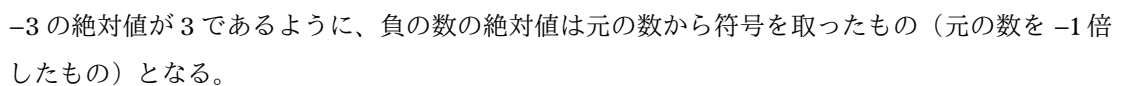


# 基礎数学

### 1.1.1 数直線上の原点からの距離

3 と -3 を例に考えると、どちらも絶対値は 3 となる。



- 正の数の絶対値は元の数そのまま (0 の絶対値もそのまま 0)
- 負の数の絶対値は元の数の  $-1$  倍

## 絶対値

実数  $a$  について、 $a$  の絶対値 を次のように定義する。

$$|a| = \begin{cases} a & (a \geq 0) \\ -a & (a < 0) \end{cases}$$

### 1.1.2 絶対値の性質

絶対値は 0 以上の数

負の数の場合は、符号を取って正の数にしたものを絶対値とすることから、絶対値が負の数になることはない。

絶対値は常に非負

実数  $a$  の絶対値  $|a|$  は、常に 0 以上の数となる。

$$|a| \geq 0$$

等号が成立するのは、 $a = 0$  の場合である。

中身の符号によらず絶対値は同じ

3 も -3 も、絶対値はともに 3 だった。つまり、

$$|3| = |-3| = 3$$

このことを一般化したのが、次の性質である。

中身の符号を変えても絶対値は不変

実数  $a$  の絶対値について、次が成り立つ。

$$|-a| = |a|$$

### 1.1.3 数直線上の2点間の距離

Under construction...



### 1.1.4 max 関数による表現

実数  $a$  の絶対値は、「 $a$  と  $-a$  のうち大きい方を選ぶ」という考え方で表現できる。

たとえば、3 と  $-3$  の絶対値はともに 3 だが、これは 3 と  $-3$  のうち大きい方（正の数の方）を絶対値として採用した、という見方もできる。

#### max 関数による絶対値の表現

実数  $a$  について、 $a$  の絶対値を次のように定義することもできる。

$$|a| = \max\{a, -a\}$$

ここで登場した  $\max$  は、「複数の数の中から最大のものを選ぶ」という操作を表している。

### 1.1.5 三角不等式

2 つの実数  $a$  と  $b$  の「絶対値の和」と「和の絶対値」の間には、次のような大小関係がある。

## 絶対値に関する三角不等式

任意の実数  $a$  と  $b$  について、次の不等式が成り立つ。

$$|a + b| \leq |a| + |b|$$

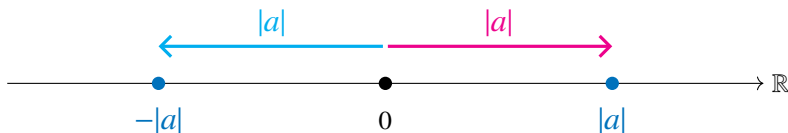


この形の不等式は、実は今後登場するベクトルの長さ（ノルム）や、複素数の絶対値に対しても成り立つ。三角不等式と呼ばれる所以は、ベクトルに関する三角不等式で明らかになる。

絶対値の定義から、この不等式の証明を考えてみよう。

$a$  の絶対値  $|a|$  は、 $a$  から符号を取り払ったものであるから、逆に絶対値  $|a|$  に  $+$  か  $-$  の符号をつけることで、元の数  $a$  に戻ることができる。

