ ,  $\{b_n\}$  は,  $(5 + \sqrt{2})^n = a_n + b_n\sqrt{2}$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) を満たすものとする。

- (1)  $\sqrt{2}$  は無理数であることを示せ。
- (2)  $a_{n+1}$ ,  $b_{n+1}$  を  $a_n$ ,  $b_n$  を用いて表せ。
- (3) すべての自然数  $n$  に対して,  $a_{n+1} + pb_{n+1} = q(a_n + pb_n)$  が成り立つような定数  $p$ ,  $q$  を 2 組求めよ。
- (4)  $a_n$ ,  $b_n$  を  $n$  を用いて表せ。 [2009]

**解答例**

- (1)  $k, l$  を整数として,  $\sqrt{2} = \frac{l}{k}$  ( $k > 0$ ,  $k$  と  $l$  は互いに素) と仮定すると,

$$\sqrt{2}k = l, \quad 2k^2 = l^2 \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

これより,  $l^2$  は偶数, すなわち  $l$  は偶数である。

すると,  $m$  を整数として  $l = 2m$  と表せ, ①に代入すると,

$$2k^2 = 4m^2, \quad k^2 = 2m^2$$

これより,  $k^2$  は偶数, すなわち  $k$  は偶数である。

したがって,  $k$  と  $l$  はともに偶数となり, 互いに素という仮定に反する。

よって,  $\sqrt{2}$  は有理数でない, すなわち無理数である。

- (2) 条件より,  $a_{n+1} + b_{n+1}\sqrt{2} = (5 + \sqrt{2})^{n+1} = (5 + \sqrt{2})(a_n + b_n\sqrt{2})$   
 $= (5a_n + 2b_n) + (a_n + 5b_n)\sqrt{2}$

$a_n, b_n$  は自然数,  $\sqrt{2}$  は無理数より,

$$a_{n+1} = 5a_n + 2b_n \dots\dots\dots \textcircled{2}, \quad b_{n+1} = a_n + 5b_n \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

- (3) ②③を  $a_{n+1} + pb_{n+1} = q(a_n + pb_n)$  に適用すると,

$$5a_n + 2b_n + p(a_n + 5b_n) = q(a_n + pb_n)$$

任意の  $n$  に対して成立することより,

$$5 + p = q \dots\dots\dots \textcircled{4}, \quad 2 + 5p = pq \dots\dots\dots \textcircled{5}$$

$$\textcircled{4}\textcircled{5} \text{より}, \quad 2 + 5p = p(5 + p), \quad p = \pm\sqrt{2}$$

$$\textcircled{4} \text{から}, \quad (p, q) = (\sqrt{2}, 5 + \sqrt{2}), (-\sqrt{2}, 5 - \sqrt{2})$$

- (4) 条件から,  $a_1 = 5, b_1 = 1$  である。

まず,  $a_{n+1} + \sqrt{2}b_{n+1} = (5 + \sqrt{2})(a_n + \sqrt{2}b_n)$  から,

$$a_n + \sqrt{2}b_n = (a_1 + \sqrt{2}b_1)(5 + \sqrt{2})^{n-1} = (5 + \sqrt{2})^n \dots\dots\dots \textcircled{6}$$

また,  $a_{n+1} - \sqrt{2}b_{n+1} = (5 - \sqrt{2})(a_n - \sqrt{2}b_n)$  から,

$$a_n - \sqrt{2}b_n = (a_1 - \sqrt{2}b_1)(5 - \sqrt{2})^{n-1} = (5 - \sqrt{2})^n \dots\dots\dots \textcircled{7}$$

$$\textcircled{6}\textcircled{7} \text{より, } a_n = \frac{1}{2} \{ (5 + \sqrt{2})^n + (5 - \sqrt{2})^n \}, \quad b_n = \frac{1}{2\sqrt{2}} \{ (5 + \sqrt{2})^n - (5 - \sqrt{2})^n \}$$

### コメント

連立漸化式の応用についての有名問題です。この解法については「ピンポイントレクチャー」を参照してください。



## 問題

2つの数列 $\{a_n\}$ ,  $\{b_n\}$ を次の漸化式によって定める。

$$a_1 = 3, b_1 = 1, a_{n+1} = \frac{1}{2}(3a_n + 5b_n), b_{n+1} = \frac{1}{2}(a_n + 3b_n)$$

- (1) すべての自然数  $n$  について,  $a_n^2 - 5b_n^2 = 4$  であることを示せ。  
 (2) すべての自然数  $n$  について,  $a_n, b_n$  は自然数かつ  $a_n + b_n$  は偶数であることを証明せよ。 [2008]

## 解答例

- (1)  $a_{n+1} = \frac{1}{2}(3a_n + 5b_n)$ ,  $b_{n+1} = \frac{1}{2}(a_n + 3b_n)$  より,

$$\begin{aligned} a_{n+1}^2 - 5b_{n+1}^2 &= \frac{1}{4}(3a_n + 5b_n)^2 - \frac{5}{4}(a_n + 3b_n)^2 \\ &= \frac{1}{4}(9a_n^2 + 30a_nb_n + 25b_n^2) - \frac{5}{4}(a_n^2 + 6a_nb_n + 9b_n^2) \\ &= a_n^2 - 5b_n^2 \end{aligned}$$

$$\text{よって, } a_n^2 - 5b_n^2 = a_1^2 - 5b_1^2 = 3^2 - 5 \times 1^2 = 4$$

- (2) すべての自然数  $n$  について,  $a_n, b_n$  は自然数で  $a_n + b_n$  は偶数であることを, 数学的帰納法を用いて証明する。

(i)  $n=1$  のとき

$$a_1 = 3, b_1 = 1 \text{ より, } a_1, b_1 \text{ は自然数で, } a_1 + b_1 = 4 \text{ は偶数である。}$$

(ii)  $n=k$  のとき

$a_k, b_k$  は自然数で  $a_k + b_k$  は偶数であると仮定すると,

$$a_{k+1} = \frac{1}{2}(3a_k + 5b_k) = (a_k + 2b_k) + \frac{1}{2}(a_k + b_k)$$

$$b_{k+1} = \frac{1}{2}(a_k + 3b_k) = b_k + \frac{1}{2}(a_k + b_k)$$

$$a_{k+1} + b_{k+1} = \frac{1}{2}(3a_k + 5b_k) + \frac{1}{2}(a_k + 3b_k) = 2(a_k + 2b_k)$$

これより,  $a_{k+1}, b_{k+1}$  は自然数で  $a_{k+1} + b_{k+1}$  は偶数である。

(i)(ii)より,  $a_n, b_n$  は自然数で  $a_n + b_n$  は偶数である。

## コメント

整数と漸化式の融合問題です。意外な感じですが, (1)と(2)の間に直接的な関係はありません。

## 問題

- (1) 一般項  $a_n$  が  $an^3 + bn^2 + cn$  で表される数列  $\{a_n\}$  において,  $n^2 = a_{n+1} - a_n$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) が成り立つように, 定数  $a, b, c$  を定めよ。
- (2) (1)の結果を用いて,  $\sum_{k=1}^n k^2 = \frac{1}{6}n(n+1)(2n+1)$  となることを示せ。
- (3)  $1, 2, \dots, n$  の相異なる 2 数の積のすべての和を  $S(n)$  とする。たとえば,  $S(3) = 1 \times 2 + 1 \times 3 + 2 \times 3 = 11$  である。  $S(n)$  を  $n$  の 4 次式で表せ。 [2007]

## 解答例

- (1)  $a_n = an^3 + bn^2 + cn$  に対して,  $n^2 = a_{n+1} - a_n$  より,
- $$n^2 = a\{(n+1)^3 - n^3\} + b\{(n+1)^2 - n^2\} + c\{(n+1) - n\}$$
- $$3an^2 + (3a+2b)n + (a+b+c) = n^2$$
- どんな  $n$  に対しても成立する条件は,
- $$3a=1, \quad 3a+2b=0, \quad a+b+c=0$$
- よって,  $a = \frac{1}{3}, \quad b = -\frac{1}{2}, \quad c = \frac{1}{6}$
- (2) (1)より,  $\sum_{k=1}^n k^2 = \sum_{k=1}^n (a_{k+1} - a_k) = a_{n+1} - a_1$  となり,  $a_1 = a + b + c = 0$  から,

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n k^2 &= \frac{1}{3}(n+1)^3 - \frac{1}{2}(n+1)^2 + \frac{1}{6}(n+1) \\ &= \frac{1}{6}(n+1)\{2(n+1)^2 - 3(n+1) + 1\} = \frac{1}{6}(n+1)(2n^2 + n) \\ &= \frac{1}{6}n(n+1)(2n+1) \end{aligned}$$

