

Chapter 1

微分と積分

1.1 1 変数関数の微分

微分とは、複雑な問題も「拡大して見たら簡単に見える（かもしれない）」という発想で、わずかな変化に着目して入力と出力の関係（関数）を調べる手法といえる。

1.1.1 接線：拡大したら直線に近似できる

関数 $y = f(x)$ について、引数の値を $x = x_0$ からわずかに増加させて、 $x = x_0 + \Delta x$ にした場合の出力の変化を考える。



このとき、増分の幅 Δx を狭くしていく (Δx の値を小さくしていく) と、 $x = x_0$ 付近において、関数 $y = f(x)$ のグラフは直線にほとんど重なるようになる。



このように、関数 $f(x)$ は、ある点 x_0 の付近では、

$$f(x) \simeq a(x - x_0) + b$$

という直線に近似することができる。

ここで、 $f(x_0)$ の値を考えると、

$$\begin{aligned} f(x_0) &= a(x_0 - x_0) + b \\ &= a \cdot 0 + b \\ &= b \end{aligned}$$

であるから、実は $b = f(x_0)$ である。

一方、 a はこの直線の傾きを表す。

そもそも、傾きとは、 x が増加したとき、 y がどれだけ急に（速く）増加するかを表す量である。

関数のグラフを見ると、急激に上下する箇所もあれば、なだらかに変化する箇所もある。

つまり、ある点でグラフにぴったりと沿う直線（接線）を見つけたとしても、その傾きは場所によって異なる。

そこで、「傾きは位置 x の関数」とみなして、次のように表現しよう。

$$a = f'(x)$$

これで、先ほどの直線の式を完成させることができる。

関数の各点の接線

関数 $f(x)$ は、ある点 x_0 の付近では、

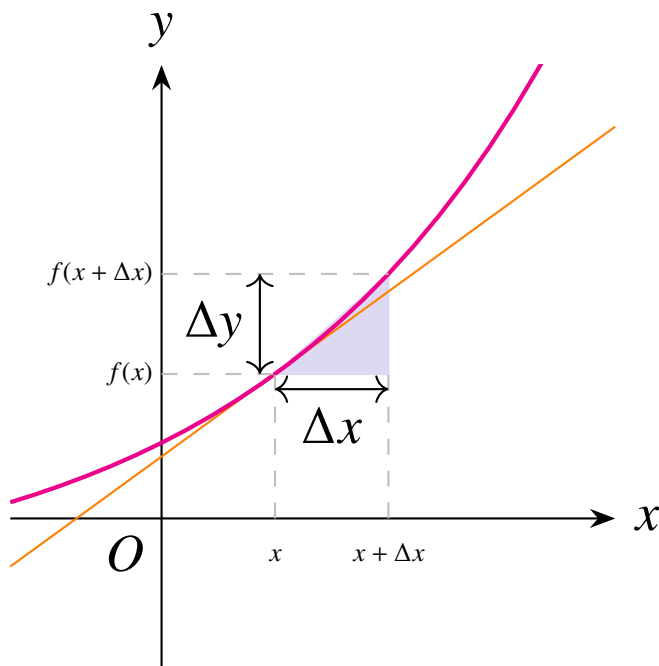
$$f(x) \simeq f(x_0) + f'(x)(x - x_0)$$

という傾き $f'(x)$ の直線に近似できる。

1.1.2 接線の傾きとしての導関数

傾きは位置 x の関数 $f'(x)$ としたが、この関数がどのような関数なのか、結局傾きを計算する方法がわかっていない。

直線の傾きは x と y の増加率の比として定義されているから、まずはそれぞれの増加率を数式で表現しよう。



この図から、 y の増加率 Δy は次のように表せることがわかる。

$$\Delta y = f(x + \Delta x) - f(x)$$

この両辺を Δx で割ると、 x の増加率 Δx と y の増加率 Δy の比率が表せる。

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

図では Δx には幅があるが、この幅を限りなく 0 に近づけると、幅というより点になる。

つまり、 $\Delta x \rightarrow 0$ とすれば、 $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ は任意の点 x での接線の傾きとなる。

「任意の点 x での傾き」も x の関数であり、この関数を導関数と呼ぶ。

導関数

関数 $f(x)$ の任意の点 x における接線の傾き（増加の速さ）を表す関数を導関数といい、次のように定義する。

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

1.1.3 微分とその関係式

微分 関数 $f(x)$ から、その導関数 $f'(x)$ を求める操作を微分という。

関数のグラフから離れて、微分という「計算」を考えるにあたって、先ほどの導関数の定義式よりも都合の良い表現式がある。

$x \rightarrow 0$ とした後の Δx を dx と書くことにして、 $\lim_{\Delta x \rightarrow 0}$ を取り払ってしまおう。

