

3.3 諸計算

この節では積分計算の幾つかのテクニックを紹介する。特に最初に紹介する有理関数の積分は実際的にも・理論的にも重要である。

1 有理関数の不定積分

有理関数は 2 次式または 1 次式に因数分解できれば、積分を我々の知っている関数 (初等関数) で書く事ができる。積分方法を一般的に述べるのではなく、具体例を取り上げて積分方法が分かる様に実行する事とする。 $I = \int \frac{x^4 + x^3 - x - 4}{x^3 - 1} dx$ を例にとる。

(1) 仮分数を帯分数へ

最初に分子の次数が分母の次数より大きければ帯分数の形にして分子の次数を小さくする。

$$\frac{x^4 + x^3 - x - 4}{x^3 - 1} = x + 1 - \frac{3}{x^3 - 1}$$

なので、 $\frac{3}{x^3 - 1}$ の積分を求めればよい。

(2) 部分分数展開

部分分数展開をするために分母を因数分解する。

$$x^3 - 1 = (x - 1)(x^2 + x + 1)$$

となる。 $x^2 + x + 1$ は実数の範囲では 1 次式に因数分解できない。

$$\frac{3}{x^3 - 1} = \frac{a}{x - 1} + \frac{bx + c}{x^2 + x + 1}$$

を満たす定数 a, b, c を見つける。分母を払うと $3 = a(x^2 + x + 1) + (bx + c)(x - 1)$ が恒等的に成立しているの、 $a = 1, b = -1, c = -2$ である。よって

$$\int \frac{3}{x^3 - 1} dx = \int \frac{1}{x - 1} dx - \int \frac{x + 2}{x^2 + x + 1} dx$$

となる。

(3) 積分の実行

$$(x^2 + x + 1)' = 2x + 1 \text{ なので } \int \frac{2x + 1}{x^2 + x + 1} dx = \log(x^2 + x + 1)$$

$$\frac{x + 2}{x^2 + x + 1} = \frac{1}{2} \frac{2x + 1}{x^2 + x + 1} + \frac{3}{2} \frac{1}{x^2 + x + 1} \text{ となるので, } \int \frac{1}{x^2 + x + 1} dx \text{ が求まればよ}$$

$$\text{い。} x^2 + x + 1 = \left(x + \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{3}{4} \text{ となるので } u = x + \frac{1}{2} \text{ と変数変換すると } \int \frac{1}{x^2 + x + 1} dx =$$

$$\int \frac{1}{u^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2} du = \frac{2}{\sqrt{3}} \arctan \frac{2}{\sqrt{3}} u = \frac{2}{\sqrt{3}} \arctan \frac{2}{\sqrt{3}} \left(x + \frac{1}{2}\right) \text{ となる。以上を合わ}$$

このプリントも含め講義関連のプリントは <http://math.cs.kitami-it.ac.jp/~kouno/kougi.html> においてある。

せると

$$I = \frac{x^2}{2} + x - \log|x-1| + \frac{1}{2} \log(x^2+x+1) + \sqrt{3} \arctan \frac{2x+1}{\sqrt{3}}$$

(4) 少し理論的に

任意の有理関数の不定積分が初等関数で表されるかどうかを考えてみる。

一般の有理関数を $R(x) = \frac{f(x)}{g(x)}$ とする。(1) の操作で分子の次数は分母の次数より小さいと仮定してよい。次に $g(x)$ の因数分解を実行する。アルゴリズムは存在しないが、実数の範囲で 1 次式または 2 次式に因数分解される事が知られている (代数学の基本定理)。同じ因数が 2 個以上存在する場合もあるので、部分分数を実行すると、次の形の関数の和になっている。

$$\frac{f_1(x)}{(x+a)^n}, \quad \frac{f_2(x)}{(x^2+ax+b)^n}$$

分母が $(x^2+ax+b)^n$ の場合は変数変換で $(x^2+a^2)^n$ と仮定してよい。分子を $(x+a)$ または (x^2+a^2) で展開することにより、 $\frac{f_1(x)}{(x+a)^n} = \frac{a_1}{x+a} + \dots + \frac{a_n}{(x+a)^n}$, $\frac{f_2(x)}{(x^2+a^2)^n} = \frac{b_1x+c_1}{x^2+a^2} + \dots + \frac{b_nx+c_n}{(x^2+a^2)^n}$ とできる。以上により次の 3 つの積分ができればよい事が分かる。

$$\int \frac{1}{(x+a)^n} dx, \quad \int \frac{x}{(x^2+a^2)^n} dx, \quad \int \frac{1}{(x^2+a^2)^n} dx$$

