

目次

第 1 章	1
P.7 $D_x^+ f(a) = f'(a+0)$ '25 3.22	1
P.8 (1.2) $f(x) = f(a) + f'(a)(x-a) + o(x-a)$ '25 3.21	2
P.10 問 1.3 $(0,0)$ で f は連続	2
P.10 問 1.3 f_x は連続	3
P.12 数学の定理 1.2	5
P.12 数学の定理 1.2	6
P.12 補足	9
P.12 補足	11
P.12 補足	12
P.12 問題 1.4	14
第 2 章	16

第 1 章

P.7 $D_x^+ f(a) = f'(a+0)$ '25 3.22

$f(x)$ が $[a, a+\epsilon']$ で連続, $(a, a+\epsilon')$ で微分可能とする

$f'(a+0) = \lim_{\epsilon \rightarrow +0} f'(a+\epsilon)$ が存在するならば

$D_x^+ f(a)$ が存在し $D_x^+ f(a) = f'(a+0)$ である

(証明)

$[a, a+\epsilon']$ で連続, $(a, a+\epsilon')$ で微分可能なので

$\frac{f(a+\epsilon')-f(a)}{\epsilon'} = f'(a+\epsilon)$, $0 < \epsilon < \epsilon'$ なる ϵ が存在する (\because 平均値の定理)

ϵ' に対する ϵ を1つ選んで $\epsilon(\epsilon')$ とする

$f'(a+0) = \lim_{\epsilon \rightarrow +0} f'(a+\epsilon)$ が存在するので

任意の $\delta > 0$ に対してある ϵ_1 が存在して

$0 < \epsilon < \epsilon_1$ ならば $|f'(a+\epsilon) - f'(a+0)| < \delta$ である

$0 < \epsilon' < \epsilon_1$ ならば $0 < \epsilon(\epsilon') < \epsilon'$ なので $0 < \epsilon(\epsilon') < \epsilon_1$

よって $|f'(a+\epsilon(\epsilon')) - f'(a+0)| < \delta$ である

$\frac{f(a+\epsilon')-f(a)}{\epsilon'} = f'(a+\epsilon(\epsilon'))$ なので

$0 < \epsilon' < \epsilon_1$ ならば $\left| \frac{f(a+\epsilon')-f(a)}{\epsilon'} - f'(a+0) \right| < \delta$ である

$\therefore \lim_{\epsilon' \rightarrow +0} \frac{f(a+\epsilon')-f(a)}{\epsilon'} = f'(a+0)$ である (\because 極限の定義)

$\lim_{\epsilon' \rightarrow +0} \frac{f(a+\epsilon')-f(a)}{\epsilon'} = D_x^+(a)$ なので

$D_x^+(a) = f'(a+0)$ である

P.8 (1.2) $f(x) = f(a) + f'(a)(x - a) + o(x - a)$ '25 3.21

$f(x)$ が $x = a$ で微分可能 \Leftrightarrow

$x \rightarrow a$ で $f(x) = f(a) + f'(a)(x - a) + o(x - a)$ なる $f'(a)$ が存在する

(証明)

(\leftarrow)

$o(x - a) = f(x) - f(a) - f'(a)(x - a)$ ($\because f = g + o(\dots) \Leftrightarrow o(\dots) = f - g$ と定義する)

$$\therefore \lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - f(a) - f'(a)(x - a)}{x - a} = 0 \quad (\because \text{付録A } o(\dots) \text{ の定義})$$

$$\therefore \lim_{x \rightarrow a} \left(\frac{f(x) - f(a)}{x - a} - f'(a) \right) = 0$$

よって任意の $\epsilon > 0$ に対して $|x - a| < \delta$ ならば

$$\left| \frac{f(x) - f(a)}{x - a} - f'(a) \right| < \epsilon$$

$$\text{よって } \lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - f(a)}{x - a} = f'(a) \quad (\because \text{極限の定義})$$

よって $f(x)$ は $x = a$ で微分可能(\because 微分の定義)

(\rightarrow)

$x = a$ で微分可能なので $\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - f(a)}{x - a} = f'(a)$ が存在する (\because 微分の定義)

$$\therefore \lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - f(a)}{x - a} = \lim_{x \rightarrow a} f'(a) \quad (\because \lim c = c \text{ 定数の極限})$$

$$\therefore \lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - f(a)}{x - a} - \lim_{x \rightarrow a} f'(a) = 0 \quad (\because \text{実数の四則の公理})$$

$$\therefore \lim_{x \rightarrow a} \left(\frac{f(x) - f(a)}{x - a} - f'(a) \right) = 0 \quad (\because \lim f, \lim g \text{ が存在するなら } \lim(f + g) = \lim f + \lim g)$$

$$\therefore \lim_{x \rightarrow a} \left(\frac{f(x) - f(a) - f'(a)(x - a)}{x - a} \right) = 0 \quad (\because \text{実数の四則の公理})$$

$$\therefore o(x - a) = f(x) - f(a) - f'(a)(x - a) \quad (\because \text{付録A } o \text{ の定義})$$

$$\therefore f(x) = f(a) + f'(a)(x - a) + o(x - a) \quad (\because f - g = o(h) \Leftrightarrow f = g + o(h) \text{ と定義する})$$