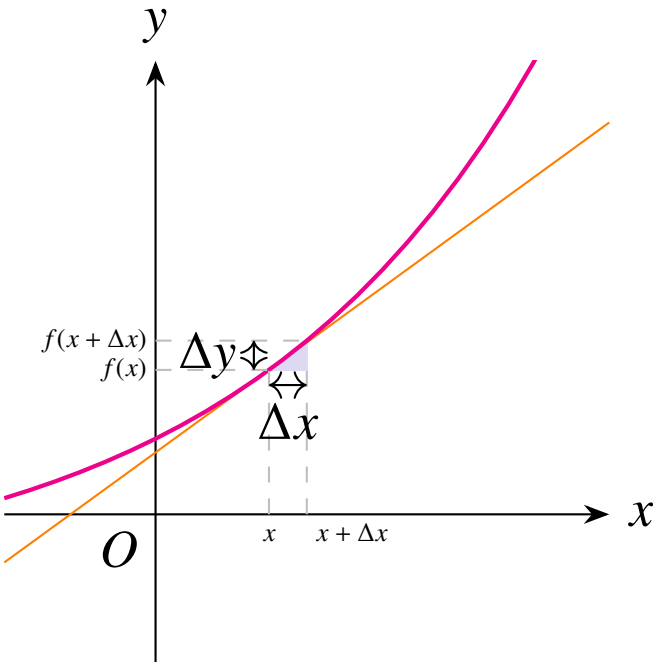
$$\begin{aligned} f'(x) &= \frac{f(x + dx) - f(x)}{dx} \\ f'(x)dx &= f(x + dx) - f(x) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{両辺} \times dx \\ f(x) \text{ を移項} \end{array} \right. \\ f'(x)dx + f(x) &= f(x + dx) \end{aligned}$$

微分の関係式

$$f(x + dx) = f(x) + f'(x)dx$$

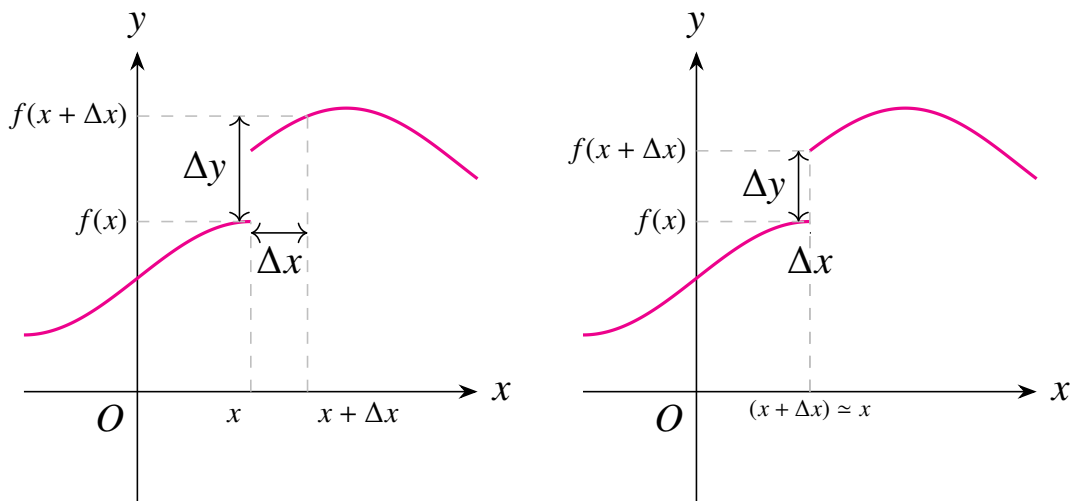
1.1.4 不連続点と微分可能性

点 x において連続な関数であれば、幅 Δx を小さくすれば、その間の変化量 Δy も小さくなるはずである。



しかし、不連続な点について考える場合は、そうはいかない。

下の図を見ると、 Δx の幅を小さくしても、 Δy は不連続点での関数の値の差の分までしか小さくならない。



このような不連続点においては、どんなに拡大しても、関数のグラフが直線にぴったりと重なることはない。

「拡大すれば直線に近似できる」というのが微分の考え方だが、不連続点ではこの考え方を適用できないのだ。

関数の不連続点においては、微分という計算を考えることがそもそもできない。

ある点での関数のグラフが直線に重なる（微分可能である）ためには、 $\Delta x \rightarrow 0$ としたときに $\Delta y \rightarrow 0$ となる必要がある。

1.1.5 導関数のさまざまな記法

微分を考えると、 $\Delta x \rightarrow 0$ としたときに $\Delta y \rightarrow 0$ となる前提のもとで議論する。

$\Delta x \rightarrow 0$ とした結果を dx 、 $\Delta y \rightarrow 0$ の結果を dy とすると、ある点 x での接線の傾きは、次のようにも表現できる。

$$\frac{dy}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

この接線の傾きが x の関数であることを表現したいときは、次のように書くこともある。

$$\frac{dy}{dx}(x)$$

これも一つの導関数（位置に応じた接線の傾きを表す関数）の表記法である。

この記法は、どの変数で微分しているかがわかりやすいという利点がある。

導関数のライプニッツ記法

次のような記号はいずれも、関数 $y = f(x)$ の導関数を表す。

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

特に、 $\frac{d}{dx}f(x)$ という記法は、 $\frac{d}{dx}$ の部分を微分操作を表す演算子として捉えて、「関数 $f(x)$ に微分という操作を施した」ことを表現しているように見える。