1 番目は $u = x+a$, 2 番目は $u = x^2+a^2$ と置けばすぐできる。3 番目の積分を直接与えるのは難しいが次の漸化式により計算することができる。

$$J_n = \int \frac{1}{(x^2+a^2)^n} dx \text{ とおくと, 漸化式}$$

$$J_{n+1} = \frac{1}{2na^2} \left\{ \frac{x}{(x^2+a^2)^n} + (2n-1)J_n \right\}$$

が成立するので、この式により順次計算する事ができる。

演習問題 3.2 次の関数の不定積分を求めよ。

(1) $\frac{1}{x(x-1)}$

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

(3) $\frac{x^3}{(x+1)^2}$

(4) $\frac{1}{x(x^4-1)}$

(5) $\frac{1}{(x^2+1)^2}$

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

(7) $\frac{1}{x^3+1}$

(8) $\frac{1}{x^4+1}$

2 3 角関数の有理関数

$\int R(\sin x, \cos x) dx$ の形の積分, ただしここで $R(s, t)$ は s と t の有理関数。

$t = \tan(x/2)$ とおくと, $dx = \frac{2}{1+t^2} dt, \sin x = \frac{2t}{1+t^2}, \cos x = \frac{1-t^2}{1+t^2}$ なので,

$$\int R(\sin x, \cos x) = \int R\left(\frac{2t}{1+t^2}, \frac{1-t^2}{1+t^2}\right) \frac{2}{1+t^2} dt$$

となり有理関数の積分に帰着できる。これは万能であるが最善の方法とは限らない。例えば、 $\tan x$ で表される時は $t = \tan x$ と置く方が一般に簡単になる。

$$I = \int \frac{1}{\sin x} dx \text{ は } t = \tan\left(\frac{x}{2}\right) \text{ と置くと,}$$

$$I = \int \frac{1+t^2}{2t} \frac{2}{1+t^2} dt = \int \frac{1}{t} dt = \log |t| = \log \left| \tan\left(\frac{x}{2}\right) \right|$$

となる。

$I = \int (\tan x)^2 dx$ の場合 $t = \tan\left(\frac{x}{2}\right)$ と置いても出来るが、計算は少し面倒である。このとき $t = \tan x$ と置くと、 $\frac{dt}{dx} = \frac{1}{(\cos x)^2} = 1 + (\tan x)^2 = 1 + t^2$ なので

$$I = \int t^2 \frac{1}{1+t^2} dt = \int \frac{1+t^2-1}{1+t^2} dt = \int dt - \int \frac{1}{1+t^2} dt = t - \arctan t = \tan x - x$$

となる。

演習問題 3.3 次の関数の不定積分を求めよ。

(1) $\sin x \cos x$

(2) $\sin^3 x$

(3) $\frac{1}{\cos x}$

(4) $\frac{1}{\tan x}$

(5) $\frac{1}{1 + \sin x}$

(6) $\frac{1}{\sin x - \cos x}$

3 1次分数式の無理関数

$\int R\left(x, \sqrt[k]{\frac{ax+b}{cx+d}}\right) dx$ の形の積分、ただしここで $R(s, t)$ は s と t の有理関数。

$t = \sqrt[k]{\frac{ax+b}{cx+d}}$ と置くと、 $x = \frac{b-dt^k}{ct^k-a}$, $dx = \frac{(ad-bc)kt^{k-1}}{(ct^k-a)^2} dt$ より

$$\int R\left(x, \sqrt[k]{\frac{ax+b}{cx+d}}\right) dx = \int R\left(\frac{b-dt^k}{ct^k-a}, t\right) \frac{(ad-bc)kt^{k-1}}{(ct^k-a)^2} dt$$