- (3)  $1, 2, \dots, n$  の相異なる 2 数の積のすべての和  $S(n)$  は,

$$\begin{aligned} S(n) &= \frac{1}{2}\{(1+2+3+\dots+n)^2 - (1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots + n^2)\} \\ &= \frac{1}{2}\left\{\frac{1}{4}n^2(n+1)^2 - \frac{1}{6}n(n+1)(2n+1)\right\} \\ &= \frac{1}{24}n(n+1)\{3n(n+1) - 2(2n+1)\} = \frac{1}{24}n(n+1)(3n^2 - n - 2) \\ &= \frac{1}{24}n(n+1)(n-1)(3n+2) \end{aligned}$$

## コメント

数列の和の公式を証明する基本問題です。また, (3)は有名問題です。

**問 題**

以下の問いに答えよ。

- (1)  $a, b, c, x, y, z, M$  は正の実数とする。 $\frac{x}{a}, \frac{y}{b}, \frac{z}{c}$  がすべて  $M$  以下のとき、  
 $\frac{x+y+z}{a+b+c} \leq M$  であることを示せ。
- (2)  $\log_2 5$  と  $\log_3 5$  の大小を比較せよ。
- (3)  $n$  が正の整数のとき、 $1 < \frac{1+\log_2 5+(\log_2 5)^n}{1+\log_3 5+(\log_3 5)^n} < 2^n$  であることを示せ。 [2019]

**解答例**

- (1) 正の実数  $a, b, c, x, y, z, M$  に対して、 $\frac{x}{a} \leq M, \frac{y}{b} \leq M, \frac{z}{c} \leq M$  のとき、

$$x \leq aM, y \leq bM, z \leq cM$$

すると、 $x+y+z \leq aM+bM+cM = (a+b+c)M$  となり、

$$\frac{x+y+z}{a+b+c} \leq \frac{(a+b+c)M}{a+b+c} = M$$

なお、等号は  $\frac{x}{a} = \frac{y}{b} = \frac{z}{c} = M$  のときに成立する。

- (2) まず、 $0 < \log_5 2 < \log_5 3$  より、 $\frac{1}{\log_5 2} > \frac{1}{\log_5 3}$  となるので、

$$\log_2 5 > \log_3 5 \cdots \cdots \textcircled{1}$$

- (3)  $n$  が正の整数のとき、 $P = 1 + \log_2 5 + (\log_2 5)^n - \{1 + \log_3 5 + (\log_3 5)^n\}$  とおくと、

$$P = (\log_2 5 - \log_3 5) + \{(\log_2 5)^n - (\log_3 5)^n\}$$

①より  $\log_2 5 > \log_3 5 > \log_3 3 = 1$  なので、 $(\log_2 5)^n > (\log_3 5)^n$  となり、 $P > 0$

$$1 + \log_2 5 + (\log_2 5)^n > 1 + \log_3 5 + (\log_3 5)^n$$

$$\frac{1 + \log_2 5 + (\log_2 5)^n}{1 + \log_3 5 + (\log_3 5)^n} > 1 \cdots \cdots \textcircled{2}$$

また、 $Q = 2\log_3 5 - \log_2 5$  とおくと、

$$Q = \frac{2}{\log_5 3} - \frac{1}{\log_5 2} = \frac{2\log_5 2 - \log_5 3}{(\log_5 3)(\log_5 2)} = \frac{\log_5 4 - \log_5 3}{(\log_5 3)(\log_5 2)} > 0$$

すると、 $2\log_3 5 > \log_2 5$  より、 $0 < \frac{\log_2 5}{\log_3 5} < 2 \leq 2^n$  となり、さらに、

$$0 < \frac{1}{1} < 2^n, 0 < \frac{(\log_2 5)^n}{(\log_3 5)^n} = \left(\frac{\log_2 5}{\log_3 5}\right)^n < 2^n$$

- (1)の結果を用いて、 $\frac{1 + \log_2 5 + (\log_2 5)^n}{1 + \log_3 5 + (\log_3 5)^n} < 2^n \cdots \cdots \textcircled{3}$

$$\textcircled{2}\textcircled{3} \text{より, } 1 < \frac{1 + \log_2 5 + (\log_2 5)^n}{1 + \log_3 5 + (\log_3 5)^n} < 2^n$$

**コメント**

不等式の証明問題です。(3)の左の不等式は、(1)との関連を考えず普通に解いています。右の不等式は、(1)の結果を利用するために  $Q = 2\log_3 5 - \log_2 5$  を設定しました。

**問題**

$|z|^2 + 3 = 2(z + \bar{z})$  を満たす複素数  $z$  全体の集合を  $A$  とする。ただし  $\bar{z}$  は  $z$  の共役複素数である。

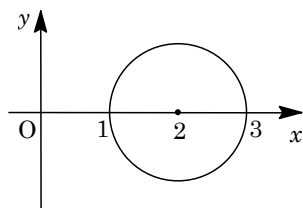
- (1) 集合  $A$  を複素数平面上に図示せよ。
- (2)  $A$  の要素  $z$  の偏角を  $\theta$  とする。ただし  $-\pi < \theta \leq \pi$  とする。 $z$  が  $A$  を動くとき、 $\theta$  のとりうる値の範囲を求めよ。
- (3)  $z^{60}$  が正の実数となる  $A$  の要素  $z$  の個数を求めよ。 [2019]

**解答例**

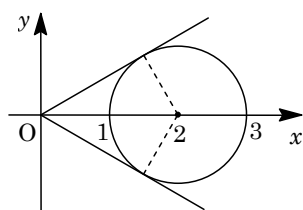
(1) 複素数  $z$  に対して、 $|z|^2 + 3 = 2(z + \bar{z})$  より、

$$|z|^2 - 2(z + \bar{z}) + 3 = 0, (z-2)(\bar{z}-2) = 1$$

よって、 $|z-2|^2 = 1$  より  $|z-2| = 1$  となり、 $z$  全体の集合  $A$  は、点 2 を中心とする半径 1 の円である。複素数平面上に図示すると、右図のようになる。



(2) 集合  $A$  に原点から接線を引いたとき、その 2 本の接線と実軸の正の向きとのなす角は  $\pm \frac{\pi}{6}$  である。



これより、 $z$  の偏角を  $\theta$  ( $-\pi < \theta \leq \pi$ ) とすると、右図より、 $-\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{\pi}{6}$  である。

(3)  $z^{60}$  の偏角は  $60\theta$  となり、(2)より  $-10\pi \leq 60\theta \leq 10\pi$  である。

すると、 $z^{60}$  が正の実数となるとき、 $60\theta = 2n\pi$  ( $-5 \leq n \leq 5$ ) と表せる。

- (i)  $60\theta = 0$  のとき  $\theta = 0$  より  $z = 1, 3$  となり、 $z$  は 2 個存在する。
- (ii)  $60\theta = \pm 2\pi$  のとき  $\theta = \pm \frac{\pi}{30}$  より、 $z$  は  $2+2=4$  個存在する。
- (iii)  $60\theta = \pm 4\pi$  のとき  $\theta = \pm \frac{\pi}{15}$  より、 $z$  は  $2+2=4$  個存在する。
- (iv)  $60\theta = \pm 6\pi$  のとき  $\theta = \pm \frac{\pi}{10}$  より、 $z$  は  $2+2=4$  個存在する。
- (v)  $60\theta = \pm 8\pi$  のとき  $\theta = \pm \frac{2}{15}\pi$  より、 $z$  は  $2+2=4$  個存在する。
- (vi)  $60\theta = \pm 10\pi$  のとき  $\theta = \pm \frac{\pi}{6}$  より、 $z$  は  $1+1=2$  個存在する。

(i)~(vi)より、求める  $z$  の個数は、 $2 + 4 \times 4 + 2 = 20$  である。

**コメント**

複素数平面上の円を題材とした問題です。(1)の共役複素数を用いた変形は、必修事項の 1 つです。

## 問題

複素数  $\alpha$  に対して、複素数平面上の 3 点  $O(0)$ ,  $A(\alpha)$ ,  $B(\alpha^2)$  を考える。次の条件 (I), (II), (III) をすべて満たす複素数  $\alpha$  全体の集合を  $S$  とする。

- (I)  $\alpha$  は実数でも純虚数でもない。  
 (II)  $|\alpha| > 1$  である。  
 (III) 三角形  $OAB$  は直角三角形である。