P.10 問 1.3 $(0, 0)$ で f は連続

$$f(x, y) = \begin{cases} xy \frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2} & (x, y) \neq (0, 0) \\ 0 & (x, y) = (0, 0) \end{cases}$$

$(x, y) = (0, 0)$ で f は連続

(証明)

$$\lim_{(x, y) \rightarrow (0, 0)} f(x, y) = \lim_{(x, y) \rightarrow (0, 0)} xy \frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2}$$

である

また $(x, y) \neq (0, 0)$ で $\frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2}$ は有界 (*1)

よって $\frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2} < m$ なる m が存在する

また $\lim_{(x, y) \rightarrow (0, 0)} xy = 0$ ($\because \lim f = F, \lim g = G$ ならば $\lim fg = FG$)

よって $\lim_{(x, y) \rightarrow (0, 0)} xy \frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2} = 0 = f(0, 0)$ (*2)

よって $f(x, y)$ は $(0, 0)$ で連続

(*1) $\frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2}$ が有界でないと仮定する

任意の $m > 0$ に対して $\left| \frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2} \right| > m$ なる (x, y) が存在する

$\therefore \frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2} < -m$ or $\frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2} > m$

$\frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2} > m$ とすると $0 > (m - 1)x^2 + (m + 1)y^2$

$m = 1$ とすると $0 > 2y^2$ となり矛盾

$\frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2} < -m$ とすると $x^2(1 - m) - y^2(1 + m) < 0$

$m = 1$ とすると $0 < 0$ となり矛盾

よって $\frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2}$ は有界

(*2) $f(x, y)$ が有界, $\lim g = 0$ ならば $\lim fg = 0$

(証明)

$|f| < m$ なる m が存在する

任意の $\epsilon > 0$ に対して、ある $\delta > 0$ があって

$|(x, y)| < \delta$ ならば $|g| < \epsilon$

$\therefore |f||g| < |f|\epsilon$

$\epsilon|f| < \epsilon m$ なので

$|f||g| < \epsilon m$

$\therefore |fg| < \epsilon m$

任意の $\epsilon' > 0$ に対して $\epsilon' = \epsilon m$ とすると

$|(x, y)| < \delta$ ならば $|fg| < \epsilon'$

$\therefore \lim fg = 0$

P.10 問 1.3 f_x は連続

$$f(x, y) = \begin{cases} xy \frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2} & (x, y) \neq (0, 0) \\ 0 & (x, y) = (0, 0) \end{cases}$$

$\frac{\partial f}{\partial x}$ は連続

(証明)

$(x, y) \neq (0, 0)$ とする

$$\begin{aligned}\frac{\partial f}{\partial x} &= y \frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2} + xy \frac{2x(x^2 + y^2) - (x^2 - y^2)2x}{(x^2 + y^2)^2} \quad (*1) \\ &= \frac{x^4 y - 4x^2 y^3 - y^5}{(x^2 + y^2)^2}\end{aligned}$$

(*)1 積の微分公式、商の微分公式

$(a, b) \neq (0, 0)$ とすると

$$\begin{aligned}\lim_{(x, y) \rightarrow (a, b)} \frac{\partial f}{\partial x} &= \frac{a^4 b - 4a^2 b^3 - b^5}{(a^2 + b^2)^2} \quad (*2) \\ &= \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{(x, y) = (a, b)}\end{aligned}$$

(*)2 $\lim f = F, \lim g = G$ ならば

$$\lim(f + g) = F + G$$

$$\lim(fg) = FG$$

$$G \neq 0 \text{ ならば } \lim \frac{f}{g} = \frac{F}{G}$$

よって $(x, y) \neq (0, 0)$ で $\frac{\partial f}{\partial x}$ は連続

$(x, y) \neq (0, 0)$ において

$$\frac{\partial f}{\partial x} = y \frac{x^4 - 4x^2 y^2 - y^4}{x^4 + 2x^2 y^2 + y^4}$$

$$\frac{x^4 - 4x^2 y^2 - y^4}{x^4 + 2x^2 y^2 + y^4} \text{ は有界 } (*3) \text{ かつ } \lim_{(x, y) \rightarrow (0, 0)} y = 0$$

(*)3 $\frac{x^4 - 4x^2 y^2 - y^4}{x^4 + 2x^2 y^2 + y^4}$ は有界でないと仮定する

任意の $m > 0$ に対して

$$\left| \frac{x^4 - 4x^2 y^2 - y^4}{x^4 + 2x^2 y^2 + y^4} \right| > m \text{ なる } (x, y) \text{ が存在する}$$

$$\frac{x^4 - 4x^2 y^2 - y^4}{x^4 + 2x^2 y^2 + y^4} < -m \text{ または } \frac{x^4 - 4x^2 y^2 - y^4}{x^4 + 2x^2 y^2 + y^4} > m \text{ である}$$