演習問題 3.4 次の関数の不定積分を求めよ。

(1) $\sqrt{\frac{1-x}{x}}$

(2) $\frac{1}{x + \sqrt{x-1}}$

(3) $\frac{x}{(x-a)\sqrt{x+b}}$

4 ルートの中の2次式 (1)—3角関数

$\int R\left(x, \sqrt{ax^2+bx+c}\right) dx$ の形の積分、ただし、ここで $R(s, t)$ は s と t の有理関数。2通りの方法で計算をする。最初は3角関数を用いて変換するものを紹介し、次に無理式を用いるものを紹介する。3角関数を用いる変換の場合2次式はあらかじめ $a^2 - x^2, x^2 + a^2, x^2 - a^2$ のいずれかの形に変形されているものとする。

(1) $\int R\left(x, \sqrt{a^2 - x^2}\right) dx$

$x = a \sin t$ と置くと、

$$\int R\left(x, \sqrt{a^2 - x^2}\right) dx = \int R(a \sin t, a \cos t) a \cos t dt$$

$$(2) \int R(x, \sqrt{x^2 + a^2}) dx$$

$x = a \tan t$ と置くと,

$$\int R(x, \sqrt{x^2 + a^2}) dx = \int R\left(a \tan t, \frac{a}{\cos t}\right) \frac{a}{\cos^2 t} dt$$

$$(3) \int R(x, \sqrt{x^2 - a^2}) dx$$

$x = \frac{a}{\sin t}$ と置くと,

$$\int R(x, \sqrt{x^2 - a^2}) dx = - \int R\left(\frac{a}{\sin t}, \frac{a \cos t}{\sin t}\right) \frac{a \cos t}{\sin^2 t} dt$$

いずれの場合も 3 角関数の有理関数に帰着できる。

5 ルートの中の 2 次式 (2) — 無理関数

無理式を用いてルートの中に 2 次式がある場合の積分 $\int R(x, \sqrt{ax^2 + bx + c}) dx$ を求める。

(1) $a > 0$ の場合

$$\sqrt{ax^2 + bx + c} = t - \sqrt{ax} \text{ と置くと, } x = \frac{t^2 - c}{2\sqrt{at} + b}, dx = \frac{2\sqrt{at}^2 + 2bt + 2\sqrt{ac}}{(2\sqrt{at} + b)^2} dt, t - \sqrt{ax} = \frac{\sqrt{at}^2 + bt + c}{2\sqrt{at} + b} \text{ となるので}$$

$$\int R(x, \sqrt{ax^2 + bx + c}) dx = \int R\left(\frac{t^2 - c}{2\sqrt{at} + b}, \frac{\sqrt{at}^2 + bt + c}{2\sqrt{at} + b}\right) \frac{2\sqrt{at}^2 + 2bt + 2\sqrt{ac}}{(2\sqrt{at} + b)^2} dt$$

(2) $ax^2 + bx + c = 0$ が 2 解 $\alpha, \beta (\alpha < \beta)$ を持つ時。 $a > 0$ の場合もできるがここでは $a < 0$

とする。 $ax^2 + bx + c = a(x - \alpha)(x - \beta)$ となる。 $t = \sqrt{\frac{a(x - \beta)}{x - \alpha}}$ または同じことだが $\sqrt{ax^2 + bx + c} = t(x - \alpha)$ と置くと, $x = \frac{\alpha t^2 - a\beta}{t^2 - a}, x - \alpha = \frac{a(\alpha - \beta)}{t^2 - a}, \frac{dx}{dt} = \frac{2a(\beta - \alpha)t}{(t^2 - a)^2}$ より,

$$\int R(x, \sqrt{ax^2 + bx + c}) dx = \int R\left(\frac{\alpha t^2 - a\beta}{t^2 - a}, \frac{a(\alpha - \beta)t}{t^2 - a}\right) \frac{2a(\beta - \alpha)t}{(t^2 - a)^2} dt$$