$a$  が負の数だったなら、 $-|a|$  とすれば  $a$  に戻る。正の数だったなら、 $|a|$  がそのまま  $a$  に一致する。



$a$  は原点からの距離が  $|a|$  の場所にあり、 $a$  は  $-|a|$  か  $|a|$  のどちらかに一致する。

どちらに一致するかはわからないので、次のような不等式で表しておく。

$$-|a| \leq a \leq |a|$$

$b$  についても、同じように考えることができる。

$$-|b| \leq b \leq |b|$$

これらの不等式を使って、さらに式変形を行うことで、三角不等式を導くことができる。

**Proof:** 絶対値に関する三角不等式

絶対値の定義から、次の不等式が成り立つ。

$$-|a| \leq a \leq |a|$$

$$-|b| \leq b \leq |b|$$

両辺を足し合わせて、次の不等式を得る。

$$-(|a| + |b|) \leq a + b \leq |a| + |b|$$

$-(|a| + |b|) \leq a + b$  の両辺を  $-1$  倍することで、次の関係も得られる。(不等式の両辺を  $-1$  倍すると、不等号の向きが逆転することに注意)

$$|a| + |b| \geq -(a + b)$$

ここまでで得られた、 $a + b$  についての不等式をまとめると、次のようになる。

$$|a| + |b| \geq a + b$$

$$|a| + |b| \geq -(a + b)$$

一方、 $a + b$  の絶対値は、定義より次のように表せる。

$$|a + b| = \max\{a + b, -(a + b)\}$$

$a + b$  と  $-(a + b)$  のうち大きい方が  $|a + b|$  となるが、 $a + b$  と  $-(a + b)$  はどちらも  $|a| + |b|$  以下となることがすでに示されているので、

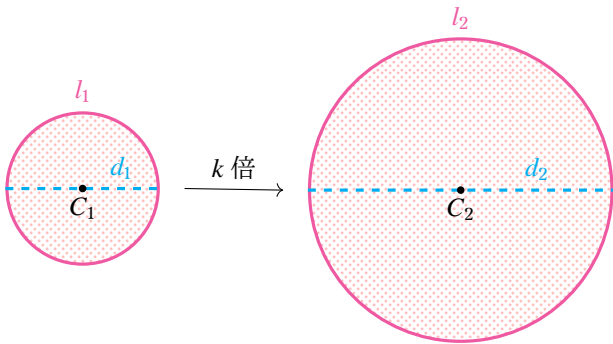
$$|a + b| \leq |a| + |b|$$

となり、定理は示された。 ■

## 1.2 三角関数

### 1.2.1 円周率

すべての円は、お互いを拡大もしくは縮小した関係にある。



円  $C_2$  が、円  $C_1$  を  $k$  倍に拡大したものだすると、その直径や円周も  $C_1$  の  $k$  倍となる。

$$d_2 = k \cdot d_1$$

$$l_2 = k \cdot l_1$$

この 2 つの式を各辺どうし割ることで、 $k$  が約分されて消え、直径と円周の比が等しくなることがわかる。

$$\frac{d_2}{l_2} = \frac{d_1}{l_1}$$

**円の直径と円周の比** すべての円において、直径と円周の長さの比は一定である。

そして、この一定の比率は、円周率  $\pi$  として知られている。

**円周率** 円の円周の長さ  $l$  と直径の長さ  $d$  の比を、円周率といい、 $\pi$  で表す。

$$\pi = \frac{l}{d} = 3.14 \dots$$

$\pi$  の定義式を変形すると、円周の長さを求める式が得られる。

半径を  $r$  とすると、直径  $d = 2r$  であるから、

$$l = \pi \cdot d = 2\pi r$$

円周の長さ 円の円周の長さ  $l$  は、半径  $r$  を使って次のように表される。

$$l = 2\pi r$$

## 1.3 指数関数

### 1.3.1 同じ数のかけ算の指数による表記

指数と底

同じ数  $a$  を  $n$  回掛けたものを  $a$  の  $n$  乗といい、 $a^n$  と表す。

$$a^n = \underbrace{a \times a \times \cdots \times a}_{n \text{ 個の } a}$$

このとき、 $n$  を指数、 $a$  を底という。

### 1.3.2 指数法則

指数を「かける回数」と捉えれば、いくつかの法則が当たり前に成り立つことがわかる。

「かける回数」の和

例えば、 $a$  を  $m$  回かけてから、続けて  $a$  を  $n$  回かける式を書いてみると、 $a$  は  $m+n$  個並ぶことになる。

$$\overbrace{a \times a \times a}^{a^3} \times \overbrace{a \times a}^{a^2} = \overbrace{a \times a \times a \times a \times a}^{a^5}$$

