

演習問題 *6.1 次の定理は平均値の定理と呼ばれる。平均値の定理から命題 6.1 を導け。

関数 f が $[a, b]$ で連続であり, (a, b) で微分可能であるとする。このときある実数 c で $a < c < b$ かつ

$$f'(c) = \frac{f(b) - f(a)}{b - a}$$

を満たすものが存在する。

最初に, $H(x)$ がある区間で恒等的に $H'(x) = 0$ ならば $H(x)$ は定数関数であることを示す。区間の中の実数 a を 1 つ固定する。今 $x > a$ となる区間中の任意の x を考える。 $[a, x]$ として平均値の定理を適用すると, ある c で $a < c < x$ かつ

$$H'(c) = \frac{H(x) - H(a)}{x - a}$$

を満たすものが存在する。 $H'(c) = 0$ なので $H(x) = H(a)$ が成立する。 $x < a$ となる区間中の任意の x を考える。 $[x, a]$ として平均値の定理を適用すると, ある c で $x < c < a$ かつ

$$H'(c) = \frac{H(a) - H(x)}{a - x}$$

を満たすものが存在する。 $H'(c) = 0$ なので $H(x) = H(a)$ が成立する。 $x = a$ のときは $H(x) = H(a)$ である。よって任意の x に対し $H(x) = H(a)$ が成立するので, $H(x)$ は定数関数である。

次に命題 6.1 を証明する。 $H(x) = G(x) - F(x)$ とおくと $H'(x) = G'(x) - F'(x)$ より $H'(x) = 0$ となる。よって $H(x)$ は定数関数である。これを $H(x) = C$ とおく。このとき $G(x) - F(x) = H(x) = C$ なので $G(x) = F(x) + C$ が成立する。

演習問題 6.2 命題 6.2 及び命題 6.3 を証明せよ。

命題 6.2 (1) はすでに示してあるので (2) を示す。 $F'(x) = f(x)$ とおくと $F(x) = \int f(x)dx$ である。 $(aF(x))' = aF'(x) = af(x)$ なので

$$\int af(x)dx = aF(x) = a \int f(x)dx$$

となる。

命題 6.3 は微分法で学んだ関数の導関数と積分の定義から出てくる。即ち

$$\int f(x)dx = F(x)$$

を示すためには

$$\frac{d}{dx}F(x) = f(x)$$

を示せばよい。

(1) は要綱に書いてある。(2) は演習問題 5.15 を参考にすると, $(\log|x|)' = \frac{1}{x}$ が成立することから従う。(3)–(8) はそれぞれ $(\sin x)' = \cos x$, $(-\cos x)' = \sin x$, $(e^x)' = e^x$, $\left(\frac{a^x}{\log a}\right)' = \frac{1}{\log a} \log a a^x = a^x$, $(\arcsin x)' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$, $(\arctan x)' = \frac{1}{1+x^2}$ から結論が得られる。

演習問題 6.3 次の関数の不定積分を求めよ。

- (1) $(2x+5)^6$ (2) e^{-2x} (3) $\sin \frac{x}{2}$ (4) $x(3x^2+1)^8$
 (5) $\frac{x}{(1+x^2)^3}$ (6) xe^{3x} (7) $x \sin x$ (8) $x^2 \cos x$
 (9) $x^3 \log x$ (10) $(\log x)^2$ (11) $\arctan x$ (12) $\arcsin x$

(1) 置換積分法を使う。 $t = 2x + 5$ と置くと $\frac{dt}{dx} = 2$ より $\frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} = \frac{1}{\frac{dt}{dx}}$ となる。よって

$$\begin{aligned} \int (2x+5)^6 dx &= \int t^6 \frac{dx}{dt} dt = \int t^6 \frac{1}{2} dt \\ &= \frac{1}{2 \cdot 7} t^7 = \frac{1}{14} (2x+5)^7 \end{aligned}$$

(2) $t = -2x$ とおくと $\frac{dt}{dx} = -2$ より $\frac{dx}{dt} = \frac{1}{-2} = -\frac{1}{2} = \frac{1}{\frac{dt}{dx}}$ となる。よって

$$\begin{aligned} \int e^{-2x} dx &= \int e^t \frac{dx}{dt} dt = -\frac{1}{2} \int e^t dt \\ &= -\frac{1}{2} e^t = -\frac{1}{2} e^{-2x} \end{aligned}$$

(3) $t = \frac{x}{2}$ とおくと, $x = 2t$ より $\frac{dx}{dt} = 2$ となる。よって

$$\int \sin \frac{x}{2} dx = \int \sin t \frac{dx}{dt} dt = -2 \cos t = -2 \cos \frac{x}{2}$$

となる。

(4) $t = 3x^2 + 1$ とおくと $\frac{dt}{dx} = 6x$ より $\frac{dx}{dt} = \frac{1}{6x} = \frac{1}{\frac{dt}{dx}}$ となる。よって

$$\begin{aligned} \int x(3x^2+1)^8 dx &= \int xt^8 \frac{1}{6x} dt = \frac{1}{6} \int t^8 dt \\ &= \frac{1}{6} \frac{1}{9} t^9 = \frac{1}{54} (3x^2+1)^9 \end{aligned}$$