$$\frac{x^4 - 4x^2 y^2 - y^4}{x^4 + 2x^2 y^2 + y^4} < -m \text{ とすると}$$

$$x^4 - 4x^2 y^2 - y^4 < -m(x^4 + 2x^2 y^2 + y^4)$$

$$\therefore (1 + m)x^4 + (4 + 2m)x^2 y^2 + (m - 1)y^4 < 0$$

$$m = 1 \text{ とすると } 2x^4 + 6x^2 y^2 < 0 \text{ となり矛盾する}$$

$$\frac{x^4 - 4x^2 y^2 - y^4}{x^4 + 2x^2 y^2 + y^4} > m \text{ とすると}$$

$$x^4 - 4x^2 y^2 - y^4 > m(x^4 + 2x^2 y^2 + y^4)$$

$$\therefore 0 > (m - 1)x^4 + (2m - 4)x^2 y^2 + (m - 1)y^4$$

$$m = 2 \text{ とすると } 0 > x^4 + y^4 \text{ となり矛盾する}$$

$$\text{よって } \frac{x^4 - 4x^2 y^2 - y^4}{x^4 + 2x^2 y^2 + y^4} \text{ は有界}$$

よって

$$\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{\partial f}{\partial x} = \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} y \frac{x^4 - 4x^2y^2 - y^4}{x^4 + 2x^2y^2 + y^4} = 0 \text{ (*4)}$$

(*4) $f(x, y)$ が有界、 $\lim g(x, y) = 0$ ならば

ある $m > 0$ が存在して $|f(x, y)| < m$

任意の $\epsilon > 0$ に対して $\delta > 0$ が存在して

$|(x, y)| < \delta$ ならば $|g(x, y)| < \epsilon$

$\therefore |f||g| < |f|\epsilon, |f|\epsilon < m\epsilon$

$\therefore |fg| = |f||g| < m\epsilon$

任意の $\epsilon' > 0$ に対して $\epsilon' = m\epsilon$ とすると

$|(x, y)| < \delta$ ならば $|fg| < \epsilon'$

$\therefore \lim fg = 0$

また $f(x, y)$ は $(0, 0)$ で連続 (別紙) よって 本文(1.5)(1.6) より $(0, 0)$ で $\frac{\partial f}{\partial x}$ は存在して

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{(x,y)=(0,0)} = \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{\partial f}{\partial x} = 0$$

よって $\frac{\partial f}{\partial x}$ は $(0, 0)$ で連続

P.12 数学の定理 1.2

ある開領域で $f(x_1, \dots, x_m)$ が C^∞ 級ならば

その領域で n 階までの偏導関数は微分の順序によらない

(証明)

f の 2 階以上 n 階以下の偏導関数を考える

$$f_{x_{p1} \dots x_{pi} x_{pj} \dots x_{pk}}$$

f は C^∞ 級なので

$f_{x_{p1} \dots x_{pi} x_{pj}}$ は存在し連続である

また $f_{x_{p1} \dots x_{pj} x_{pi}}$ も存在し連続である

よって $f_{x_{p1} \dots x_{pi} x_{pj}} = f_{x_{p1} \dots x_{pj} x_{pi}}$ (\because 2変数の場合 f_{xy}, f_{yx} が連続ならば $f_{xy} = f_{yx}$ (\because 別紙))

よって $f_{x_{p1} \dots x_{pi} x_{pj} \dots x_{pk}} = f_{x_{p1} \dots x_{pj} x_{pi} \dots x_{pk}} \dots (1)$

$p_1 \dots p_k$ を昇順に並べたリストを $q_1 \dots q_k$ とする

(1) より x_{q1} による偏微分を左隣りの変数の偏微分との入れ換えをくりかえして

$f_{x_{p1} \dots x_{pk}} = f_{x_{q1} \dots x_{pk}}$ とする

q_1 と同様に q_2 について

$f_{x_{p1} \dots x_{pk}} = f_{x_{q1} x_{q2} \dots x_{pk}}$ とする

これを繰り返して

$$f_{x_{p_1} \cdots x_{p_k}} = f_{x_{q_1} \cdots x_{q_k}} \text{ となる}$$

$r_1 \cdots r_2$ は $p_1 \cdots p_2$ を任意に並べ替えたリストとする。上と同様に

$$f_{x_{r_1} \cdots x_{r_k}} = f_{x_{q_1} \cdots x_{q_k}} \text{ となる}$$

$$\text{よって } f_{x_{r_1} \cdots x_{r_k}} = f_{x_{p_1} \cdots x_{p_k}} \text{ となる}$$

よって n 階までの偏導関数は微分の順序によらない

P.12 数学の定理 1.2

(2 変数の場合)

ある開領域で f_{xy}, f_{yx} が連続ならば $f_{xy} = f_{yx}$ である

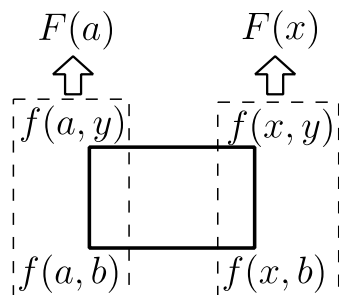
(証明)

領域内の任意の点 $(a, b), (x, y)$ とする

$$\Delta(x, y) = (f(x, y) - f(x, b)) - (f(a, y) - f(a, b)) \text{ とする}$$

$$F(x) = f(x, y) - f(x, b) \text{ とすると}$$

$$\Delta(x, y) = F(x) - F(a)$$



領域内で f は連続なので x の区間 $[a, x]$ で $f(x, y), f(x, b)$ は連続

よって $F(x)$ は x の区間 $[a, x]$ で連続 (*1)