このとき、以下の問いに答えよ。

- (1)  $\alpha$  が  $S$  に属するとき、 $\angle OAB = \frac{\pi}{2}$  であることを示せ。  
 (2) 集合  $S$  を複素数平面上に図示せよ。  
 (3)  $x, y$  を  $\alpha^2 = x + yi$  を満たす実数とする。 $\alpha$  が  $S$  を動くとき、 $xy$  平面上の点  $(x, y)$  の軌跡を求め、図示せよ。 [2018]

## 解答例

(1) 3 点  $O(0)$ ,  $A(\alpha)$ ,  $B(\alpha^2)$  に対して、 $\triangle OAB$  は直角三角形より、

(a)  $\angle AOB = \frac{\pi}{2}$  のとき  $\arg \alpha = \theta$  とおくと  $\arg \alpha^2 = 2\theta$  となり、 $n$  を整数として、

$$2\theta - \theta = \frac{\pi}{2} + n\pi, \quad \theta = \frac{\pi}{2} + n\pi$$

ところが、これは  $\alpha$  が純虚数でないことに反する。

(b)  $\angle OBA = \frac{\pi}{2}$  のとき 辺  $OA$  が斜辺となるので、 $OA > OB$  となり、

$$|\alpha| > |\alpha^2| = |\alpha|^2, \quad 1 > |\alpha|$$

ところが、これは  $|\alpha| > 1$  に反する。

(a)(b) より、 $\angle OAB = \frac{\pi}{2}$  である。

(2)  $\angle OAB = \frac{\pi}{2}$  より、 $OB^2 = OA^2 + AB^2$  となり、

$$|\alpha^2|^2 = |\alpha|^2 + |\alpha^2 - \alpha|^2$$

すると、 $\alpha^2 \bar{\alpha}^2 = \alpha \bar{\alpha} + (\alpha^2 - \alpha)(\overline{\alpha^2 - \alpha})$  から、

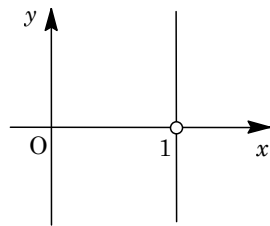
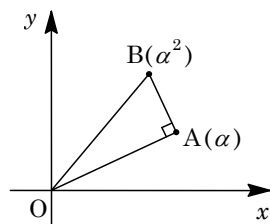
$$\begin{aligned} \alpha^2 (\bar{\alpha})^2 &= \alpha \bar{\alpha} + (\alpha^2 - \alpha) \{ (\bar{\alpha})^2 - \bar{\alpha} \} \\ &= \alpha \bar{\alpha} + \alpha^2 (\bar{\alpha})^2 - \alpha^2 \bar{\alpha} - \alpha (\bar{\alpha})^2 + \alpha \bar{\alpha} \end{aligned}$$

これより、 $2\alpha \bar{\alpha} - \alpha^2 \bar{\alpha} - \alpha (\bar{\alpha})^2 = 0$  となり、

$$\alpha \bar{\alpha} (2 - \alpha - \bar{\alpha}) = 0$$

$\alpha \bar{\alpha} > 0$  より、 $2 - \alpha - \bar{\alpha} = 0$  となり、 $\frac{\alpha + \bar{\alpha}}{2} = 1$

よって、 $\alpha$  の実部は 1 となるので、 $\alpha$  全体を図示すると右図の直線である。ただし、 $\alpha = 1$  は除く。



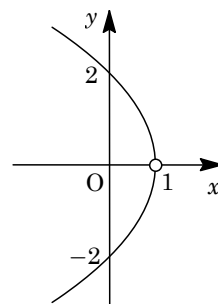
(3) (2)より, 0 でない実数  $k$  をとり,  $\alpha = 1 + ki$  とおくと,

$$\alpha^2 = (1 + ki)^2 = 1 - k^2 + 2ki \quad (k \neq 0)$$

ここで,  $\alpha^2 = x + yi$  なので,  $x = 1 - k^2$ ,  $y = 2k$  となり,

$$x = 1 - \frac{y^2}{4} \quad (y \neq 0)$$

よって, 点  $(x, y)$  の軌跡を図示すると, 右図の放物線となる。  
ただし, 点  $(1, 0)$  は除く。



### コメント

複素数と図形についての標準的な問題です。(2)はいろいろな方法が考えられますが, 解答例では三平方の定理を利用しました。

## 問題

$0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$  とする。複素数平面上において、原点を中心とする半径 1 の円の上に異なる 5 点  $P_1(w_1)$ ,  $P_2(w_2)$ ,  $P_3(w_3)$ ,  $P_4(w_4)$ ,  $P_5(w_5)$  が反時計まわりに並んでおり、次の 2 つの条件 (I), (II) を満たすとする。

$$(I) \quad (\cos^2 \alpha)(w_2 - w_1)^2 + (\sin^2 \alpha)(w_5 - w_1)^2 = 0 \text{ が成り立つ。}$$

$$(II) \quad \frac{w_3}{w_2} \text{ と } -\frac{w_4}{w_2} \text{ は方程式 } z^2 - \sqrt{3}z + 1 = 0 \text{ の解である。}$$

また、五角形  $P_1P_2P_3P_4P_5$  の面積を  $S$  とする。以下の問いに答えよ。

- (1) 五角形  $P_1P_2P_3P_4P_5$  の頂点  $P_1$  における内角  $\angle P_5P_1P_2$  を求めよ。
- (2)  $S$  を  $\alpha$  を用いて表せ。
- (3)  $R = |w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5|$  とする。このとき、 $R^2 + 2S$  は  $\alpha$  の値によらないことを示せ。

[2017]

## 解答例

- (1) 原点を中心とする半径 1 の円上に反時計まわりに並んだ 5 点  $P_1(w_1)$ ,  $P_2(w_2)$ ,  $P_3(w_3)$ ,  $P_4(w_4)$ ,  $P_5(w_5)$  に対して、 $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$  のとき、条件 (I) より、

$$(\cos^2 \alpha)(w_2 - w_1)^2 + (\sin^2 \alpha)(w_5 - w_1)^2 = 0$$

すると、 $(w_2 - w_1)^2 = -(\tan^2 \alpha)(w_5 - w_1)^2$  から、 $\left(\frac{w_2 - w_1}{w_5 - w_1}\right)^2 = -(\tan^2 \alpha)$  となり、

$$\frac{w_2 - w_1}{w_5 - w_1} = \pm (\tan \alpha) i \cdots \cdots \textcircled{1}$$

よって、 $\arg\left(\frac{w_2 - w_1}{w_5 - w_1}\right) = \pm \frac{\pi}{2}$  から、 $\angle P_5P_1P_2 = \left|\pm \frac{\pi}{2}\right| = \frac{\pi}{2}$

- (2) ①より、 $\left|\frac{w_2 - w_1}{w_5 - w_1}\right| = \tan \alpha$  となり、 $|w_2 - w_1| = (\tan \alpha)|w_5 - w_1|$

すると、直角三角形  $P_5P_1P_2$  は、直角をはさむ辺の長さに、 $P_1P_2 = (\tan \alpha)P_1P_5$  という関係があるので、これから  $\angle P_2P_5P_1 = \alpha$  となり、

$$\angle P_2OP_1 = 2\angle P_2P_5P_1 = 2\alpha$$

また、条件 (II) より、 $\frac{w_3}{w_2}$  と  $-\frac{w_4}{w_2}$  は方程式  $z^2 - \sqrt{3}z + 1 = 0$  の解  $z = \frac{\sqrt{3} \pm i}{2}$  より、

$$(i) \quad \frac{w_3}{w_2} = \frac{\sqrt{3} + i}{2}, \quad -\frac{w_4}{w_2} = \frac{\sqrt{3} - i}{2} \text{ のとき}$$

$$w_3 = \left(\cos \frac{\pi}{6} + i \sin \frac{\pi}{6}\right)w_2, \quad w_4 = \left(\cos \frac{5}{6}\pi + i \sin \frac{5}{6}\pi\right)w_2$$

$$(ii) \quad \frac{w_3}{w_2} = \frac{\sqrt{3} - i}{2}, \quad -\frac{w_4}{w_2} = \frac{\sqrt{3} + i}{2} \text{ のとき}$$

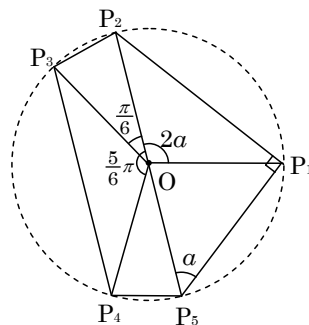
$$w_3 = \left(\cos \frac{11}{6}\pi + i \sin \frac{11}{6}\pi\right)w_2, \quad w_4 = \left(\cos \frac{7}{6}\pi + i \sin \frac{7}{6}\pi\right)w_2$$