(5) $t = 1 + x^2$ とおくと $\frac{dt}{dx} = 2x$ より $\frac{dx}{dt} = \frac{1}{2x} = \frac{1}{\frac{dt}{dx}}$ となる。よって

$$\begin{aligned} \int \frac{x}{(1+x^2)^3} dx &= \int \frac{x}{t^3} \frac{1}{2x} dt = \frac{1}{2} \int \frac{1}{t^3} dt \\ &= \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{2}\right) t^{-2} = -\frac{1}{4(1+x^2)^2} \end{aligned}$$

(6) ここから部分積分法の問題である。部分積分法は

$$\int f'gdx = fg - \int f'gdx$$

というものであった。 $g = x$, $f' = e^{3x}$ とおくと

$$f = \int f'dx = \int e^{3x}dx = \frac{1}{3}e^{3x}$$

なので

$$\begin{aligned}\int xe^{3x}dx &= fg - \int f'g'dx \\ &= \frac{x}{3}e^{3x} - \int \frac{1}{3}x^3x dx = \frac{x}{3}e^{3x} - \frac{1}{9}e^{3x}\end{aligned}$$

(7) $g = x$, $f' = \sin x$ とおくと $f = \int f'dx = \int \sin x dx = -\cos x$ なので

$$\begin{aligned}\int x \sin x dx &= fg - \int f'g'dx \\ &= -x \cos x + \int \cos x dx = -x \cos x + \sin x\end{aligned}$$

(8) $g = x^2$, $f' = \cos x$ とおくと $f = \int f'dx = \int \cos x dx = \sin x$ なので

$$\begin{aligned}\int x^2 \cos x dx &= fg - \int f'g'dx \\ &= x^2 \sin x - \int 2x \sin x dx \\ &= x^2 \sin x - 2 \int x \sin x dx\end{aligned}$$

となる。(11)の結果を用いると(そうでない場合はもう1回部分積分を実行すればよい),

$$\begin{aligned}\int x^2 \cos x dx &= x^2 \sin x - 2 \int x \sin x dx \\ &= x^2 \sin x - 2(-x \cos x + \sin x) \\ &= x^2 \sin x + 2x \cos x - 2 \sin x\end{aligned}$$

(9) $f' = x^3$, $g = \log x$ とおくと $f = \frac{1}{4}x^4$ なので

$$\begin{aligned}\int x^3 \log x dx &= fg - \int f'g'dx \\ &= \frac{1}{4}x^4 \log x - \int \frac{1}{4}x^4 \frac{1}{x} dx \\ &= \frac{1}{4}x^4 \log x - \frac{1}{4} \int x^3 dx \\ &= \frac{1}{4}x^4 \log x - \frac{1}{16}x^4\end{aligned}$$

(10) $f' = 1$, $g = (\log x)^2$ とおくと $f = x$ なので

$$\begin{aligned}\int (\log x)^2 dx &= fg - \int fg' dx \\ &= x(\log x)^2 - \int x \cdot 2 \log x \cdot \frac{1}{x} dx \\ &= x(\log x)^2 - 2 \int \log x dx \\ &= x(\log x)^2 - 2x \log x + 2x\end{aligned}$$

となる。計算には

$$\int \log x dx = x \log x - x$$

を用いた。

(11) $f' = 1$, $g = \arctan x$ とおくと $f = x$, $g' = \frac{1}{1+x^2}$ なので

$$\begin{aligned}\int \arctan x dx &= fg - \int fg' dx \\ &= x \arctan x - \int \frac{x}{1+x^2} dx\end{aligned}$$

となる。ここで $t = 1 + x^2$ とおくと

$$\begin{aligned}\int \frac{x}{1+x^2} dx &= \int \frac{x}{t} \frac{1}{2x} dt = \int \frac{1}{2} \frac{1}{t} dt \\ &= \frac{1}{2} \log |t| = \frac{1}{2} \log |1+x^2| = \frac{1}{2} \log(1+x^2)\end{aligned}$$

なので

$$\int \arctan x dx = x \arctan x - \frac{1}{2} \log(1+x^2)$$

となる。演習問題 5.16 も参考のこと。

(12) $f' = 1$, $g = \arcsin x$ とおくと $f = x$, $g' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$ なので

$$\begin{aligned}\int \arcsin x dx &= fg - \int fg' dx \\ &= x \arcsin x - \int \frac{x}{\sqrt{1-x^2}} dx\end{aligned}$$

となる。ここで $t = 1 - x^2$ とおくと $\frac{dt}{dx} = -2x$ なので

$$\begin{aligned}\int \frac{x}{\sqrt{1-x^2}} dx &= \int \frac{x}{\sqrt{t}} \frac{1}{-2x} dt = -\frac{1}{2} \int \frac{1}{\sqrt{t}} dt \\ &= -\sqrt{t} = -\sqrt{1-x^2}\end{aligned}$$

となる。よって

$$\int \arcsin x dx = x \arcsin x + \sqrt{1-x^2}$$