指数の和に関する指数法則

$$a^m \times a^n = a^{m+n}$$

### 「かける回数」の差

例えば、 $a$  を  $m$  回かけたものを、 $a$  を  $n$  回かけたもので割ると、 $m - n$  個の  $a$  の約分が発生する。

$$\frac{\overbrace{a \times a \times a \times a \times a}^{a^5}}{\underbrace{a \times a}_{a^2}} = \overbrace{a \times a \times a}^{a^3}$$

指数の差に関する指数法則

$$\frac{a^m}{a^n} = a^{m-n}$$

### 「かける回数」の積

例えば、「 $a$  を  $m$  回かけたもの」を  $n$  回かける式を書いてみると、 $a$  は  $m \times n$  個並ぶことになる。

$$(a^2)^3 = \underbrace{\overbrace{a \times a}^{a^2} \times \overbrace{a \times a}^{a^2} \times \overbrace{a \times a}^{a^2}}_{a^6}$$

指数の積に関する指数法則

$$(a^m)^n = a^{mn}$$

## 1.3.3 指数の拡張と指数関数

底を固定して、指数を変化させる関数を考えたい。

指数部分に入れられる数を拡張したいが、このとき、どんな数を入れても指数法則が成り立つようにしたい。

### 0 の指数

指数法則  $a^m \times a^n = a^{m+n}$  において、 $m = 0$  の場合を考える。

$$a^0 \times a^n = a^{0+n}$$

$$a^0 \times a^n = a^n$$



この式が成り立つためには、 $a^0$  は1である必要がある。

#### 0の指数

どんな数も、0乗すると1になると定義する。

$$a^0 = 1$$

そもそも、指数法則  $a^m \times a^n = a^{m+n}$  は、「指数の足し算が底のかけ算に対応する」ということを表している。

- 「何もしない」足し算は +0
- 「何もしない」かけ算は  $\times 1$

なので、 $a^0 = 1$  は「何もしない」という観点で足し算とかけ算を対応づけたものといえる。

#### 負の指数

指数法則  $a^m \times a^n = a^{m+n}$  において、正の数  $n$  を負の数  $-n$  に置き換えたものを考える。

$$a^m \times a^{-n} = a^{m-n}$$

さらに、指数法則  $\frac{a^m}{a^n} = a^{m-n}$  も成り立っていてほしいので、

$$a^m \times a^{-n} = \frac{a^m}{a^n}$$

この式は、 $a^{-n} = \frac{1}{a^n}$  とすれば、当たり前になり立つものとなる。

#### 負の整数の指数

$n$  が正の整数であるとき、 $-n$  乗を次のように定義する。

$$a^{-n} = \frac{1}{a^n}$$

## 有理数の指数

指数法則  $a^m \times a^n = a^{m+n}$  において、指数  $m, n$  を  $\frac{1}{2}$  に置き換えたものを考える。

$$a^{\frac{1}{2}} \times a^{\frac{1}{2}} = a^{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}} = a$$

$a^{\frac{1}{2}} \times a^{\frac{1}{2}}$  は、 $(a^{\frac{1}{2}})^2$  とも書けるので、

$$(a^{\frac{1}{2}})^2 = a$$

つまり、 $a^{\frac{1}{2}}$  は、2 乗すると  $a$  になる数 ( $a$  の平方根) でなければならない。

$$a^{\frac{1}{2}} = \sqrt{a}$$

同様に、 $a^{\frac{1}{3}} \times a^{\frac{1}{3}} \times a^{\frac{1}{3}}$  を考えてみると、

$$a^{\frac{1}{3}} \times a^{\frac{1}{3}} \times a^{\frac{1}{3}} = a^{\frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3}} = a$$