微分演算子

関数を微分するという操作を表現する演算子を微分演算子という。

例えば、次のような記号で表される。

$$\frac{d}{dx}$$

ところで、これまで使ってきた $f'(x)$ という導関数の記法にも、名前がついている。

導関数のニュートン記法

次の記号は、関数 $y = f(x)$ の導関数を表す。

$$f'(x)$$

この記法は、「 f という関数から導出された関数が f' である」ことを表現している。

導関数はあくまでも関数 f から派生したものであるから、 f という文字はそのまま、加工されたことを表すために ' をつけたものと解釈できる。

1.1.6 微分の性質

微分の関係式を使うことで、微分に関する有用な性質を導くことができる。

REVIEW

微分の関係式

$$f(x+dx) = \overset{\text{元の関数}}{f(x)} + \overset{\text{導関数}}{f'(x) dx}$$

関数の一次結合の微分

 $\alpha f(x) + \beta g(x)$ において、 x を dx だけ微小変化させてみる。

$$\begin{aligned} \alpha f(x+dx) + \beta g(x+dx) &= \alpha \{f(x) + f'(x)dx\} + \beta \{g(x) + g'(x)dx\} \\ &= \overset{\text{元の関数}}{\alpha f(x) + \beta g(x)} + \{ \overset{\text{導関数}}{\alpha f'(x) + \beta g'(x)} \} dx \end{aligned}$$

微分の線形性

$$(\alpha f(x) + \beta g(x))' = \alpha f'(x) + \beta g'(x)$$

関数の積の微分

 $f(x)g(x)$ において、 x を dx だけ微小変化させてみる。

$$\begin{aligned} f(x+dx)g(x+dx) &= \{f(x) + f'(x)dx\} \{g(x) + g'(x)dx\} \\ &= f(x)g(x) + f'(x)g(x)dx + f(x)g'(x)dx + f'(x)g'(x)dx^2 \\ &= f(x)g(x) + \{f'(x)g(x) + f(x)g'(x)\}dx + \overset{\text{2 次以上の微小量}}{f'(x)g'(x)dx^2} \end{aligned}$$

ここで、 dx^2 は、 dx より速く 0 に近づくので無視できる。荒く言ってしまうと、 dx でさえ微小量なのだから、 dx^2 なんて存在しないも同然だと考えてよい。

このことは、次の図を見るとイメージできる。



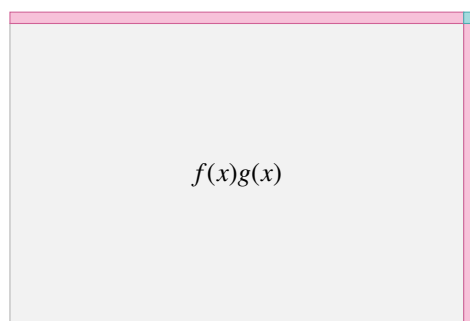
$dx \rightarrow 0$ のとき $dy \rightarrow 0$ となる場合に微分という計算を定義するのだから、 dx を小さくしていくと、 dy にあたる $f(x+dx) - f(x)$ (これは $f'(x)dx$ と等しい) も小さくなっていく。同様に、 $g(x+dx) - g(x)$ (これは $g'(x)dx$ と等しい) も小さくなっていく。

REVIEW

微分の関係式 $f(x+dx) = f(x) + f'(x)dx$ より、

$$f'(x)dx = f(x+dx) - f(x)$$

dx を小さくした場合を図示すると、



2 次以上の微小量

$f'(x)g'(x)dx^2$ に相当する左上の領域は、ほとんど点になってしまうことがわかる。

このように、 dx^2 の項は無視してもよいものとして、先ほどの計算式は次のようになる。

$$f(x+dx)g(x+dx) = \overset{\text{元の関数}}{f(x)g(x)} + \overset{\text{導関数}}{\{f'(x)g(x) + f(x)g'(x)\}dx}$$