領域内で f は x で偏微分可能なので x の区間 (a, x) で $f(x, y), f(x, b)$ は x で偏微分可能

よって $F(x)$ は x の区間 (a, x) で x で微分可能 (*2)

よって平均値の定理より

$$\begin{aligned} \Delta(x, y) &= F(x) - F(a) \\ &= F'(a + (x - a)\theta_1)(x - a), \quad 0 < \theta_1 < 1 \\ &= (f_x(a + (x - a)\theta_1, y) - f_x(a + (x - a)\theta_1, b))(x - a) \quad (*3) \end{aligned}$$

(*1) f, g が連続ならば $f + g$ も連続

(*2) f, g が微分可能ならば $f + g$ も微分可能

(*3) f_{xy}, g_{xy} を考えているので x, y は独立

$$x, y \text{ が独立なので } f_x = \frac{f'}{x \text{ で微分}}, g_x = \frac{g'}{x \text{ で微分}}$$

$$\text{よって } F' = f' + g' = f_x + g_x$$

領域内で f_x は連続かつ y で偏微分可能 ($\because f_{xy}$ が存在するので)

よって $f_x(a + (x - a)\theta_1, y)$ は y の区間 $[b, y]$ で連続かつ区間 (b, y) で y で微分可能

また x, y は独立なので $f_{xy} = \underset{y \text{ で微分}}{f'_x}$

よって平均値の定理より

$$\begin{aligned} f_x(a + (x - a)\theta_1, y) - f_x(a + (x - a)\theta_1, b) \\ = f_{xy}(a + (x - a)\theta_1, b + (y - b)\theta_2)(x - b), \quad 0 < \theta_2 < 1 \end{aligned}$$

よって

$$\Delta(x, y) = f_{xy}(a + (x - a)\theta_1, b + (y - b)\theta_2)(x - a)(x - b)$$

$$x' = a + (x - a)\theta_1$$

$$y' = b + (y - b)\theta_2$$

とすると

$$\frac{\Delta(x, y)}{(x - a)(x - b)} = f_{xy}(x', y')$$

f_{xy} は連続なので

$$\lim_{(x, y) \rightarrow (a, b)} f_{xy}(x, y) = f_{xy}(a, b)$$

よって任意の δ に対して

$$|(x, y) - (a, b)| < \epsilon \text{ ならば } |f_{xy}(x, y) - f_{xy}(a, b)| < \delta$$

また

$$\begin{aligned} |(x', y') - (a, b)| &= \sqrt{(a + (x - a)\theta_1 - a)^2 + (b + (y - b)\theta_2 - b)^2} \\ &= \sqrt{(x - a)^2\theta_1^2 + (y - b)^2\theta_2^2} \\ &< |(x, y) - (a, b)| \quad (\because 0 < \theta_1 < 1, 0 < \theta_2 < 1) \end{aligned}$$

よって $|(x', y') - (a, b)| < \epsilon$ なので $|f_{xy}(x', y') - f_{xy}(a, b)| < \delta$

$$\text{よって } \lim_{(x, y) \rightarrow (a, b)} f_{xy}(x', y') = f_{xy}(a, b)$$

$$\text{よって } \lim_{(x, y) \rightarrow (a, b)} \frac{\Delta(x, y)}{(x - a)(y - b)} = f_{xy}(a, b) \cdots (1)$$

$\Delta(x, y)$ の右辺の順番をかえて

$$\Delta(x, y) = (f(x, y) - f(a, y)) - (f(x, b) - f(a, b)) \text{ とする}$$

$$G(y) = f(x, y) - f(a, y) \text{ とすると}$$

$$\Delta(x, y) = G(y) - G(b)$$

$$\begin{array}{ccc} \boxed{\begin{array}{cc} f(a, y) & f(x, y) \end{array}} & \Rightarrow & G(y) \\ \boxed{\begin{array}{cc} f(a, b) & f(x, b) \end{array}} & \Rightarrow & G(b) \end{array}$$

f は領域で連続なので区間 $[b, y]$ で $f(x, y), f(a, y)$ は連続

よって $G(y)$ は区間 $[b, y]$ で連続 ($\because f, g$ が連続ならば $f + g$ は連続)

f は領域で偏微分可能なので区間 (b, y) で $f(x, y), f(a, y)$ は y で微分可能

$$(\because x, y \text{ が独立なので } f_y = \frac{f'}{y \text{ で微分}})$$

よって $G(y)$ は区間 (b, y) で y で微分可能 ($\because (f + g)' = f' + g'$)

よって平均値の定理より

$$\begin{aligned} \Delta(x, y) &= G'(b + (y - b)\theta_3)(y - b), \quad 0 < \theta_3 < 1 \\ &= (f_y(x, b + (y - b)\theta_3) - f_y(a, b + (y - b)\theta_3))(y - b) \quad (\because f_y = \frac{f'}{y \text{ で微分}}) \end{aligned}$$

領域内で f_y は連続かつ x で偏微分可能なので

$$f_y(x, b + (y - b)\theta_3) \text{ は区間 } [a, x] \text{ で連続かつ区間 } (a, x) \text{ で } x \text{ で微分可能 } (\because x, y \text{ が独立ならば } f_{yx} = \frac{f'}{x \text{ で微分}})$$

