

解析学A期末試験

平成 28 年 2 月 4 日

1 後期中間試験で $f(x, y) = x^3 - 3x(1 + y^2)$ が極値を持たないことを示した。このことを認めて次の各問いに答えよ。

- (1) 単位円周 $C = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 | \varphi(x, y) = x^2 + y^2 = 1\}$ 上における $f(x, y)$ の最大値を求めよ。C 上で最大値を持つことは認めてよい。

単位円周上の点 (a, b) に対し、仮に

$$\varphi'(a, b) = 2[a \ b] = [0 \ 0]$$

とすると、 $a = b = 0$ となり矛盾します。よって

$$\varphi'(a, b) \neq [0 \ 0]$$

でなければなりません。したがって単位円周上の点 $f(a, b)$ が極値ならば次が成り立ちます。

$$\exists \lambda \in \mathbb{R} : f'(a, b) = \lambda \varphi'(a, b) \quad i.e. \quad 3[a^2 - b^2 - 1 \quad -2ab] = \lambda \cdot 2[a \ b]$$

よって

$$\begin{cases} 3a^2 - 3b^2 - 3 = 2\lambda a \\ -6ab = 2\lambda b \end{cases}$$

$$3a^2b - 3b^3 - 3b = -6a^2b$$

$$9a^2b - 3b^3 - 3b = 0$$

$$\therefore b = 0, a = 1 \quad or \quad b = \pm \frac{1}{\sqrt{2}}, a = \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (\text{複合同順でない})$$

これより、 $f(a, b)$ が最大となる点をもとめると、

$$f\left(-\frac{1}{\sqrt{2}}, \pm \frac{1}{\sqrt{2}}\right) = -\frac{1}{2\sqrt{2}} + 3 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{3}{2} = -\frac{1}{2\sqrt{2}} + \frac{9}{2\sqrt{2}} = \frac{8}{2\sqrt{2}} = \frac{8\sqrt{2}}{4} = 2\sqrt{2}$$

したがって最大値は $2\sqrt{2}$ です。

- (2) 単位閉円板 $D = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 | x^2 + y^2 \leq 1\}$ 上での $f(x, y)$ の最大値を求めよ。D 上で最大値を持つことは認めてよい。

$f(x, y)$, $\varphi(x, y)$ の Jacobi 行列は、

$$f'(x, y) = 3[x^2 - y^2 - 1 \quad -2xy]$$

$$\varphi'(a, b) = 2[x \ y]$$

です。仮に円板の内部 $\varphi(x, y) < 1$ で最大値をとったとすると、 $f'(x, y) = 0$ でなければなりません。が、 $x^2 - y^2 - 1 = -2xy = 0$ となり矛盾します。よって最大値は単位円周上でとらなければなりません。

したがって単位閉円板 $D = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 | x^2 + y^2 \leq 1\}$ 上の最大値は、(1) より $2\sqrt{2}$ です。

2 次の各問いに答えよ.

- (1) $D = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 | 0 \leq y \leq \frac{\pi}{4}, 0 \leq x \leq \sin y\}$ を図示せよ.