微分のライプニッツ則

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

1.1.7 冪関数の微分

具体的な関数の導関数も、微分の関係式をもとに考えることができる。

まずは、基本的な例として、冪関数 $y = x^n$ の微分を考えてみよう。

$y = x^2$ の微分

$y = f(x) = x^2$ において、 x を dx だけ微小変化させると、 y は dy だけ変化するとする。

すると、微分の関係式は $y + dy = f(x + dx) = (x + dx)^2$ となるが、これを次のように展開して考える。

$$y + dy = (x + dx)(x + dx)$$

右辺の $(x + dx)(x + dx)$ からは、

- x^2 の項が1つ
- xdx の項が2つ
- dx^2 の項が1つ

現れることになる。

数式で表すと、

$$\boxed{y} + dy = \boxed{x^2} + 2xdx + dx^2$$

↑ ↑
同じ

ここで $y = x^2$ なので、左辺の y と右辺の x^2 は相殺される。

高次の微小量

$$dy = 2xdx + dx^2$$

さらに、 dx^2 の項は無視することができる。

なぜなら、 dx を小さくすると、 dx^2 は dx とは比べ物にならないくらい小さくなってしまふからだ。



というわけで、次のような式が得られる。

$$dy = 2xdx$$

よって、 $y = x^2$ の導関数は、 $y' = 2x$ となることがわかった。

$$\frac{dy}{dx} = 2x$$

$y = x^3$ の微分

同じように、 $y = x^3$ の微分を考えてみよう。

$$y + dy = (x + dx)(x + dx)(x + dx)$$

右辺の $(x + dx)(x + dx)(x + dx)$ からは、

- x^3 の項が1つ
- $x^2 dx$ の項が3つ
- dx^3 の項が1つ

現れることになる。

$$y + dy = \overset{\text{同じ}}{\overset{\uparrow}{x^3}} + 3x^2 dx + dx^3$$

ここで $y = x^3$ なので、左辺の y と右辺の x^3 は相殺される。

高次の微小量

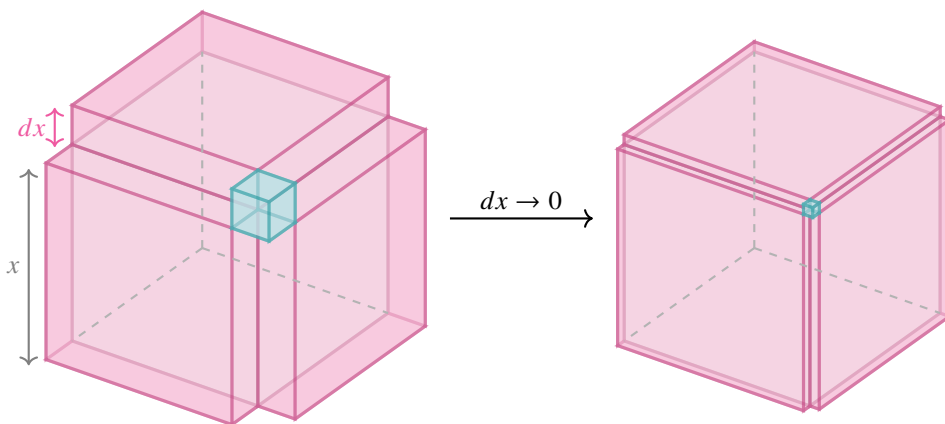
$$dy = 3x^2 dx + \text{ } dx^3$$

さらにここでは、 dx^3 の項を無視することができる。

次の図を見てみよう。

各辺 dx の立方体は、 dx を小さくすると、ほぼ点にしか見えないほど小さくなる。

つまり、各辺 dx の立方体の体積 dx^3 は、考慮する必要がない。



というわけで、 $y = x^3$ の導関数は、 $y' = 3x^2$ となることがわかった。

$$\frac{dy}{dx} = 3x^2$$

$y = x^n$ の微分 (n が自然数の場合)

n が自然数だとすると、 $y = x^n$ の微分は、 $y = x^2$ や $y = x^3$ の場合と同じように考えられる。

$$y + dy = \underbrace{(x + dx)(x + dx) \cdots (x + dx)}_{n \text{ 個}}$$

右辺の $(x + dx)(x + dx) \cdots (x + dx)$ を展開しようすると、次のような 3 種類のかけ算が発生する。

- x どうしのかけ算
- x と dx のかけ算

- dx どうしのかけ算

つまり、右辺からは、

- x^n の項が1つ
- $x^{n-1}dx$ の項が n 個
- dx^n の項が1つ

という項が現れることになる。

そして、 x^n は左辺の y と相殺され、 dx^n の項は高次の微小量として無視できる。

すると、残るのは次のような式になるだろう。

$$dy = nx^{n-1}dx$$

この式は、 $y = \alpha x$ という直線の式によく似ている。

高次の dx の項 dx^n を無視し、1次の dx の項だけ残したのは、微分という計算が微小範囲における直線での近似であるからだ。

あくまでも微小範囲での直線の式であることを表すために、 x, y を dx, dy として、 $dy = \alpha dx$ という形の式になっていると考えればよい。

自然数の冪を持つ冪関数の導関数

n が自然数のとき、 $y = x^n$ の導関数は次のようになる。

$$\frac{dy}{dx} = nx^{n-1}$$

$y = x^n$ の微分 (n が整数の場合)

指数法則を使うことで、 n が負の整数の場合にも拡張することができる。

まずは、 $y = x^{-1}$ の微分を考えてみよう。

指数法則より、 $y = x^{-1}$ は次のように変形できる。

$$\begin{array}{l} y = \frac{1}{x} \\ xy = 1 \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} \downarrow \\ \text{両辺} \times x \end{array} \right\}$$

微小変化を加えた微分の関係式を作って、次のように展開していく。

$$(x + dx)(y + dy) = 1$$

$$\overset{\text{高次の微小量}}{xy} + xdy + ydx + dydx = 1$$

↑ 同じ ↑

ここで、微小量の掛け合わせである $dydx$ は無視できるほど小さい。

また、 $y = \frac{1}{x}$ より、 $xy = 1$ なので、左辺の xy と右辺の 1 は相殺される。

すると、残った式は、

$$\begin{aligned} xdy + ydx &= 0 \\ xdy &= -ydx && \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} ydx \text{ を移項} \\ x \frac{dy}{dx} &= -y && \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \text{両辺} \div dx \\ \frac{dy}{dx} &= -\frac{y}{x} && \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \text{両辺} \div x \end{aligned}$$

y が残ってしまっているので、 $y = \frac{1}{x}$ を代入すると、

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= -\frac{1}{x^2} \\ &= -x^{-2} \end{aligned}$$