を得る。

6 ルートの中の 2 次式 (3) — 双曲線関数 :

$\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}, \sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$ を hyperbolic cosine, hyperbolic sine と呼ぶ。これを
使えば「ルートの中の 2 次式の場合」を次の様に出来る。

$x = a \sinh t$ と置くと,

$$\int R(x, \sqrt{x^2 + a^2}) = \int R(a \sinh t, a \cosh t) a \cosh t dt$$

$x = a \cosh t$ と置くと,

$$\int R(x, \sqrt{x^2 - a^2}) = \int R(a \cosh t, a \sinh t) a \sinh t dt$$

いずれの場合も指数関数の有理関数に帰着できる。

方法の違いで結果が一見違うように見える時もある。例えば、 $I = \int \frac{1}{x\sqrt{x^2-1}} dx$ を考える。3角関数で置換すると、

$$I = I_1 = -\arcsin \frac{1}{x}$$

となるが、無理式を用いると、

$$I = I_2 = 2 \arctan(x + \sqrt{x^2-1})$$

となる。見かけは違うが、実は $I_2 = \pi + I_1$ となっている。

演習問題 3.5 次の関数の不定積分を求めよ。

$$\begin{array}{lll} (1) \frac{1}{\sqrt{a^2-x^2}} & (2) \frac{1}{\sqrt{x^2+a^2}} & (3) \sqrt{x^2+a} \\ (4) \sqrt{a^2-x^2} & (5) x^2\sqrt{a^2-x^2} & \end{array}$$

演習問題 3.6 今までは学んだ事に対応する演習問題で、演習問題の場所によってどの方法を使うかというのは明らかであった。最後に色々なタイプを混ぜて演習問題とする。積分計算の手法を身につけるのが目的なのですべてを解く必要はない。また中には難問もある。嗅覚を働かせてそれを避ける練習にもなるかもしれない。

次の関数の不定積分を求めよ。

$$\begin{array}{lll} (1) \frac{x^3}{\sqrt{1-x^2}} & (2) \cos^2 x - \sin^2 x & (3) \frac{x}{(1+x^2)^{3/2}} \\ (4) x \arcsin x & (5) \frac{\cos 2x}{e^{3x}} & (6) xe^{-x} \\ (7) x \cos x & (8) x^2 \sin x & (9) e^{3x+1} \\ (10) 2x \arctan x & (11) \log(2x+1) & (12) \frac{1}{x(\log x)^n} \\ (13) x^2 \log x & (14) xe^{2x^2+3} & (15) \frac{e^x}{x} + e^x \log x \\ (16) \arcsin \sqrt{\frac{x}{x+1}} & (17) (2x+1) \sin(x^2+x+1) & (18) \cos^n x \sin x \\ (19) (ax^2+bx+c)e^x & (20) \frac{\arcsin x}{(1-x^2)^{3/2}} & (21) \frac{x \arcsin x}{(1+x^2)^2} \\ (22) \sin(\log x) & (23) x^3 e^x & (24) x^4 e^x \\ (25) \frac{1}{x^4+x^2+1} & (26) \frac{1}{1+x^2} & (27) \frac{1}{(1+x)^2(x^2+1)} \\ (28) \frac{1}{1+x^3} & (29) \frac{1}{(1-x)^{2/3} - (1-x)^{1/2}} & (30) \frac{1}{\sqrt{4-x^2}} \\ (31) \frac{1}{\cos^8 x} & (32) \frac{1}{\sin x \cos^5 x} & (33) \frac{1+\sin x}{\sin x(1+\cos x)} \\ (34) \frac{x}{\sqrt{a-x}} & (35) \frac{1}{\sqrt{x}(\sqrt[3]{x}+4)} & (36) \sqrt{(1-\sqrt[3]{x^2})^3} \\ (37) \frac{(a+bx^3)^{3/2}}{x} & (38) \frac{1}{3+\cos x} & (39) \frac{\sin x}{1+\sin x+\cos x} \\ (40) \frac{1}{(e^x+e^{-x})^4} & (41) \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} & (42) \sqrt{x^2-1} \end{array}$$