これは、 $P_2, P_3, P_4$  が、円上を反時計まわりに並んでいることに反する。  
 (i)(ii)より、 $P_3$ は $P_2$ を $\frac{\pi}{6}$ 、 $P_4$ は $P_2$ を $\frac{5}{6}\pi$ だけ原点のまわりに回転させた点である。

以上より、五角形 $P_1P_2P_3P_4P_5$ は右図のようになり、

$$\begin{aligned} \triangle P_1OP_2 &= \frac{1}{2} \cdot 1^2 \cdot \sin 2a = \frac{1}{2} \sin 2a \\ \triangle P_5OP_1 &= \frac{1}{2} \cdot 1^2 \cdot \sin(\pi - 2a) = \frac{1}{2} \sin 2a \\ \triangle P_2OP_3 &= \frac{1}{2} \cdot 1^2 \cdot \sin \frac{\pi}{6} = \frac{1}{4} \\ \triangle P_3OP_4 &= \frac{1}{2} \cdot 1^2 \cdot \sin\left(\frac{5}{6}\pi - \frac{\pi}{6}\right) = \frac{\sqrt{3}}{4} \\ \triangle P_4OP_5 &= \frac{1}{2} \cdot 1^2 \cdot \sin\left(\pi - \frac{5}{6}\pi\right) = \frac{1}{4} \end{aligned}$$



よって、五角形 $P_1P_2P_3P_4P_5$ の面積を $S$ とすると、

$$S = \frac{1}{2} \sin 2a + \frac{1}{2} \sin 2a + \frac{1}{4} + \frac{\sqrt{3}}{4} + \frac{1}{4} = \sin 2a + \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{4}$$

(3)  $R = |w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5|$ に対し、 $w_1 = 1$ としても一般性を失うことなく、

$$\begin{aligned} w_2 &= \cos 2a + i \sin 2a, \quad w_5 = -\cos 2a - i \sin 2a \\ w_3 &= \cos\left(2a + \frac{\pi}{6}\right) + i \sin\left(2a + \frac{\pi}{6}\right), \quad w_4 = \cos\left(2a + \frac{5}{6}\pi\right) + i \sin\left(2a + \frac{5}{6}\pi\right) \end{aligned}$$

ここで、 $t = w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5$ とおくと、

$$\begin{aligned} t &= 1 + \cos\left(2a + \frac{\pi}{6}\right) + \cos\left(2a + \frac{5}{6}\pi\right) + i\left\{\sin\left(2a + \frac{\pi}{6}\right) + \sin\left(2a + \frac{5}{6}\pi\right)\right\} \\ &= 1 + 2\cos\left(2a + \frac{\pi}{2}\right)\cos\frac{\pi}{3} + 2i\sin\left(2a + \frac{\pi}{2}\right)\cos\frac{\pi}{3} = 1 - \sin 2a + i \cos 2a \end{aligned}$$

これより、 $R^2 = |t|^2 = (1 - \sin 2a)^2 + (\cos 2a)^2 = 2 - 2\sin 2a$  となり、

$$R^2 + 2S = 2 - 2\sin 2a + 2\sin 2a + 1 + \frac{\sqrt{3}}{2} = 3 + \frac{\sqrt{3}}{2}$$

したがって、 $R^2 + 2S$ は $a$ の値によらない。

### コメント

複素数平面上の図形に関する問題です。与えられた2つの条件を、絶対値や偏角を計算して、図形的な言葉に翻訳することがポイントです。

## 問題

複素数平面上を動く点  $z$  を考える。次の問いに答えよ。

- (1) 等式  $|z-1|=|z+1|$  を満たす点  $z$  の全体は虚軸であることを示せ。
- (2) 点  $z$  が原点を除いた虚軸上を動くとき、 $w = \frac{z+1}{z}$  が描く図形は直線から 1 点を除いたものとなる。この図形を描け。
- (3)  $a$  を正の実数とする。点  $z$  が虚軸上を動くとき、 $w = \frac{z+1}{z-a}$  が描く図形は円から 1 点を除いたものとなる。この円の中心と半径を求めよ。 [2016]

## 解答例

- (1)  $|z-1|=|z+1|$  ……①に対して、左辺は点  $z$  と点 1 との距離、右辺は点  $z$  と点  $-1$  との距離を表す。

これより、①を満たす点  $z$  の全体は、点 1 と点  $-1$  を結ぶ線分の垂直二等分線、すなわち虚軸となる。

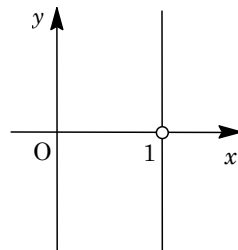
- (2)  $w = \frac{z+1}{z}$  ( $z \neq 0$ ) より、 $wz = z+1$  となり、 $(w-1)z = 1$  ……②

ここで、 $w=1$  とすると②は成立しないので、 $w \neq 1$  で  $z = \frac{1}{w-1}$  ……③

③を①に代入すると、 $|\frac{1}{w-1}-1|=|\frac{1}{w-1}+1|$  となり、 $|\frac{2-w}{w-1}|=|\frac{w}{w-1}|$  から、

$$\frac{|2-w|}{|w-1|} = \frac{|w|}{|w-1|}, \quad |2-w|=|w|$$

すると、点  $z$  が原点を除いた虚軸上を動くとき、点  $w$  は点 2 と点 0 を結ぶ線分の垂直二等分線、すなわち点 1 を通り実軸に垂直な直線上を動く。ただし  $w \neq 1$  から点 1 は除く。



- (3)  $a > 0$  で  $w = \frac{z+1}{z-a}$  より、 $w(z-a) = z+1$  となり、 $(w-1)z = aw+1$  ……④

ここで、 $w=1$  とすると④は成立しないので、 $w \neq 1$  で  $z = \frac{aw+1}{w-1}$  ……⑤

⑤を①に代入すると、 $|\frac{aw+1}{w-1}-1|=|\frac{aw+1}{w-1}+1|$  となり、

$$\left| \frac{(a-1)w+2}{w-1} \right| = \left| \frac{(a+1)w}{w-1} \right|, \quad |(a-1)w+2| = |(a+1)w|$$

両辺を 2 乗して、 $|(a-1)w+2|^2 = (a+1)^2 |w|^2$  より、

$$\{(a-1)w+2\}\{(a-1)\bar{w}+2\} = (a+1)^2 w\bar{w}$$

$$4aw\bar{w} - 2(a-1)w - 2(a-1)\bar{w} = 4, \quad w\bar{w} - \frac{a-1}{2a}w - \frac{a-1}{2a}\bar{w} = \frac{1}{a} \dots\dots⑥$$

$$\textcircled{6} \text{より, } \left(w - \frac{a-1}{2a}\right) \left(\overline{w} - \frac{a-1}{2a}\right) = \frac{1}{a} + \frac{(a-1)^2}{4a^2} \text{ となり,}$$

$$\left|w - \frac{a-1}{2a}\right|^2 = \frac{(a+1)^2}{4a^2}, \quad \left|w - \frac{a-1}{2a}\right| = \frac{a+1}{2a}$$

よって、点  $z$  が虚軸上を動くとき、点  $w$  は中心  $\frac{a-1}{2a}$  で半径  $\frac{a+1}{2a}$  の円を描く。ただし、 $w \neq 1$  から点  $1$  は除く。

### コメント

複素数平面上の変換を問う問題です。(1)において、まず①を変形して、 $z + \bar{z} = 0$  という関係を導き、この式をもとに(2), (3)を解くという方法もあります。

## 問題

$\alpha$  を実数でない複素数とし、 $\beta$  を正の実数とする。以下の問いに答えよ。ただし、複素数  $w$  に対してその共役複素数を  $\bar{w}$  で表す。

(1) 複素数平面上で、関係式  $\alpha\bar{z} + \bar{\alpha}z = |z|^2$  を満たす複素数  $z$  の描く図形を  $C$  とする。

このとき、 $C$  は原点を通る円であることを示せ。

(2) 複素数平面上で、 $(z - \alpha)(\beta - \bar{\alpha})$  が純虚数となる複素数  $z$  の描く図形を  $L$  とする。

$L$  は(1)で定めた  $C$  と 2 つの共有点をもつことを示せ。また、その 2 点を  $P$ 、 $Q$  とするとき、線分  $PQ$  の長さを  $\alpha$  と  $\bar{\alpha}$  を用いて表せ。