これは、冪が自然数の場合の冪関数の微分 $\frac{dy}{dx} = nx^{n-1}$ において、 $n = -1$ を代入したものになっている。

n が任意の負の整数の場合も、同様に考えられる。

$y = x^{-n}$ を、 $x^n y = 1$ として、

$$\underbrace{(x+dx)(x+dx)\cdots(x+dx)}_{n\text{個}} \times (y+dy) = 1$$

高次の微小量

$$(x^n + nx^{n-1}dx + dx^n) \times (y+dy) = 1$$

$$(x^n + nx^{n-1}dx) \times (y+dy) = 1$$

高次の微小量を無視

高次の微小量

$$x^n y + x^n dy + nx^{n-1} y dx + nx^{n-1} dx dy = 1$$

同じ

相殺&無視

$$x^n dy + nx^{n-1} y dx = 0$$

移項してさらに整理すると、

$$x^n dy = -nx^{n-1} y dx$$

$$x^n \frac{dy}{dx} = -nx^{n-1} y$$

$$\frac{dy}{dx} = -nx^{n-1} x^{-n} y$$

$$= -nx^{n-1} x^{-n} x^{-n}$$

$$= -nx^{-n-1}$$

両辺 $\div dx$ 両辺 $\times x^{-n}$ $y = x^{-n}$ 指数法則 $x^m x^n = x^{m+n}$

これもやはり、冪が自然数の場合の冪関数の微分 $\frac{dy}{dx} = nx^{n-1}$ において、 n を $-n$ に置き換えたものになっている。

つまり、自然数（正の整数）だけでなく、負の整数も許容して、次のことがいえる。

整数の冪を持つ冪関数の導関数

n が整数のとき、 $y = x^n$ の導関数は次のようになる。

$$\frac{dy}{dx} = nx^{n-1}$$

$y = x^n$ の微分 (n が実数の場合)

n が有理数の場合はどうだろうか。実はこれも、指数法則によって拡張することができる。

m と n はどちらも自然数として、 $y = x^{\frac{m}{n}}$ の微分を考える。

まず、 $y = x^{\frac{m}{n}}$ は、 $y^n = x^m$ とまったく同じ式である。

$$\begin{array}{l} y^n = x^m \\ y = x^{\frac{m}{n}} \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} y^n = x^m \\ y = x^{\frac{m}{n}} \end{array}} \right\} \text{両辺 } \frac{1}{n} \text{ 乗}$$

というわけで、 $y^n = x^m$ を微小変化させて、展開してみよう。

$$\underbrace{(y + dy)(y + dy) \cdots (y + dy)}_{n \text{ 個}} = \underbrace{(x + dx)(x + dx) \cdots (x + dx)}_{m \text{ 個}}$$

ここで、 n と m は自然数なのだから、自然数幂のときと同じように考えて、次のような式が残ることになる。

$$ny^{n-1}dy = mx^{m-1}dx$$

よって、 $\frac{dy}{dx}$ の式の y を含まない形を目指すと、

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \frac{mx^{m-1}}{ny^{n-1}} \\ &= \frac{mx^{m-1}}{nx^{\frac{m}{n}(n-1)}} && \left. \vphantom{\frac{mx^{m-1}}{nx^{\frac{m}{n}(n-1)}}} \right\} y = x^{\frac{m}{n}} \\ &= \frac{mx^{m-1}}{nx^{m-\frac{m}{n}}} \\ &= \frac{mx^m x^{-1}}{nx^m x^{-\frac{m}{n}}} && \left. \vphantom{\frac{mx^m x^{-1}}{nx^m x^{-\frac{m}{n}}}} \right\} \text{指数法則 } x^{a+b} = x^a x^b \\ &= \frac{mx^{-1}}{nx^{-\frac{m}{n}}} && \left. \vphantom{\frac{mx^{-1}}{nx^{-\frac{m}{n}}}} \right\} x^m \text{ で約分} \\ &= \frac{m}{n} \cdot \frac{x^{-1}}{x^{-\frac{m}{n}}} \\ &= \frac{m}{n} \cdot x^{-1-(-\frac{m}{n})} && \left. \vphantom{\frac{m}{n} \cdot x^{-1-(-\frac{m}{n})}} \right\} \text{指数法則 } \frac{a^m}{a^n} = a^{m-n} \\ &= \frac{m}{n} \cdot x^{-1+\frac{m}{n}} \\ &= \frac{m}{n} x^{\frac{m}{n}-1} \end{aligned}$$

これは、幂が自然数の場合の幂関数の微分 $\frac{dy}{dx} = nx^{n-1}$ において、 n を $\frac{m}{n}$ に置き換えたものになっている。

つまり、整数だけでなく、有理数に対しても同様の導関数の式が成り立つ。

ここまで来ると、無理数はどうだろうか？という疑問が生まれるが、無理数への拡張は指数法則では対応できない。

無理数に対しては、極限操作によって同様の導関数の式を導くことができ、実数全体に対して同じ導関数の式が成り立つことが示される。

冪関数の導関数

n が実数のとき、 $y = x^n$ の導関数は次のようになる。

$$\frac{dy}{dx} = nx^{n-1}$$

1.1.8 定数関数の微分

常に一定の値 c を返す定数関数 $f(x) = c$ の微分はどうなるだろうか。

関数のグラフを描いて考えてみよう。



定数関数のグラフは、 x 軸に対して平行な直線であり、この直線の傾きを見るからに 0 である。実際、導関数の定義に従って計算することで、定数関数の導関数は 0 になることを確かめられる。