よって平均値の定理より

$$\begin{aligned} \Delta(x, y) &= f_{yx}(a + (x - a)\theta_4, b + (y - b)\theta_3)(y - b)(x - a), \quad 0 < \theta_4 < 1 \\ x' &= a + (x - a)\theta_4 \\ y' &= b + (y - b)\theta_3 \end{aligned}$$

とすると

$$\Delta(x, y) = f_{yx}(x', y')(y - b)(x - a)$$

$$\text{よって } \frac{\Delta(x, y)}{(y - b)(x - a)} = f_{yx}(x', y')$$

f_{yx} は連続なので

$$\lim_{(x, y) \rightarrow (a, b)} f_{yx}(x, y) = f_{yx}(a, b)$$

よって任意の δ に対して

$$|(x, y) - (a, b)| < \epsilon \text{ ならば } |f_{yx}(x, y) - f_{yx}(a, b)| < \delta$$

また

$$\begin{aligned} |(x', y') - (a, b)| &= \sqrt{(a + (x - a)\theta_4 - a)^2 + (b + (y - b)\theta_3 - b)^2} \\ &= \sqrt{(x - a)^2\theta_4^2 + (y - b)^2\theta_3^2} \\ &< |(x, y) - (a, b)| \quad (\because 0 < \theta_3 < 1, 0 < \theta_4 < 1) \end{aligned}$$

よって $|(x', y') - (a, b)| < \epsilon$ なので

$$|f_{yx}(x', y') - f_{yx}(a, b)| < \delta$$

$$\text{よって } \lim_{(x', y') \rightarrow (a, b)} f_{yx}(x', y') = f_{yx}(a, b)$$

$$\text{よって } \lim \frac{\Delta(x, y)}{(y - b)(x - a)} = f_{yx}(a, b) \cdots (2)$$

よって (1), (2) より

$$f_{xy}(a, b) = f_{yx}(a, b)$$

a, b は任意なので

$$f_{xy}(x, y) = f_{yx}(x, y)$$

P.12 補足

$$f(x) = \begin{cases} e^{-\frac{1}{x^2}} & x \neq 0 \\ 0 & x = 0 \end{cases}$$

$x \neq 0$ で $f(x)$ は連続

(証明)

x は連続 (*1)

よって $x \neq 0$ ならば $\frac{1}{x}$ は連続 (*2)

よって $x \neq 0$ ならば $\frac{1}{x^2}$ は連続 (*3)

よって $x \neq 0$ ならば $-\frac{1}{x^2}$ は連続 (*3)

よって $x \neq 0$ ならば $e^{-\frac{1}{x^2}}$ は連続 (*4)

$0 < |x - a| < |a|$ ならば $x \neq 0$

($\because x = 0$ とすると $|a| < |a|$ となり矛盾)

$e^{-\frac{1}{x^2}}$ は $x \neq 0$ で連続なので

任意の ϵ に対して

$$0 < |x - a| < \delta \text{ ならば } \left| e^{-\frac{1}{x^2}} - e^{-\frac{1}{a^2}} \right| < \epsilon$$

よって $0 < |x - a| < \min(|a|, \delta)$ ならば

$$x \neq 0 \text{ なので } f(x) = e^{-\frac{1}{x^2}}$$

$$\text{また } \left| e^{-\frac{1}{x^2}} - e^{-\frac{1}{a^2}} \right| < \epsilon$$

$$\therefore |f(x) - f(a)| < \epsilon$$

$$\text{よって } \lim_{x \rightarrow a} f(x) = f(a)$$

よって $x \neq 0$ ならば $f(x)$ は連続

$$(*1) 0 < |x - a| < \epsilon \text{ ならば}$$

$$|x - a| < \epsilon$$

$$\therefore \lim_{x \rightarrow a} x = a$$

$$(*2) \lim_{x \rightarrow a} f(x) = F, F \neq 0 \text{ ならば } \lim_{x \rightarrow a} \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$$

(証明)

任意の ϵ に対し $0 < |x - a| < \delta$ ならば $|f(x) - F| < \epsilon \cdots (1)$

$$\epsilon = \frac{|F|}{2} \text{ とすると}$$

$$0 < |x - a| < \delta' \text{ ならば } |f(x) - F| < \frac{|F|}{2}$$

$$\therefore |F| - |f(x)| < \frac{|F|}{2} \quad (\because \text{三角不等式 } |F| - |f(x)| \leq |F - f(x)|)$$

$$\therefore |f(x)| > \frac{|F|}{2}$$

$$\therefore \frac{1}{|f(x)|} < \frac{2}{|F|} \dots (2)$$

$$(\because F \neq 0 \text{ なので } |F| > 0, 0 < a < b \text{ ならば } \frac{1}{a} > \frac{1}{b})$$

$$\text{任意の } \epsilon' \text{ に対して } \epsilon = \frac{1}{2}\epsilon' F^2 \text{ とする}$$

$$0 < |x - a| < \min(\delta, \delta') \text{ ならば}$$

$$\left| \frac{1}{f(x)} - \frac{1}{F} \right| = \frac{|f(x) - F|}{|f(x)||F|} < \frac{2\epsilon}{F^2} = \epsilon' \quad (\because (1), (2))$$

$$\text{よって } \lim_{x \rightarrow a} \frac{1}{f(x)} = \frac{1}{F}$$

$$(*3) \lim_{x \rightarrow a} f(x) = F, \lim_{x \rightarrow a} g(x) = G \text{ ならば } \lim_{x \rightarrow a} fg = FG$$