(3)  $\beta$  の表す複素数平面上の点を  $R$  とする。(2)で定めた点  $P$ 、 $Q$  と点  $R$  を頂点とする三角形が正三角形であるとき、 $\beta$  を  $\alpha$  と  $\bar{\alpha}$  を用いて表せ。 [2015]

## 解答例

(1)  $\alpha\bar{z} + \bar{\alpha}z = |z|^2$  より、 $|z|^2 - \alpha\bar{z} - \bar{\alpha}z = 0$  となり、 $|z|^2 - \alpha\bar{z} - \bar{\alpha}z + \alpha\bar{\alpha} = \alpha\bar{\alpha}$  から、

$$(z - \alpha)(\bar{z} - \bar{\alpha}) = |\alpha|^2, \quad |z - \alpha|^2 = |\alpha|^2, \quad |z - \alpha| = |\alpha|$$

よって、 $z$  の描く図形  $C$  は、点  $\alpha$  を中心とし半径が  $|\alpha|$  の円である。すなわち、原点を通る円となる。

(2)  $\alpha$  は虚数、 $\beta$  は正の実数より、 $\beta - \bar{\alpha} = \overline{\beta - \alpha}$  である。

さて、 $w = (z - \alpha)(\beta - \bar{\alpha})$  とおくと、

$$w = (z - \alpha)(\overline{\beta - \alpha}) = \frac{(z - \alpha)(\overline{\beta - \alpha})(\beta - \alpha)}{(\beta - \alpha)} = \frac{z - \alpha}{\beta - \alpha} |\beta - \alpha|^2$$

ここで、 $w$  は純虚数より、 $\frac{z - \alpha}{\beta - \alpha}$  は純虚数となる。

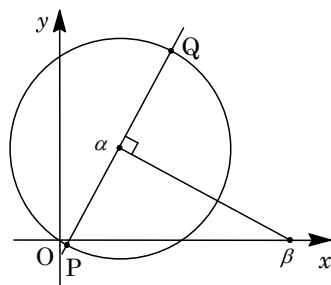
すると、 $z$  の描く図形  $L$  は、点  $\alpha$  を通り、点  $\alpha$  と点  $\beta$  を結ぶ線分に垂直な直線 ( $z \neq \alpha$ ) であり、 $C$  と  $L$  は 2 つの共有点をもつ。この 2 点を  $P$ 、 $Q$  とすると、 $P$ 、 $Q$  は円  $C$  の直径の両端となるので、

$$PQ = 2|\alpha| = 2\sqrt{\alpha\bar{\alpha}}$$

(3)  $R(\beta)$  としたとき、 $RP = RQ$  から、 $\triangle PQR$  が正三角形になる条件は、 $\angle PQR = \frac{\pi}{3}$  より、

$$|\beta - \alpha| = \sqrt{3}|\alpha|, \quad (\beta - \alpha)(\beta - \bar{\alpha}) = 3\alpha\bar{\alpha}, \quad \beta^2 - (\alpha + \bar{\alpha})\beta - 2\alpha\bar{\alpha} = 0$$

$$\text{すると、}\beta > 0 \text{ より、}\beta = \frac{\alpha + \bar{\alpha} + \sqrt{(\alpha + \bar{\alpha})^2 + 8\alpha\bar{\alpha}}}{2} = \frac{\alpha + \bar{\alpha} + \sqrt{\alpha^2 + 10\alpha\bar{\alpha} + \bar{\alpha}^2}}{2}$$



## コメント

複素数平面上で、円と直線の表現方法が問われています。

問題

$xy$  平面上に楕円  $C_1: \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{9} = 1$  ( $a > \sqrt{13}$ ), および双曲線  $C_2: \frac{x^2}{4} - \frac{y^2}{b^2} = 1$  ( $b > 0$ ) があり,  $C_1$  と  $C_2$  は同一の焦点をもつとする。また  $C_1$  と  $C_2$  の交点  $P(2\sqrt{1 + \frac{t^2}{b^2}}, t)$  ( $t > 0$ ) における  $C_1, C_2$  の接線をそれぞれ  $l_1, l_2$  とする。

- (1)  $a$  と  $b$  の間に成り立つ関係式を求め, 点  $P$  の座標を  $a$  を用いて表せ。
- (2)  $l_1$  と  $l_2$  が直交することを示せ。
- (3)  $a$  が  $a > \sqrt{13}$  を満たしながら動くときの点  $P$  の軌跡を図示せよ。 [2014]

解答例

(1) 楕円  $C_1: \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{9} = 1$  ( $a > \sqrt{13}$ ) ……①の焦点の座標は  $(\pm\sqrt{a^2 - 9}, 0)$  であり, 双曲線  $C_2: \frac{x^2}{4} - \frac{y^2}{b^2} = 1$  ( $b > 0$ ) ……②の焦点の座標は  $(\pm\sqrt{4 + b^2}, 0)$  である。

条件より,  $\sqrt{a^2 - 9} = \sqrt{4 + b^2}$  から,  $a^2 - 9 = 4 + b^2$ ,  $a^2 - b^2 = 13$  ……③

また,  $C_1$  と  $C_2$  の第 1 象限の交点  $P(s, t)$  は, ①②より,

$$\frac{s^2}{a^2} + \frac{t^2}{9} = 1 \dots\dots\dots④, \quad \frac{s^2}{4} - \frac{t^2}{b^2} = 1 \dots\dots\dots⑤$$

④⑤より,  $9s^2 + a^2t^2 = 9a^2$ ,  $b^2s^2 - 4t^2 = 4b^2$  となり,

$$(36 + a^2b^2)s^2 = 36a^2 + 4a^2b^2, \quad s^2 = \frac{36a^2 + 4a^2b^2}{36 + a^2b^2}$$

$$(a^2b^2 + 36)t^2 = 9a^2b^2 - 36b^2, \quad t^2 = \frac{9a^2b^2 - 36b^2}{36 + a^2b^2}$$

③を代入すると,

$$s^2 = \frac{36a^2 + 4a^2(a^2 - 13)}{36 + a^2(a^2 - 13)} = \frac{4a^2(a^2 - 4)}{(a^2 - 4)(a^2 - 9)} = \frac{4a^2}{a^2 - 9}$$

$$t^2 = \frac{(9a^2 - 36)(a^2 - 13)}{36 + a^2(a^2 - 13)} = \frac{9(a^2 - 4)(a^2 - 13)}{(a^2 - 4)(a^2 - 9)} = \frac{9(a^2 - 13)}{a^2 - 9}$$

これより,  $s = \frac{2a}{\sqrt{a^2 - 9}}$ ,  $t = \frac{3\sqrt{a^2 - 13}}{\sqrt{a^2 - 9}}$  となり,  $P\left(\frac{2a}{\sqrt{a^2 - 9}}, \frac{3\sqrt{a^2 - 13}}{\sqrt{a^2 - 9}}\right)$

(2)  $P(s, t)$  における  $C_1$  の接線  $l_1$ ,  $C_2$  の接線  $l_2$  の法線ベクトルを, それぞれ  $\vec{n}_1, \vec{n}_2$  とおくと,  $\vec{n}_1 = \left(\frac{s}{a^2}, \frac{t}{9}\right)$ ,  $\vec{n}_2 = \left(\frac{s}{4}, -\frac{t}{b^2}\right)$  となり, (1)から,

$$\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2 = \frac{s^2}{4a^2} - \frac{t^2}{9b^2} = \frac{4a^2}{4a^2(a^2 - 9)} - \frac{9(a^2 - 13)}{9(a^2 - 13)(a^2 - 9)} = 0$$