REVIEW

導関数の定義

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

どの点 x においても $f(x)$ が c を返すということは、 $f(x + \Delta x)$ も c であるため、

$$\begin{aligned} f'(x) &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{c - c}{\Delta x} \\ &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{0}{\Delta x} \\ &= 0 \end{aligned}$$

となり、定数関数 $f(x) = c$ の微分の結果は c に依存せず、常に 0 になる。

定数関数の微分

常に定数 c の値をとる定数関数 $f(x) = c$ は、微分すると 0 になる。

$$\frac{d}{dx}c = 0$$

1.1.9 合成関数の微分

合成関数の微分の一般的な式は、いろいろな関数の微分を考える上で重要な公式である。

関数の微小変化量

関数 $f(x)$ において、変数 x を dx だけ微小変化させた式は、これまで何度も登場した。

$$f(x+dx) = f(x) + \overset{\text{増えた分}}{f'(x)dx}$$

この式は、「 x を dx だけ微小変化させることで、関数 f の値は $f'(x)dx$ だけ増加した」と捉えることもできる。

言い換えれば、関数 f の微小変化量は $f'(x)dx$ だということだ。

変化量という観点で眺めるには、次のように移項した式がわかりやすいかもしれない。

$$\overset{\text{区間 } dx \text{ での変化}}{f(x+dx) - f(x)} = \overset{\text{変化量}}{f'(x)dx}$$

関数 f の微小変化量 $f'(x)dx$ を、 df と表すことにしよう。

合成関数の微分の関係式

今回はさらに、 $t = f(x)$ を関数 $g(t)$ に放り込むことを考える。

$g(t)$ についても、次のような微分の関係式が成り立つはずだ。

$$g(t+dt) = g(t) + g'(t)dt$$

合成関数 $g(f(x))$ を作るため、 $t = f$ (引数 x) を省略して書いた関数 $f(x)$ を代入する。

$$g(f + df) = g(f) + g'(f)df$$

f を $f(x)$ に、 df を $f'(x)dx$ に書き戻すと、

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

となり、左辺の $g()$ の中身 $f(x) + f'(x)dx$ は $f(x + dx)$ と書き換えられるので、次の式を得る。

$$g(f(x + dx)) = \overset{\text{元関数}}{g(f(x))} + \overset{\text{導関数}}{g'(f(x))f'(x)} dx$$

合成関数の微分（ニュートン記法による表現）

合成関数 $g(f(x))$ の微分は、次の式で表される。

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

連鎖律としての表現

ニュートン記法による表現はなかなか覚えづらい式に見えるが、ライプニッツ記法を使って書き直すと、実は単純な関係式になっている。

- $(g(f(x)))'$ は、 $g(f(x))$ を x で微分したもの： $\frac{d}{dx}g(f(x))$
- $f'(x)$ は、 $f(x)$ を x で微分したもの： $\frac{d}{dx}f(x)$
- $g'(f(x))$ は、 $g(t)$ を t で微分したもの $\frac{d}{dt}g(t)$ に、 $t = f(x)$ に代入したもの： $\frac{d}{df}g(f(x))$

として書き直すと、

$$\frac{d}{dx}g(f(x)) = \frac{d}{dx}f(x) \cdot \frac{d}{df}g(f(x))$$

さらに、引数を省略して書くと、

$$\frac{dg}{dx} = \frac{df}{dx} \cdot \frac{dg}{df}$$

これは、 df を約分できると考えたら、当たり前の式になっている。

$$\frac{dg}{dx} = \cancel{\frac{df}{dx}} \cdot \frac{dg}{\cancel{df}}$$

合成関数の微分（連鎖律：ライプニッツ記法による表現）

$y = f(x)$ 、 $z = g(y)$ という関係があるとき、次の式が成り立つ。

$$\frac{dz}{dx} = \frac{dz}{dy} \cdot \frac{dy}{dx}$$

これは、 x が微小変化すると y も微小変化し、さらに連鎖して z も微小変化するという関係から、連鎖律と呼ばれる。

1.1.10 逆関数の微分

関数 $y = f(x)$ の逆関数 $x = f^{-1}(y)$ の微分も、ライプニッツ記法で考えると、ごく当たり前の式として導出できる。

ネタバレすると、次の式がそのまま逆関数の微分を表すものになっている。

$$\frac{dx}{dy} = \frac{1}{\frac{dy}{dx}}$$

$\frac{dy}{dx}$ を $f'(x)$ と表記するなら、

$$\frac{dx}{dy} = \frac{1}{f'(x)}$$

である。この発想を納得するために、もう少し詳しく見ていこう。

* * *

$y = f(x)$ の導関数 $f'(x)$ は、ライプニッツ記法では $\frac{dy}{dx}$ と表記される。

$$\frac{dy}{dx} = f'(x)$$

ライプニッツ記法 $\frac{dy}{dx}$ には、「 y で表される関数を x で微分する」という意味がこめられている。ならば、逆関数 $x = f^{-1}(y)$ の導関数は、「 x で表される関数を y で微分する」という意味で、 $\frac{dx}{dy}$ と表記できる。