(証明)

$$\text{任意の } \epsilon \text{ に対して } 0 < |x - a| < \delta \text{ ならば } |f - F| < \epsilon, |g - G| < \epsilon \dots (1)$$

$$\epsilon = |F| \text{ とすると}$$

$$0 < |x - a| < \delta' \text{ ならば } |f - F| < |F|$$

$$\therefore |f| - |F| < |F| \quad (\because \text{三角不等式 } |a| - |b| \leq |a - b|)$$

$$\therefore |f| < 2|F| \dots (2)$$

$$\text{任意の } \epsilon' \text{ に対して } \epsilon = \frac{\epsilon'}{|G| + 2|F|} \text{ とする}$$

$$0 < |x - a| < \min(\delta, \delta') \text{ ならば}$$

$$\begin{aligned} |fg - FG| &= |fg - fG + fG - FG| \\ &= |f(g - G) + G(f - F)| \\ &\leq |f(g - G)| + |G(f - F)| \quad (\because \text{三角不等式 } |a + b| < |a| + |b|) \\ &= |f||g - G| + |G||f - F| \\ &< 2|F|\epsilon + \epsilon|G| \quad (\because (1)(2)) \\ &= \epsilon(2|F| + |G|) = \epsilon' \end{aligned}$$

$$\text{よって } \lim_{x \rightarrow a} fg = FG$$

$$(*4) a \text{ で } f(x) \text{ は連続, } f(a) \text{ で } g(x) \text{ は連続ならば } a \text{ で } g(f(x)) \text{ は連続}$$

(証明)

$$\lim_{x \rightarrow f(a)} g(x) = g(f(a)) \text{ なので}$$

$$\text{任意の } \epsilon \text{ に対して } 0 < |x - f(a)| < \delta \text{ ならば } |g(x) - g(f(a))| < \epsilon$$

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) = f(a) \text{ なので}$$

$$0 < |x - a| < \delta' \text{ ならば } |f(x) - f(a)| < \delta$$

$$\text{よって } 0 < |x - a| < \delta' \text{ ならば } |g(f(x)) - g(f(a))| < \epsilon$$

$$\text{よって } \lim_{x \rightarrow a} g(f(x)) = g(f(a))$$

$$\text{よって } a \text{ で } g(f(x)) \text{ は連続}$$

P.12 補足

$$f(x) = \begin{cases} e^{-\frac{1}{x^2}} & x \neq 0 \\ 0 & x = 0 \end{cases}$$

$x = 0$ で $f(x)$ は連続

(証明)

$$\lim_{x \rightarrow 0} e^{\frac{1}{x^2}} = \infty \quad (*1)$$

$$\therefore \lim_{x \rightarrow 0} e^{-\frac{1}{x^2}} = 0 \quad (*4)$$

$$\begin{aligned} \therefore \lim_{x \rightarrow 0} f(x) &= \lim_{x \rightarrow 0} e^{-\frac{1}{x^2}} \quad (\because x \neq 0) \\ &= 0 \\ &= f(0) \end{aligned}$$

よって $x = 0$ で $f(x)$ は連続

$$\begin{aligned} (*1) e^{\frac{1}{x^2}} &= 1 + \left(\frac{1}{x^2}\right) + \frac{\left(\frac{1}{x^2}\right)^2}{2} + \dots \quad (\because e^x \text{の定義}) \\ &> 1 + \frac{1}{x^2} \end{aligned}$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} \left(1 + \frac{1}{x^2}\right) = \infty \quad (*2)$$

$$\therefore \lim_{x \rightarrow 0} e^{\frac{1}{x^2}} = \infty \quad (*3)$$

$$(*2) \text{ 任意の } \epsilon > 1 \text{ に対して } 0 < |x| < \frac{1}{\sqrt{\epsilon-1}} \text{ ならば}$$

$$x^2 < \frac{1}{\epsilon-1} \quad (\because 0 < a < b \text{ ならば } a^2 < b^2)$$

$$\frac{1}{x^2} > \epsilon-1 \quad (\because 0 < a < b \text{ ならば } \frac{1}{a} > \frac{1}{b})$$

$$\therefore 1 + \frac{1}{x^2} > \epsilon$$

$$\therefore \lim_{x \rightarrow 0} 1 + \frac{1}{x^2} = \infty$$

$$(*3) g(x) > f(x), \lim_{x \rightarrow a} f(x) = \infty \text{ ならば } \lim_{x \rightarrow a} g(x) = \infty$$

(証明)

$$\text{任意の } \epsilon \text{ に対して } 0 < |x-a| < \delta \text{ ならば } f(x) > \epsilon$$

$$\therefore g(x) > \epsilon$$

$$\therefore \lim_{x \rightarrow a} g(x) = \infty$$

$$(*4) \lim_{x \rightarrow a} f(x) = \infty \text{ ならば } \lim_{x \rightarrow a} \frac{1}{f(x)} = 0$$