$a^{\frac{1}{3}} \times a^{\frac{1}{3}} \times a^{\frac{1}{3}}$  は、 $(a^{\frac{1}{3}})^3$  とも書けるので、

$$(a^{\frac{1}{3}})^3 = a$$

つまり、 $a^{\frac{1}{3}}$  は、3 乗すると  $a$  になる数 ( $a$  の 3 乗根) でなければならない。

$$a^{\frac{1}{3}} = \sqrt[3]{a}$$

このようにして、 $a^{\frac{1}{n}}$  は、 $n$  乗すると  $a$  になる数 ( $a$  の  $n$  乗根) として定義すればよい。

$$a^{\frac{1}{n}} = \sqrt[n]{a}$$

さて、分子が 1 ではない場合はどうだろうか？

$(a^{\frac{m}{n}})^n = a^{m}$  において、 $m$  を  $\frac{m}{n}$  に置き換えたものを考えると、

$$(a^{\frac{m}{n}})^n = a^{\frac{m}{n} \times n} = a^m$$

となるので、 $a^{\frac{m}{n}}$  は、 $n$  乗したら  $a^m$  になる数として定義すればよい。

$$a^{\frac{m}{n}} = \sqrt[n]{a^m}$$

## 有理数の指数

$m, n$  が整数で、 $n$  が正の整数であるとき、 $\frac{m}{n}$  乗を次のように定義する。

$$a^{\frac{m}{n}} = \sqrt[n]{a^m}$$

## 実数への拡張

有理数は無数にあるので、指数  $x$  を有理数まで許容した関数  $y = a^x$  のグラフを書くと、十分に繋がった線になる。

指数が無理数の場合は、まるでグラフ上の点と点の間を埋めるように、有理数の列で近似していくことで定義できる。

これで、 $x$  を実数とし、関数  $y = a^x$  を定義できる。

## 指数関数

$a$  を正の実数とし、 $x$  を実数とすると、次のような関数を指数関数という。

$$y = a^x$$

## 1.3.4 指数関数の底の変換

用途に応じて、使いやすい指数関数の底は異なる。

- $e$  : 微分積分学、複素数、確率論など
- $2$  : 情報理論、コンピュータサイエンスなど
- $10$  : 対数表、音声、振動、音響など

よって、これらの底を互いに変換したい場面もある。

指数の底を変えることは、指数の定数倍で実現できる。

例えば、底が  $4$  の指数関数  $4^x$  を、底が  $2$  の指数関数に変換したいとすると、

$$4^x = (2^2)^x = 2^{2x}$$

のように、指数部分を 2 倍することで、底を 4 から 2 へと変換できる。

当たり前だが、この変換は、 $4 = 2^2$  という関係のおかげで成り立っている。

「4 は 2 の何乗か？」がすぐにわかるから、4 から 2 への底の変換が簡単にできたのだ。

より一般に、 $a^x$  と  $b^x$  において、 $a = b^c$  という関係があるとする。

つまり、 $a$  は  $b$  の  $c$  乗だとわかっているなら、

$$a^x = (b^c)^x = b^{cx}$$

のように、底を  $a$  から  $b$  へと変換できる。

### 指数関数の底の変換

指数を定数倍することは、底を変えることと同じ操作になる。

$a = b^c$  という関係があるなら、次の変換が成り立つ。

$$a^x = b^{cx}$$

ここで重要なのは、指数関数の底を変換するには、「 $a$  は  $b$  の何乗か？」がわかっている必要があるということだ。

次章では、 $a = b^c$  となるような  $c$  を表す道具として、対数を導入する。

## 1.4 対数関数

### 1.4.1 対数：指数部分を関数で表す

指数関数は、「 $a$  を  $x$  乗したら  $y$  になる」という関係を表現するものだった。

ここで、逆に「 $y$  は  $a$  の何乗か？」という関係を表現するものとして、対数関数を定義する。

これは、 $y$  から  $x$  を導き出す関数であるから、指数関数  $y = a^x$  の逆関数といえる。