よって,  $l_1$  と  $l_2$  は直交する。

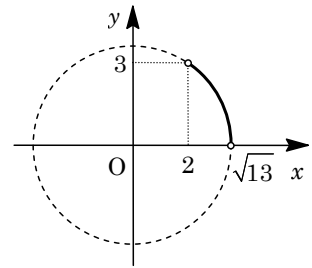
$$(3) (1) \text{より, } s^2 = \frac{4a^2}{a^2-9} = 4 + \frac{36}{a^2-9}, \quad t^2 = \frac{9(a^2-13)}{a^2-9} = 9 - \frac{36}{a^2-9}$$

$$\text{これより, } s^2 + t^2 = 13$$

$$\text{また, } a > \sqrt{13} \text{ のとき, } 0 < \frac{36}{a^2-9} < 9 \text{ より,}$$

$$4 < s^2 < 13 \quad (2 < s < \sqrt{13}), \quad 0 < t^2 < 9 \quad (0 < t < 3)$$

よって、点  $P(s, t)$  の軌跡は右図の実線部である。



### コメント

計算量は半端ではありません。特に(3)において、1行目の変形をしなかったときは、たいへんなことになります。

**問題**

- 楕円  $C: \frac{x^2}{16} + \frac{y^2}{9} = 1$  の、直線  $y = mx$  と平行な 2 接線を  $l_1, l_1'$  とし、 $l_1, l_1'$  に直交する  $C$  の 2 接線を  $l_2, l_2'$  とする。
- (1)  $l_1, l_1'$  の方程式を  $m$  を用いて表せ。
  - (2)  $l_1$  と  $l_1'$  の距離  $d_1$  および  $l_2$  と  $l_2'$  の距離  $d_2$  をそれぞれ  $m$  を用いて表せ。ただし、平行な 2 直線  $l, l'$  の距離とは、 $l$  上の 1 点と直線  $l'$  の距離である。
  - (3)  $(d_1)^2 + (d_2)^2$  は  $m$  によらず一定であることを示せ。
  - (4)  $l_1, l_1', l_2, l_2'$  で囲まれる長方形の面積  $S$  を  $d_1$  を用いて表せ。さらに  $m$  が変化するとき、 $S$  の最大値を求めよ。 [2013]

**解答例**

(1)  $C: \frac{x^2}{16} + \frac{y^2}{9} = 1$  から、 $9x^2 + 16y^2 = 9 \cdot 16 \cdots \cdots \textcircled{1}$

直線  $y = mx$  に平行な直線を  $y = mx + n \cdots \cdots \textcircled{2}$  とおき、 $\textcircled{1}$  に代入すると、

$$9x^2 + 16(mx + n)^2 = 9 \cdot 16$$

$$(9 + 16m^2)x^2 + 32mnx + 16n^2 - 9 \cdot 16 = 0$$

$\textcircled{1}\textcircled{2}$  が接することより、

$$D/4 = 16^2 m^2 n^2 - (9 + 16m^2)(16n^2 - 9 \cdot 16) = 0$$

$$16m^2 n^2 - (9 + 16m^2)(n^2 - 9) = 0, \quad n^2 - 9 - 16m^2 = 0$$

よって、 $n = \pm \sqrt{16m^2 + 9}$  から、 $l_1, l_1'$  の方程式は、 $y = mx \pm \sqrt{16m^2 + 9}$

(2) 原点と  $l_1, l_1'$  の距離はともに  $\frac{\sqrt{16m^2 + 9}}{\sqrt{m^2 + 1}}$  なので、 $l_1$  と  $l_1'$  の距離  $d_1$  は、

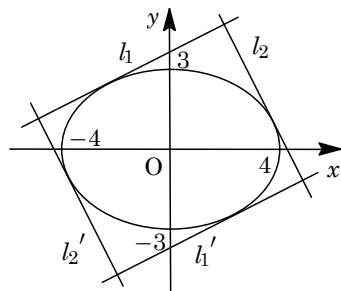
$$d_1 = \frac{2\sqrt{16m^2 + 9}}{\sqrt{m^2 + 1}} \cdots \cdots \textcircled{3}$$

また、 $l_2$  と  $l_2'$  の距離  $d_2$  は、 $m \neq 0$  のとき、 $\textcircled{3}$  において  $m$  を  $-\frac{1}{m}$  に置き換え、

$$d_2 = \frac{2\sqrt{16\left(-\frac{1}{m}\right)^2 + 9}}{\sqrt{\left(-\frac{1}{m}\right)^2 + 1}} = \frac{2\sqrt{9m^2 + 16}}{\sqrt{m^2 + 1}} \cdots \cdots \textcircled{4}$$

なお、 $m = 0$  のときは  $d_2 = 8$  となるが、このときも  $\textcircled{4}$  は成立している。

(3)  $(d_1)^2 + (d_2)^2 = \frac{4(16m^2 + 9)}{m^2 + 1} + \frac{4(9m^2 + 16)}{m^2 + 1} = 100$



(4)  $h, h', l_2, l_2'$  で囲まれる長方形の面積  $S$  は,  $S = d_1 d_2 = d_1 \sqrt{100 - (d_1)^2}$

ここで,  $d_1 = t$  とおくと,  $6 \leq t < 8$  となり,

$$S = t \sqrt{100 - t^2} = \sqrt{100t^2 - t^4} = \sqrt{-(t^2 - 50)^2 + 2500}$$

よって,  $36 \leq t^2 < 64$  から,  $t^2 = 50$  のとき  $S$  は最大値  $\sqrt{2500} = 50$  をとる。

### コメント

楕円の有名問題です。誘導が非常に細かく付いています。



**問題**

2つの双曲線  $C: x^2 - y^2 = 1$ ,  $H: x^2 - y^2 = -1$  を考える。双曲線  $H$  上の点  $P(s, t)$  に対して、方程式  $sx - ty = 1$  で定まる直線を  $l$  とする。

- (1) 直線  $l$  は点  $P$  を通らないことを示せ。
- (2) 直線  $l$  と双曲線  $C$  は異なる2点  $Q, R$  で交わることを示し、 $\triangle PQR$  の重心  $G$  の座標を  $s, t$  を用いて表せ。
- (3) (2)における3点  $G, Q, R$  に対して、 $\triangle GQR$  の面積は点  $P(s, t)$  の位置によらず一定であることを示せ。 [2012]

**解答例**

(1)  $C: x^2 - y^2 = 1 \dots\dots ①$ ,  $H: x^2 - y^2 = -1 \dots\dots ②$

に対して、 $H$  上の点  $P(s, t)$  の原点对称の点を  $P'(-s, -t)$  とおくと、 $P'$  における  $H$  の接線の方程式は、

$$-sx - (-t)y = -1, \quad sx - ty = 1 \dots\dots ③$$

よって、直線  $l: sx - ty = 1$  は点  $P$  を通らない。

(2) ①③を連立して、 $x^2 - \frac{1}{t^2}(sx - 1)^2 = 1$  となり、

$$(t^2 - s^2)x^2 + 2sx - t^2 - 1 = 0$$

点  $P(s, t)$  は  $H$  上の点から、 $s^2 - t^2 = -1 \dots\dots ④$  となり、

$$x^2 + 2sx - t^2 - 1 = 0 \dots\dots ⑤$$

⑤は、 $D/4 = s^2 + t^2 + 1 > 0$  となるので、異なる2実数解をもつ。すなわち、直線  $l$  と双曲線  $C$  は異なる2点  $Q, R$  で交わる。

そこで、⑤の解を  $x = \alpha, \beta$  とおくと、 $Q(\alpha, \frac{s}{t}\alpha - \frac{1}{t})$ ,  $R(\beta, \frac{s}{t}\beta - \frac{1}{t})$  と表せ、

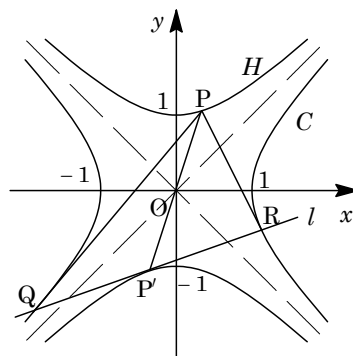
$$\alpha + \beta = -2s, \quad \frac{\alpha + \beta}{2} = -s$$

これより、線分  $QR$  の中点は  $P'$  となり、 $\triangle PQR$  の重心  $G$  は線分  $PP'$  を  $2:1$  に内分する点である。

よって、 $G(\frac{-2s+s}{3}, \frac{-2t+t}{3})$  から、 $G(\frac{-s}{3}, \frac{-t}{3})$  である。

(3)  $\triangle OQR = \frac{1}{2} \left| \alpha \left( \frac{s}{t}\beta - \frac{1}{t} \right) - \beta \left( \frac{s}{t}\alpha - \frac{1}{t} \right) \right| = \frac{1}{2} \left| \frac{\beta - \alpha}{t} \right| = \frac{1}{2} \cdot \frac{2\sqrt{s^2 + t^2 + 1}}{|t|}$

④より、 $\triangle OQR = \frac{\sqrt{t^2 - 1 + t^2 + 1}}{|t|} = \frac{\sqrt{2t^2}}{|t|} = \sqrt{2}$



以上より,  $\triangle GQR = \frac{1}{3}\triangle PQR = \frac{2}{3}\triangle OQR = \frac{2\sqrt{2}}{3}$  となり, 点 P の位置によらず一定の値をとる。