$$\frac{dx}{dy} = (f^{-1})'(y)$$

ここで、 $\frac{dy}{dx} = f'(x)$ という式から、次の等式も成り立つと考えられる。

$$\frac{dx}{dy} = \frac{1}{f'(x)}$$

これは逆関数の導関数になっているが、逆関数が y の関数なのだから、その導関数 $\frac{dx}{dy}$ も y の関数であってほしい。

そこで、 x を消すために $x = f^{-1}(y)$ を代入することで、逆関数の導関数を完成させる。

$$\frac{dx}{dy} = \frac{1}{f'(x)} \Big|_{x=f^{-1}(y)}$$

逆関数の微分

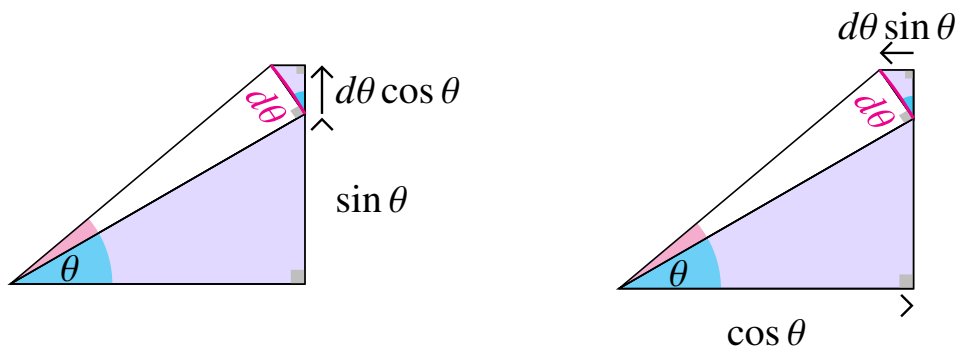
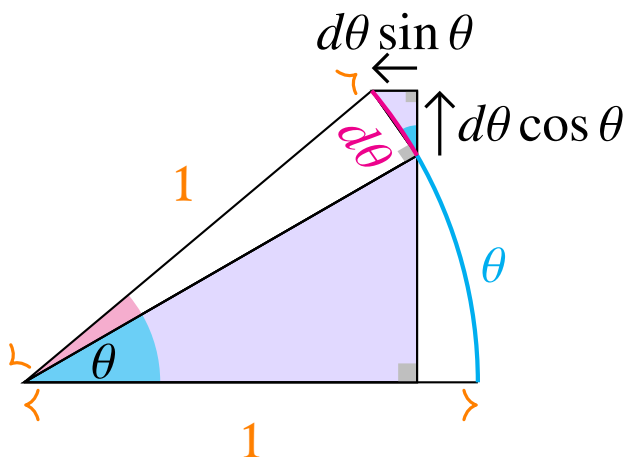
逆関数の導関数は、元の関数の導関数の逆数になる。

$$\frac{dx}{dy} = \frac{1}{f'(x)} \Big|_{x=f^{-1}(y)}$$

ここで、 $\Big|_{x=f^{-1}(y)}$ は、その直前の式を計算した後に、 $x = f^{-1}(y)$ を代入することを意味する。

1.1.11 三角関数の微分

角度 θ を $d\theta$ だけ微小変化させたときの、三角形の高さの変化が $\sin \theta$ の微小変化であり、底辺の長さの変化が $\cos \theta$ の微小変化である。



sin の微分

三角形の高さは、 $d\theta \cos \theta$ だけ増えているので、

$$\sin(\theta + d\theta) = \sin \theta + \cos \theta d\theta$$

sin 関数の微分

$$\frac{d}{d\theta} \sin \theta = \cos \theta$$

cos の微分

三角形の底辺の長さは、 $d\theta \sin \theta$ だけ減っているのを、

$$\cos(\theta + d\theta) = \cos \theta - \sin \theta d\theta$$

元の関数 導関数

$$\cos(\theta + d\theta) = \cos \theta + (-\sin \theta) d\theta$$

cos 関数の微分

$$\frac{d}{d\theta} \cos \theta = -\sin \theta$$

1.1.12 ネイピア数

指数関数を定義した際に、「どんな数も 0 乗したら 1 になる」と定義した。

つまり、指数関数 $y = a^x$ において、 $x = 0$ での関数の値は 1 である。

ここでさらに、 $x = 0$ でのグラフの傾きも 1 となるような a を探し、その値をネイピア数と呼ぶことにする。

ネイピア数（自然対数の底）

指数関数 $y = a^x$ において、 $x = 0$ での接線の傾きが 1 となるような底 a の値をネイピア数と呼び、 e と表す。

この定義では、「 $x = 0$ では関数の値も傾きも等しく 1 になる」という、 $x = 0$ での振る舞いにしか言及していない。

だが、実はネイピア数を底とする指数関数は、「微分しても変わらない（すべての x において、関数の値と傾きが一致する）」という性質を持つ。

1.1.13 ネイピア数を底とする指数関数の微分

指数関数 $y = e^x$ の微分は、導関数の定義から次のように計算できる。

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dx}e^x &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{e^{x+\Delta x} - e^x}{\Delta x} \\
 &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{e^x \cdot e^{\Delta x} - e^x}{\Delta x} \\
 &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{e^x \cdot (e^{\Delta x} - 1)}{\Delta x} \\
 &= e^x \cdot \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{e^{\Delta x} - 1}{\Delta x}
 \end{aligned}$$