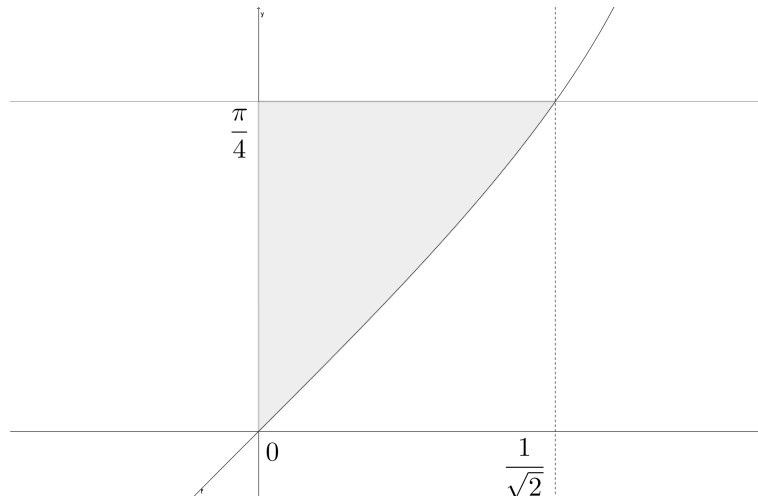


図 1: 積分領域 D

- (2) $I = \iint_D \sqrt{1-x^2} dx dy$ を求めよ. ただし公式 $\int \sqrt{1-x^2} dx = \frac{1}{2}(x\sqrt{1-x^2} + \arcsin x) + c$ を用いてよい.

$$\begin{aligned}
 & \int_0^{\frac{\pi}{4}} \int_0^{\sin y} \sqrt{1-x^2} dx dy \\
 &= \int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{1}{2} \left[x\sqrt{1-x^2} + \arcsin x \right]_0^{\sin y} dy \\
 &= \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{4}} (\sin y \cos y + \arcsin \sin y) dy \\
 &= \frac{1}{2} \left(\left[\frac{1}{2} \sin^2 y \right]_0^{\frac{\pi}{4}} + [y \arcsin \sin y]_0^{\frac{\pi}{4}} - \int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{\cos y}{\sqrt{1-\sin^2 y}} y dy \right) \\
 &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{4} + \frac{\pi^2}{16} - \frac{1}{2} [y^2]_0^{\frac{\pi}{4}} \right) \\
 &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{4} + \frac{\pi^2}{16} - \frac{\pi^2}{32} \right) \\
 &= \frac{1}{8} + \frac{\pi^2}{64} \\
 &\neq \frac{1}{8} + \frac{\pi^2}{16}
 \end{aligned}$$

3 次の各問いに答えよ.

- (1) $D = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 | 0 \leq x - y \leq 1, 0 \leq x + y \leq 1\}$ を図示せよ. なお (2) で変数変換を用いるときは新たな積分領域も描け.

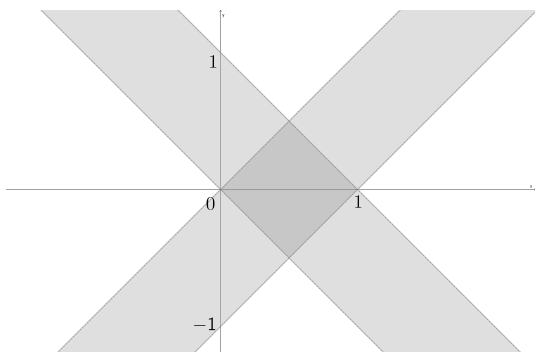


図 2: 積分領域 D

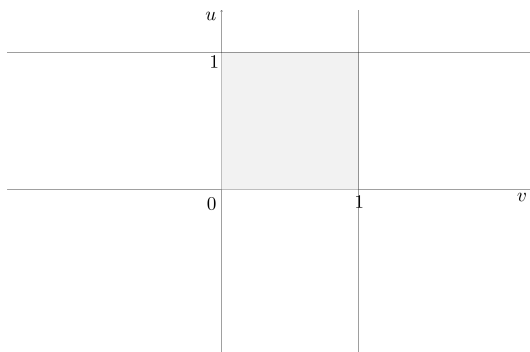


図 3: 積分領域 E

- (2) $I = \iint_D (x - y) \log(x + y + 1) dx dy$ を求めよ.