- (43) $\frac{1}{\sqrt{x^2 - a^2}}$ (44) $\frac{1}{x^2\sqrt{1+x^2}}$ (45) $\frac{1-x^2}{1+x^2\sqrt{1+x^2}}$
- (46) $\frac{1}{(x+1)\sqrt{x^2+2x-1}}$ (47) $\frac{1}{1+x\sqrt{1+x^2}}$ (48) $\sqrt{x+\sqrt{x^2+2}}$
- (49) $\frac{1-2x}{(3-2x)\sqrt{1-x^2}}$ (50) $\frac{1}{(4-3x^2)\sqrt{3+4x^2}}$ (51) $\frac{1}{x^4\sqrt{a^2+x^2}}$
- (52) $\frac{1}{\sqrt[3]{1-x^3}}$ (53) $\frac{1}{x\sqrt{1+x^6}}$ (54) $\frac{1}{4+x^2}$
- (55) $\frac{1}{\sqrt{x+\sqrt[3]{x}}}$ (56) $\frac{1}{1+\sqrt[3]{x+1}}$ (57) $\frac{x^4}{\sqrt[4]{1+x^4}}$
- (58) $\frac{x(x^2+3)}{(x^2-1)(x^2+1)^2}$ (59) $3x^2e^{x^3+1}$ (60) $\frac{1}{x^3(x+1)}$
- (61) $\frac{2x^2+x+4}{x(x^2+2)^2}$ (62) $\frac{x^4-x^3-3x^2-x}{(x^2+1)^3}$ (63) $\frac{x^4-x^3+2x+1}{x^4-x^3-x+1}$
- (64) $\frac{3}{x^3-1}$ (65) $\frac{1}{e^x+4e^{-x}}$ (66) $\frac{\sin^2 x}{1+3\cos^2 x}$
- (67) $\frac{1}{e^x+e^{-x}}$ (68) $\frac{\sin x \cos x}{\sin^4 x + \cos^4 x}$ (69) $\frac{1}{a \sin^2 x + b \cos^2 x}$
- (70) $\frac{1}{a \cos x + b \sin x}$ (71) $\frac{1}{\sqrt{1-x}}$ (72) $\frac{\sqrt{x}}{1+x}$
- (73) $\frac{1}{2-\tan^2 x}$ (74) $\frac{1}{\sqrt{x^2+4}}$ (75) $\frac{\cos x}{\sin^n x}$
- (76) $\frac{1}{(2+x)\sqrt{1-x^2}}$ (77) $\frac{1}{\sqrt{x^2-1}}$ (78) $\frac{\log(\log x)}{x}$
- (79) $\frac{x^2}{\sqrt[3]{a^3+x^3}}$ (80) $\frac{1}{R^2-2RS \cos x + S^2}$ (81) $\frac{1}{(1+x)\sqrt{1-x}}$
- (82) $\frac{\sqrt{x-1}}{x\sqrt{x+1}}$ (83) $\frac{12}{x^3-8}$ (84) $\frac{\sin x}{1+\sin x}$
- (85) $\frac{1}{a+b \sin x}$ (86) $\sin 4x$ (87) $\frac{1}{\cos x(5+3 \cos x)}$
- (88) $\frac{x^2}{1+x^2} \arctan x$ (89) $\frac{\sin x}{3+\tan^2 x}$ (90) $\log(1+\sqrt{x})$
- (91) $\frac{1+\sqrt{1+x}}{1-\sqrt{x}}$ (92) $\frac{\sqrt{1-x}}{\sqrt{1+x}}$ (93) $\frac{1}{x^3(1+x^3)^{1/3}}$
- (94) $3x^2(x^3+5)^6$ (95) $x^5(x^3+a^3)^{3/2}$ (96) $\frac{x^2}{\sqrt{(a+bx^2)^5}}$
- (97) $\frac{1}{(x+2)\sqrt{2+x-x^2}}$ (98) $\frac{x^2}{\sqrt{a^2-x^2}}$ (99) $e^{ax} \cos bx$
- (100) $e^{ax} \sin bx$