### コメント

(1)は普通に連立して計算をしてもよいのですが, 直線  $l$  の方程式が, いかにも意味ありげなので工夫をしました。そして, 図形的に結論を記しています。

**問題**

$d$  を正の定数とする。2 点  $A(-d, 0)$ ,  $B(d, 0)$  からの距離の和が  $4d$  である点  $P$  の軌跡として定まる楕円  $E$  を考える。点  $A$ , 点  $B$ , 原点  $O$  から楕円  $E$  上の点  $P$  までの距離をそれぞれ  $AP$ ,  $BP$ ,  $OP$  とかく。このとき, 以下の問いに答えよ。

- (1) 楕円  $E$  の長軸と短軸の長さを求めよ。
- (2)  $AP^2 + BP^2$  および  $AP \cdot BP$  を,  $OP$  と  $d$  を用いて表せ。
- (3) 点  $P$  が楕円  $E$  全体を動くとき,  $AP^3 + BP^3$  の最大値と最小値を  $d$  を用いて表せ。

[2011]

**解答例**

(1) 焦点が  $A(-d, 0)$ ,  $B(d, 0)$  より, 楕円  $E$  の中心は原点となるので,

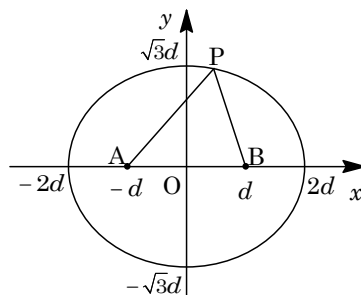
$$E: \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (a^2 - b^2 = d^2)$$

条件より,  $2a = 4d$  から,  $a = 2d$  となり,

$$b^2 = a^2 - d^2 = 3d^2, \quad b = \sqrt{3}d$$

これより, 長軸の長さは  $2a = 4d$ , 短軸の長さは

$$2b = 2\sqrt{3}d \text{ となる。}$$



(2)  $P(x, y)$  とおくと,

$$\begin{aligned} AP^2 + BP^2 &= (x+d)^2 + y^2 + (x-d)^2 + y^2 = 2(x^2 + y^2) + 2d^2 \\ &= 2OP^2 + 2d^2 \dots\dots\dots \textcircled{1} \end{aligned}$$

また,  $AP + BP = 4d$  なので, ①より,

$$2OP^2 + 2d^2 = (AP + BP)^2 - 2AP \cdot BP = 16d^2 - 2AP \cdot BP$$

$$\text{よって, } AP \cdot BP = 8d^2 - OP^2 - d^2 = 7d^2 - OP^2 \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

(3)  $AP^3 + BP^3 = (AP + BP)(AP^2 + BP^2 - AP \cdot BP)$  なので, ①②より,

$$AP^3 + BP^3 = 4d(2OP^2 + 2d^2 - 7d^2 + OP^2) = 4d(3OP^2 - 5d^2) \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

ここで,  $\sqrt{3}d \leq OP \leq 2d$  から  $3d^2 \leq OP^2 \leq 4d^2$  であり, ③より,  $AP^3 + BP^3$  の最大値は  $4d(12d^2 - 5d^2) = 28d^3$ , 最小値は  $4d(9d^2 - 5d^2) = 16d^3$  となる。

**コメント**

楕円の定義について, 基本事項を確認する問題です。なお, ①式は中線定理です。

## 問題

直線  $l: mx + ny = 1$  が、楕円  $C: \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$  ( $a > b > 0$ ) に接しながら動くとする。

- (1) 点  $(m, n)$  の軌跡は楕円になることを示せ。  
 (2)  $C$  の焦点  $F_1(-\sqrt{a^2 - b^2}, 0)$  と  $l$  との距離を  $d_1$  とし、もう 1 つの焦点  $F_2(\sqrt{a^2 - b^2}, 0)$  と  $l$  との距離を  $d_2$  とする。このとき  $d_1 d_2 = b^2$  を示せ。 [2010]

## 解答例

- (1) 楕円  $C: \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$  上の接点を  $(a \cos \theta, b \sin \theta)$  とおくと、接線の方程式は、

$$\frac{a \cos \theta}{a^2} x + \frac{b \sin \theta}{b^2} y = 1, \quad \frac{\cos \theta}{a} x + \frac{\sin \theta}{b} y = 1 \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

①が直線  $l: mx + ny = 1$  に一致することより、

$$m = \frac{\cos \theta}{a}, \quad n = \frac{\sin \theta}{b}$$

これより、 $a^2 m^2 + b^2 n^2 = 1 \dots\dots\dots \textcircled{2}$  となり、点  $(m, n)$  の軌跡は楕円になる。

- (2)  $C$  の焦点  $F_1(-\sqrt{a^2 - b^2}, 0)$ 、 $F_2(\sqrt{a^2 - b^2}, 0)$  と  $l: mx + ny - 1 = 0$  との距離を、それぞれ  $d_1$ 、 $d_2$  とすると、

$$d_1 = \frac{|-m\sqrt{a^2 - b^2} - 1|}{\sqrt{m^2 + n^2}}, \quad d_2 = \frac{|m\sqrt{a^2 - b^2} - 1|}{\sqrt{m^2 + n^2}}$$

$$\text{すると、} d_1 d_2 = \frac{|-m^2(a^2 - b^2) + 1|}{m^2 + n^2} = \frac{|-a^2 m^2 + b^2 m^2 + 1|}{m^2 + n^2}$$

$$\textcircled{2} \text{を代入すると、} d_1 d_2 = \frac{|b^2 n^2 + b^2 m^2|}{m^2 + n^2} = \frac{b^2(n^2 + m^2)}{m^2 + n^2} = b^2$$

## コメント

(1)では、接線の公式を利用しました。重解条件の利用によっても②を導けますが、計算量はかなり増加します。

問題

点  $P(x, y)$  が双曲線  $\frac{x^2}{2} - y^2 = 1$  上を動くとき、点  $P(x, y)$  と点  $A(a, 0)$  との距離の最小値を  $f(a)$  とする。

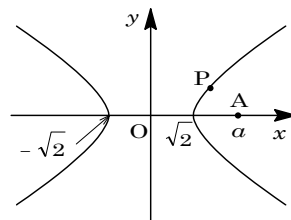
- (1)  $f(a)$  を  $a$  で表せ。
- (2)  $f(a)$  を  $a$  の関数とみなすとき、 $ab$  平面上に曲線  $b = f(a)$  の概形をかけ。

[2009]

解答例

(1)  $\frac{x^2}{2} - y^2 = 1$  より、 $y^2 = \frac{x^2}{2} - 1 \cdots \cdots (*)$  となり、

$$\begin{aligned} AP^2 &= (x-a)^2 + y^2 = (x-a)^2 + \frac{x^2}{2} - 1 \\ &= \frac{3}{2}x^2 - 2ax + a^2 - 1 \\ &= \frac{3}{2}\left(x - \frac{2}{3}a\right)^2 + \frac{1}{3}a^2 - 1 \end{aligned}$$



ここで、(\*)から、 $\frac{x^2}{2} - 1 \geq 0$  より、 $x \leq -\sqrt{2}$ 、 $\sqrt{2} \leq x$

(i)  $\frac{2}{3}a \leq -\sqrt{2}$ 、 $\sqrt{2} \leq \frac{2}{3}a$  ( $a \leq -\frac{3\sqrt{2}}{2}$ 、 $\frac{3\sqrt{2}}{2} \leq a$ ) のとき

$x = \frac{2}{3}a$  で  $AP^2$  は最小となり、 $AP$  の最小値  $f(a) = \sqrt{\frac{1}{3}a^2 - 1}$

(ii)  $-\sqrt{2} < \frac{2}{3}a < 0$  ( $-\frac{3\sqrt{2}}{2} < a < 0$ ) のとき

$x = -\sqrt{2}$  で  $AP^2$  は最小となり、 $AP$  の最小値  $f(a) = \sqrt{(-\sqrt{2} - a)^2} = |a + \sqrt{2}|$

(iii)  $0 \leq \frac{2}{3}a < \sqrt{2}$  ( $0 \leq a < \frac{3\sqrt{2}}{2}$ ) のとき

$x = \sqrt{2}$  で  $AP^2$  は最小となり、 $AP$  の最小値  $f(a) = \sqrt{(\sqrt{2} - a)^2} = |a - \sqrt{2}|$

(2) 曲線  $b = f(a)$  に対して、(1)より、

(i)  $a \leq -\frac{3\sqrt{2}}{2}$ 、 $\frac{3\sqrt{2}}{2} \leq a$  のとき

曲線  $b = \sqrt{\frac{1}{3}a^2 - 1}$  は、 $b^2 = \frac{1}{3}a^2 - 1$  から、双曲線  $\frac{1}{3}a^2 - b^2 = 1$  の上半分となる。