## 対数

$a^y = x$  を満たす  $y$  を、 $a$  を底とする  $x$  の対数といい、次のように表す。

$$y = \log_a x$$

ここで、 $x$  は真数、 $a$  は底と呼ばれる。

## 対数関数は指数関数の逆関数

対数関数  $y = \log_a x$  は、指数関数  $x = a^y$  の逆関数である。

$$\log_a x = y \iff a^y = x$$

対数は、指数関数の指数部分を表す。

$a^y = x$  の  $y$  に、 $y = \log_a x$  を代入することで、次のような式にまとめることもできる。

## 指数部分は対数で書き換えられる

$$a^{\log_a x} = x$$

## 1.4.2 対数の性質

指数法則を対数に翻訳することで、対数の性質を導くことができる。

真数のかけ算は  $\log$  の足し算

$x_1 = a^m, x_2 = a^n$  として、指数法則  $a^m \times a^n = a^{m+n}$  を考える。

$$\begin{aligned} x_1 x_2 &= a^m \times a^n \\ &= a^{m+n} \end{aligned}$$

対数は指数部分を表すので、 $m + n = \log_a(x_1 x_2)$  がいえる。

また、 $x_1 = a^m$  より  $m = \log_a x_1$ 、 $x_2 = a^n$  より  $n = \log_a x_2$  と表せるから、

$$m + n = \log_a x_1 + \log_a x_2 = \log_a(x_1 x_2)$$

積の対数は対数の和

$$\log_a(x_1 x_2) = \log_a x_1 + \log_a x_2$$

真数の割り算は  $\log$  の引き算

$x_1 = a^m, x_2 = a^n$  として、指数法則  $\frac{a^m}{a^n} = a^{m-n}$  を考える。

$$\begin{aligned} \frac{x_1}{x_2} &= \frac{a^m}{a^n} \\ &= a^{m-n} \end{aligned}$$

対数は指数部分を表すので、 $m - n = \log_a\left(\frac{x_1}{x_2}\right)$  がいえる。

また、 $x_1 = a^m$  より  $m = \log_a x_1$ 、 $x_2 = a^n$  より  $n = \log_a x_2$  と表せるから、

$$m - n = \log_a x_1 - \log_a x_2 = \log_a\left(\frac{x_1}{x_2}\right)$$

商の対数は対数の差

$$\log_a\left(\frac{x_1}{x_2}\right) = \log_a x_1 - \log_a x_2$$

真数の冪乗は  $\log$  の指数倍

$x = a^m$  として、指数法則  $(a^m)^n = a^{mn}$  を考える。

$$\begin{aligned} x^n &= (a^m)^n \\ &= a^{mn} \end{aligned}$$

対数は指数部分を表すので、 $mn = \log_a x^n$  がいえる。

また、 $x = a^m$  より  $m = \log_a x$  と表せるから、

$$mn = n \log_a x \log_a x^n$$

冪の対数は対数の指数倍

$$\log_a x^n = n \log_a x$$

### 1.4.3 常用対数と桁数

Under construction...



常用対数 底を 10 にした対数関数を、常用対数と呼ぶ。

$$\log_{10} x$$

### 1.4.4 指数関数の底の変換：対数を用いた表現

指数関数の底  $a$  から  $b$  に変換するには、「 $a$  は  $b$  の何乗か？」がわかっている必要があった。

#### REVIEW

$a = b^c$  という関係があるなら、

$$a^x = b^{cx}$$

今では、 $a = b^c$  となるような  $c$  を、対数で表すことができる。

$$b^c = a \iff c = \log_b a$$

指数関数の底の変換公式

$$a^x = b^{(\log_b a)x}$$