(証明)

$$\text{任意の } \epsilon \text{ に対して } 0 < |x-a| < \delta \text{ ならば } f(x) > \epsilon$$

$$\therefore \frac{1}{f(x)} < \frac{1}{\epsilon} \quad (\because 0 < a < b \text{ ならば } \frac{1}{a} > \frac{1}{b})$$

$$\text{任意の } \epsilon' \text{ に対して } \epsilon = \frac{1}{\epsilon'} \text{ とする}$$

P.12 補足

$$f(x) = \begin{cases} e^{-\frac{1}{x^2}} & x \neq 0 \\ 0 & x = 0 \end{cases}$$

$x \neq 0$ で C^∞ 級

(証明)

$x \neq 0$ とする

$$\begin{aligned} f^{(1)} &= \left(e^{-\frac{1}{x^2}} \right)' \\ &= \left(-\frac{1}{x^2} \right)' e^{-\frac{1}{x^2}} \quad (*1), (*2) \\ &= -\left(\frac{1}{x^2} \right)' e^{-\frac{1}{x^2}} \quad (\because \text{積の微分}) \\ &= -(-2)x^{-3} e^{-\frac{1}{x^2}} \quad (*3) \\ &= 2x^{-3} e^{-\frac{1}{x^2}} \quad \dots (1) \end{aligned}$$

である。

$n > 0$ で

$$f^{(n)} = \left(\sum_{\nu=1}^m k_\nu x^{-\nu} \right) e^{-\frac{1}{x^2}}$$

と仮定する

$$\begin{aligned} \left(\sum_{\nu=1}^m k_\nu x^{-\nu} \right)' &= \sum_{\nu=1}^m k_\nu (x^{-\nu})' \quad (\because \text{和, 積の微分}) \\ &= \sum_{\nu=1}^m (-\nu k_\nu) x^{-\nu-1} \quad (*3) \dots (2) \end{aligned}$$

なので

$$\begin{aligned} f^{(n+1)} &= \left(\sum_{\nu=1}^m k_\nu x^{-\nu} \right)' e^{-\frac{1}{x^2}} + \left(\sum_{\nu=1}^m k_\nu x^{-\nu} \right) \left(e^{-\frac{1}{x^2}} \right)' \quad (\because \text{積の微分}) \\ &= \sum_{\nu=1}^m (-\nu k_\nu) x^{-\nu-1} e^{-\frac{1}{x^2}} + \sum_{\nu=1}^m k_\nu x^{-\nu} 2x^{-3} e^{-\frac{1}{x^2}} \quad (\because (1), (2)) \\ &= \left(\sum_{\nu=1}^m -\nu k_\nu x^{-\nu-1} + \sum_{\nu=1}^m 2k_\nu x^{-\nu-3} \right) e^{-\frac{1}{x^2}} \\ &= \sum_{\mu=1}^{m+4} (p_\mu + q_\mu) x^{-\mu} e^{-\frac{1}{x^2}} \end{aligned}$$

ただし

$$p_\mu = \begin{cases} -(\mu-1)k_{\mu-1} & \mu = 2, \dots, m+1 \\ 0 & \text{other} \end{cases}$$

$$q_\mu = \begin{cases} 2k_{\mu-3} & \mu = 4, \dots, m+3 \\ 0 & \text{other} \end{cases}$$

よって、 $n > 0$ において

$$f^{(n)} = \left(\sum_{\nu=1}^n k_{\nu} x^{-\nu} \right) e^{-\frac{1}{x^2}}$$

である。 $x \neq 0$ で $f^{(n)}, n \in \mathbb{N}$ は存在するので f は C^{∞} 級である

(*)1 合成関数の微分

$g'(x), f'(g(x))$ が存在するなら

$$f(g(x))' = g'(x) f'(g(x))$$

(*)2 $(e^x)' = e^x$

(証明)

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} \quad (\because e^x \text{ の定義})$$

右辺の項別微分を考える

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{x^n}{n!} \right)' &= (1)' + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{x^n}{n!} \right)' \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} n \frac{x^{n-1}}{n!} \quad (*2.1) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^{n-1}}{(n-1)!} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} \quad (*2.2) \\ &= e^x \quad (\because e^x \text{ の定義}) \end{aligned}$$

ここで任意の x に対して

$-A \leq x \leq A, A > 0$ なる区間を考える

$$\left| \frac{x^{\nu}}{\nu!} \right| \leq \frac{A^{\nu}}{\nu!}, \nu = 0, 1, 2, \dots \text{ である}$$

$$\text{また } \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{A^{\nu}}{\nu!} = e^A \quad (\because e^A \text{ の定義})$$

なので $\sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{x^{\nu}}{\nu!}$ は区間 $[-A, A]$ で一様収束する

(\because 定理: ある区間で $|a_n(x)| \leq C_n$ なる定数 C_n があって

$$\sum C_n \text{ が収束するならば } \sum a_n \text{ は一様収束する})$$

よって $(e^x)' = e^x$

(\because 定理: 無限級数が収束し各項の導関数が連続で項別微分が一様収束するならば無限級数の導関数は項別微分に等しい)

$$(*2.1) (1)' = 0$$

$$n > 0 \text{ ならば } x^n = n x^{n-1} \quad (*3)$$

$$(kf(x))' = kf'(x) \quad (\because \text{積の微分})$$

$$\begin{aligned} (*2.2) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^{n-1}}{(n-1)!} &= 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \dots \\ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} &= 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \dots \\ \therefore \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^{n-1}}{(n-1)!} &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} \end{aligned}$$