また、漸近線は、 $b = \pm \frac{1}{\sqrt{3}}a$  である。

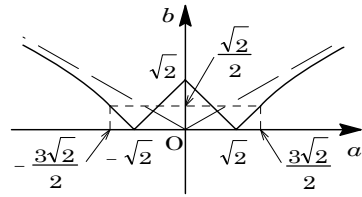
(ii)  $-\frac{3\sqrt{2}}{2} < a < 0$  のとき

曲線  $b = |a + \sqrt{2}|$  は、折れ線  $b = |a|$  を  $a$  軸方向に  $-\sqrt{2}$  だけ平行移動したもの。

(iii)  $0 \leq a < \frac{3\sqrt{2}}{2}$  のとき

曲線  $b = |a - \sqrt{2}|$  は、折れ線  $b = |a|$  を  $a$  軸方向に  $\sqrt{2}$  だけ平行移動したもの。

以上より、曲線  $b = f(a)$  の概形は、右図のようになる。



### コメント

最初に双曲線のグラフを書き、「当たり」をつけておくとミスが防げます。

**問題**

放物線  $C: y = x^2$  上の異なる 2 点  $P(t, t^2)$ ,  $Q(s, s^2)$  ( $s < t$ ) における接線の交点を  $R(X, Y)$  とする。

- (1)  $X, Y$  を  $t, s$  を用いて表せ。
- (2) 点  $P, Q$  が  $\angle PRQ = \frac{\pi}{4}$  を満たしながら  $C$  上を動くとき、点  $R$  は双曲線上を動くことを示し、かつ、その双曲線の方程式を求めよ。 [2008]

**解答例**

- (1)  $C: y = x^2$  に対し、 $y' = 2x$  より、 $P(t, t^2)$  における接線の方程式は、

$$y - t^2 = 2t(x - t), \quad y = 2tx - t^2 \dots\dots\dots ①$$

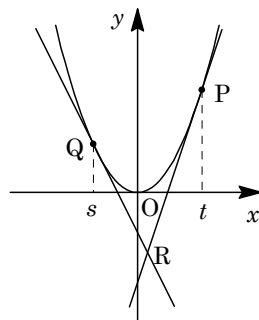
同様に、 $Q(s, s^2)$  における接線の方程式は、

$$y = 2sx - s^2 \dots\dots\dots ②$$

$$①② \text{より, } 2tx - t^2 = 2sx - s^2, \quad 2(t-s)x = t^2 - s^2$$

$$s < t \text{ より } x = \frac{t+s}{2} \text{ となり, } ① \text{ から } y = 2t \cdot \frac{t+s}{2} - t^2 = ts$$

$$①② \text{ の交点は } R(X, Y) \text{ より, } X = \frac{t+s}{2}, \quad Y = ts \dots\dots\dots ③$$



- (2) (1)より、 $\overrightarrow{RP} = \frac{t-s}{2}(1, 2t)$ ,  $\overrightarrow{RQ} = \frac{t-s}{2}(-1, -2s)$  となり、条件より、この 2 つのベクトルのなす角が  $\frac{\pi}{4}$  なので、

$$\cos \frac{\pi}{4} = \frac{\overrightarrow{RP} \cdot \overrightarrow{RQ}}{|\overrightarrow{RP}| |\overrightarrow{RQ}|}, \quad \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{-1 - 4ts}{\sqrt{1 + 4t^2} \sqrt{1 + 4s^2}}$$

$-1 - 4st > 0$  ( $4st < -1$ ) のもとで、両辺を 2 乗すると、

$$2(-1 - 4ts)^2 = (1 + 4t^2)(1 + 4s^2), \quad 16t^2s^2 - 4(t^2 + s^2) + 16ts + 1 = 0$$

$$\text{変形して, } 16t^2s^2 - 4(t+s)^2 + 24ts + 1 = 0$$

$$③ \text{ を代入すると, } 16Y^2 - 16X^2 + 24Y + 1 = 0$$

$$16\left(Y + \frac{3}{4}\right)^2 - 16X^2 = 8, \quad 2X^2 - 2\left(Y + \frac{3}{4}\right)^2 = -1$$

よって、 $R(X, Y)$  は双曲線上を動き、その方程式は  $2x^2 - 2\left(y + \frac{3}{4}\right)^2 = -1$  である。

**コメント**

2 接線のなす角の扱いについては、内積を利用しています。tan の加法定理を用いても可能です。なお、題意が双曲線の方程式を求めるだけということなので、(2)の記述はアバウトです。s, t の実数条件や  $4st < -1$  を加味すると、R の軌跡は双曲線の下側の枝となります。

## 問題

$xy$  平面上で、2次曲線  $C: x^2 + ay^2 + by = 0$  が直線  $L: y = 2x - 1$  に点  $P$  で接している。ただし、 $a \neq -\frac{1}{4}$  とする。

- (1)  $a$  と  $b$  の関係式を求めよ。
- (2)  $C$  が楕円、放物線、双曲線となるそれぞれの場合に、 $b$  の値の範囲を求めよ。
- (3)  $C$  が楕円となる場合の接点  $P$  の存在範囲を求め、 $xy$  平面上に図示せよ。 [2007]

## 解答例

- (1)  $C: x^2 + ay^2 + by = 0$  ……①,  $L: y = 2x - 1$  ……②が接することより、  
 $x^2 + a(2x - 1)^2 + b(2x - 1) = 0$ ,  $(4a + 1)x^2 - 2(2a - b)x + a - b = 0$  ……③  
 $4a + 1 \neq 0$  から、 $D/4 = (2a - b)^2 - (4a + 1)(a - b) = 0$  となり、

$$b^2 + b - a = 0$$

- (2) (1)から、 $a = b^2 + b \neq -\frac{1}{4}$  より、 $(b + \frac{1}{2})^2 \neq 0$  すなわち  $b \neq -\frac{1}{2}$  のもとで、

$$C: x^2 + (b^2 + b)y^2 + by = 0$$
 ……④

- (i)  $b^2 + b = 0$  ( $b = 0, -1$ ) のとき

$b = 0$  のとき④は  $x = 0$ ,  $b = -1$  のとき④は  $y = x^2$  となる。

- (ii)  $b^2 + b \neq 0$  ( $b \neq 0, b \neq -1$ ) のとき

$$\text{④より、} x^2 + (b^2 + b)\left(y^2 + \frac{1}{b+1}y\right) = 0$$

$$x^2 + (b^2 + b)\left(y + \frac{1}{2b+2}\right)^2 = \frac{b}{4b+4}$$

よって、 $b^2 + b > 0$  ( $b < -1, 0 < b$ ) のとき  $\frac{b}{4b+4} > 0$  となり楕円を表し、また、 $b^2 + b < 0$  ( $-1 < b < 0$ ) のとき双曲線を表す。

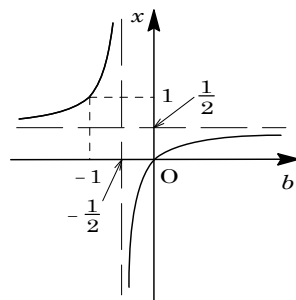
以上より、2次曲線  $C$  は  $b < -1, 0 < b$  のとき楕円、 $-1 < b < -\frac{1}{2}, -\frac{1}{2} < b < 0$  のとき双曲線、 $b = -1$  のとき放物線となる。

- (3) 接点  $P$  の  $x$  座標は、③より、

$$\begin{aligned} x &= \frac{2a - b}{4a + 1} = \frac{2(b^2 + b) - b}{4(b^2 + b) + 1} = \frac{b(2b + 1)}{(2b + 1)^2} \\ &= \frac{b}{2b + 1} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2(2b + 1)} \end{aligned}$$

$C$  は  $b < -1, 0 < b$  のとき楕円となるので、

$$0 < x < \frac{1}{2}, \frac{1}{2} < x < 1$$

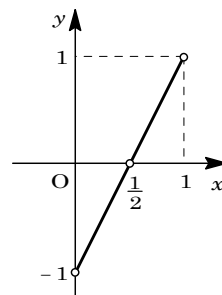




よって、接点 P の存在範囲は、

$$y = 2x - 1 \left( 0 < x < \frac{1}{2}, \frac{1}{2} < x < 1 \right)$$

これを図示すると、右図の太線部となる。ただし、白丸は含まない。



### コメント

計算量はやや多めですが、2次曲線の標準的な問題です。