線形変換

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \varphi(x, y) = \begin{bmatrix} x + y \\ x - y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

は,

$$\det \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} = 1(-1) - 1^2 = -2 \neq 0$$

より線形同型であって, 逆変換は

$$\det \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{-2} \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$

です. よって, その Jacobi 行列式の絶対値は

$$|\det(\varphi^{-1})'(u, v)| = \left| \left(\frac{1}{2} \right)^2 \det \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \right| = \frac{1}{2}$$

であり,

$$(x, y) \in D \iff (u, v) \in E = \{(u, v) \in \mathbb{R}^2 | 0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1\}$$

だから,

$$\begin{aligned} & \iint_D (x - y) \log(x + y + 1) dx dy \\ &= \iint_E v \log(u + 1) \frac{1}{2} du dv \\ &= \frac{1}{2} \int_0^1 v dv \int_0^1 \log(u + 1) du \\ &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} v^2 \right]_0^1 \left([u \log(u + 1)]_0^1 - \int_0^1 \frac{1}{u + 1} du \right) \\ &= \frac{1}{2} \frac{1}{2} \left(\log 2 - [u - \log u + 1]_0^1 \right) \\ &= \frac{1}{4} (\log 2 - (1 - \log 2)) \\ &= \frac{1}{4} (2 \log 2 - 1) \end{aligned}$$

4 次の各問いに答えよ.

- (1) $D = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 | x^2 + y^2 \leq x\}$ を図示せよ. なお (2) で変数変換を用いる場合は新たな積分領域も描け.

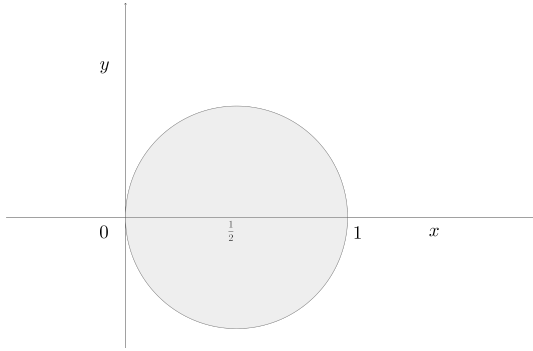


図 4: 積分領域 D

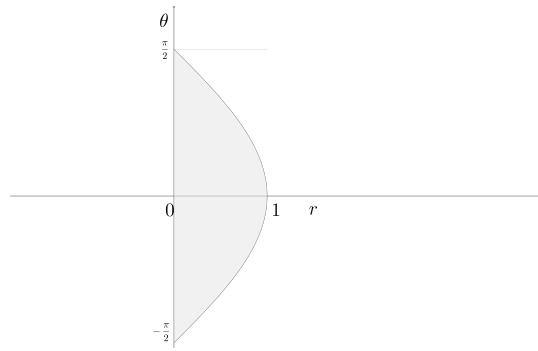


図 5: 積分領域 E

- (2) $I = \iint_D \sqrt{1-x^2-y^2} dx dy$ を求めよ.

極座標変換

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}, \quad r \geq 0, \quad -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

よって $r\theta$ 平面の領域 E が xy 平面上の領域 D に 1 対 1 にうつります.

$$\begin{aligned} & \iint_D \sqrt{1-x^2-y^2} dx dy \\ &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\cos \theta} \sqrt{1-r^2 \cos^2 \theta - r^2 \sin^2 \theta} r dr d\theta \\ &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\cos \theta} r \sqrt{1-r^2} dr d\theta \end{aligned}$$

ここで,

$$t = \sqrt{1-r^2} \quad dt = -\frac{r}{2t} dr \quad \begin{array}{c|c} r & 0 \rightarrow \cos \theta \\ t & 1 \rightarrow \sin \theta \end{array}$$

$$\begin{aligned} &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_1^{\sin \theta} r \cdot t \frac{-2t}{r} dt d\theta \\ &= -2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left[\frac{1}{3} t^3 \right]_1^{\sin \theta} d\theta \\ &= -\frac{2}{3} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} (\sin^3 \theta - 1) d\theta \\ &= -\frac{2}{3} 2 \int_0^{\pi/2} (\sin^3 \theta - 1) d\theta \\ &= -\frac{2}{3} \left(\frac{2}{3} - \frac{\pi}{2} \right) \\ &= \frac{\pi}{3} - \frac{4}{9} \end{aligned}$$