(※3) $x \neq 0, n > 0$ ならば

$$(x^{-n})' = -nx^{-n-1}$$

(証明)

$$(x^n)' = -nx^{-n-1} \text{と仮定する}$$

$$(x^{n+1})' = (xx^n)' = (x)'x^n + x(x^n)' (\because \text{積の微分})$$

$$= x^n + xnx^{n-1} = (n+1)x^n$$

$$(x)' = 1 = 1 \cdot x^{1-1}$$

$$\text{よって } (x^n)' = nx^{n-1}, n = 1, 2, \dots$$

よって $x \neq 0, n = 1, 2, \dots$ ならば

$$\begin{aligned} (x^{-n})' &= \left(\frac{1}{x^n} \right)' = \frac{1'x^n - 1(x^n)'}{x^{2n}} (\because \text{商の微分}) \\ &= \frac{-nx^{n-1}}{x^{2n}} = -nx^{-n-1} \end{aligned}$$

P.12 問題 1.4

$$f(x, y) = x^2 e^y, \quad (x, y) \in \mathbb{R}^2$$

(i)

$$f_x = 2xe^y \quad (\ast 1)$$

$$f_y = x^2 e^y \quad (\ast 1)$$

$$f_{xx} = 2e^y$$

$$f_{yy} = x^2 e^y$$

$$f_{xy} = 2xe^y$$

$$f_{yx} = 2xe^y$$

$$f_x(0, 0) = 0, f_x(1, 1) = 2e$$

$$f_y(0, 0) = 0, f_y(1, 1) = e$$

$$f_{xx}(0, 0) = 2, f_{xx}(1, 1) = 2e$$

$$f_{yy}(0, 0) = 0, f_{yy}(1, 1) = e$$

$$f_{xy}(0, 0) = 0, f_{xy}(1, 1) = 2e$$

$$f_{yx}(0, 0) = 0, f_{yx}(1, 1) = 2e$$

(ii)

x^2 は x で連続よって (x, y) で連続 $(\ast 2)$

e^y は y で連続よって (x, y) で連続 $(\ast 2)$

よって $f(x, y) = x^2 e^y$ は (x, y) で連続 $(\ast 3)$

同様に

$$f_x = 2xe^y \text{ は連続}$$

$$f_y = x^2e^y \text{ は連続}$$

$$f_{xx} = 2e^y \text{ は連続}$$

$$f_{yy} = x^2e^y \text{ は連続}$$

$$f_{xy} = 2xe^y \text{ は連続}$$

$$f_{yx} = 2xe^y \text{ は連続}$$

よって f は C^2 級

(iii)

$$f_{xy} = 2xe^y, f_{yx} = 2xe^y \text{ なので } f_{xy} = f_{yx}$$

(*1) x と y が独立ならば $f_x = \frac{f'}{x \text{ で微分}}$

(*2) $f(x)$ が x で連続ならば $f(x)$ は (x, y) で連続である

(証明)

$$x \text{ で連続なので } f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} f(x + \Delta x)$$

よって任意の ϵ に対して

$$0 < |\Delta x| < \delta \text{ ならば}$$

$$|f(x + \Delta x) - f(x)| < \epsilon$$

$$|(\Delta x, \Delta y)| < \delta \text{ ならば}$$

$$|\Delta x| \leq |(\Delta x, \Delta y)| \text{ (}\therefore \text{ 三角不等式)}$$

$$\therefore |\Delta x| < \delta$$

$$\therefore \Delta x = 0 \text{ or } 0 < |\Delta x| < \delta$$

$$0 < |\Delta x| < \delta \text{ とすると}$$

$$|f(x + \Delta x) - f(x)| < \epsilon$$

$$\Delta x = 0 \text{ とすると}$$

$$|f(x + \Delta x) - f(x)| = 0 < \epsilon$$

$$\text{よって } |(\Delta x, \Delta y)| < \delta \text{ ならば } |f(x + \Delta x) - f(x)| < \epsilon$$

$$\text{よって } \lim_{(\Delta x, \Delta y) \rightarrow (0,0)} f(x + \Delta x, y + \Delta y) = f(x, y)$$

(*2) f, g が連続ならば fg は連続

(証明)

$$\lim_{(\Delta x, \Delta y) \rightarrow (0,0)} f(x + \Delta x, y + \Delta y) = f(x, y)$$

$$\lim_{(\Delta x, \Delta y) \rightarrow (0,0)} g(x + \Delta x, y + \Delta y) = g(x, y)$$

よって

$$\begin{aligned} & \lim_{(\Delta x, \Delta y) \rightarrow (0,0)} f(x + \Delta x, y + \Delta y)g(x + \Delta x, y + \Delta y) \\ &= \lim f(x + \Delta x, y + \Delta y) \lim g(x + \Delta x, y + \Delta y) \text{ (}\therefore \text{ 積の極限)} \\ &= f(x, y)g(x, y) \end{aligned}$$

よって fg は連続

第 2 章