ここで、 $\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{e^{\Delta x} - 1}{\Delta x}$ は x によらない定数であり、

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{e^{\Delta x} - 1}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{e^{0+\Delta x} - e^0}{\Delta x}$$

というように、これは $x = 0$ における傾き（導関数に $x = 0$ を代入したもの）を表している。

そもそも、ネイピア数 e の定義は「 $x = 0$ での e^x の傾きが 1」というものだったので、

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{e^{\Delta x} - 1}{\Delta x} = 1$$

となり、「 e^x は微分しても変わらない」という性質が導かれる。

$$\frac{d}{dx}e^x = e^x$$

ネイピア数を底とする指数関数の微分

ネイピア数を底とする指数関数は、微分しても変わらない関数である。

$$\frac{d}{dx}e^x = e^x$$

指数が定数倍されている場合

$y = e^{kx}$ のように、指数が定数倍（ k 倍）されている場合は、合成関数の微分の公式を使って計算できる。

$t = kx$ とおくと、

$$\begin{aligned}
 \frac{dy}{dx} &= \frac{dt}{dx} \cdot \frac{dy}{dt} \\
 &= \frac{d}{dx}(kx) \cdot \frac{d}{dt}(e^t) \\
 &= k \frac{dx}{dx} \cdot e^t \\
 &= ke^t \\
 &= ke^{kx}
 \end{aligned}$$

となり、 e^{kx} 自体は変わらず、指数の係数 k が e の肩から「降りてくる」形になる。

ネイピア数を底とする指数関数の微分（指数が定数倍されている場合）

k を定数とし、指数が k 倍されている場合は、微分すると全体が k 倍される。

$$\frac{d}{dx}e^{kx} = ke^{kx}$$

指数が関数の場合

指数が関数になっている場合 $y = e^{f(x)}$ の微分も、合成関数の微分を使って考えればよい。

$t = f(x)$ とおくと、

$$\begin{aligned}
 \frac{dy}{dx} &= \frac{dy}{dt} \cdot \frac{dt}{dx} \\
 &= \frac{d}{dt}e^t \cdot \frac{d}{dx}f(x) \\
 &= e^t \cdot f'(x) \\
 &= e^{f(x)} \cdot f'(x)
 \end{aligned}$$

ネイピア数を底とする指数関数の微分（指数が関数の場合）

$$\frac{d}{dx}e^{f(x)} = f'(x)e^{f(x)}$$

1.1.14 一般の指数関数の微分

指数関数の底の変換公式より、 a を底とする指数関数の微分は、ネイピア数 e を底とする指数関数の微分（指数が定数倍されている場合）に帰着できる。

REVIEW

指数関数の底の変換公式

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

指数関数の底の変換公式において、 $b = e$ の場合を考えると、

$$a^x = e^{(\log a)x}$$

となるので、指数が $\log a$ 倍された、 e を底とする指数関数の微分として考えればよい。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} a^x &= \frac{d}{dx} e^{(\log a)x} \\ &= (\log a) e^{(\log a)x} \\ &= (\log a) a^x \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \frac{d}{dx} e^{kx} = k e^{kx} \\ e^{(\log a)x} = a^x \end{array} \right\}$$

指数関数の微分

$$\frac{d}{dx} a^x = a^x (\log a)$$

1.1.15 対数関数の微分

自然対数の微分（底がネイピア数の対数の微分）

底がネイピア数である対数は、自然対数と呼ばれる。

自然対数 底がネイピア数 e である対数関数を、**自然対数** という。

$y = \log x$ は $x = e^y$ の逆関数であるから、 e^y の微分 e^y の逆数を考えればよい。

$$\frac{d}{dx} \log x = \frac{1}{e^y} = \frac{1}{x}$$

自然対数の微分

$$\frac{d}{dx} \log x = \frac{1}{x}$$

1.2 1変数関数の積分

積分とは、「部分を積み重ねる」演算である。

微小部分を調べる微分と、微小部分を積み重ねる積分は、互いに逆の操作になっている。

1.2.1 区分求積法：面積の再定義

長方形の面積は、なぜ「縦×横」で求められるのだろうか？

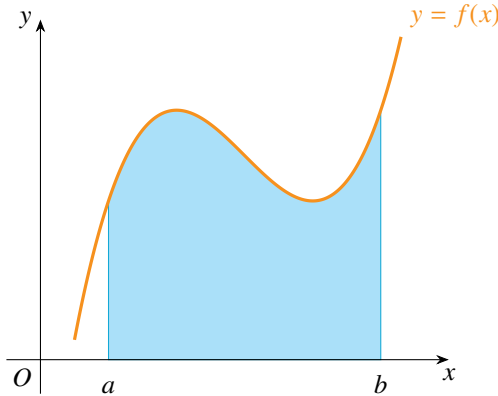
そこには、長方形の横幅分の長さを持つ線分を、長方形の高さに達するまで積み重ねるという発想がある。

面積の計算を「線を積み重ねる」という発想で捉えると、あらゆる形状の面積を考えることができる。

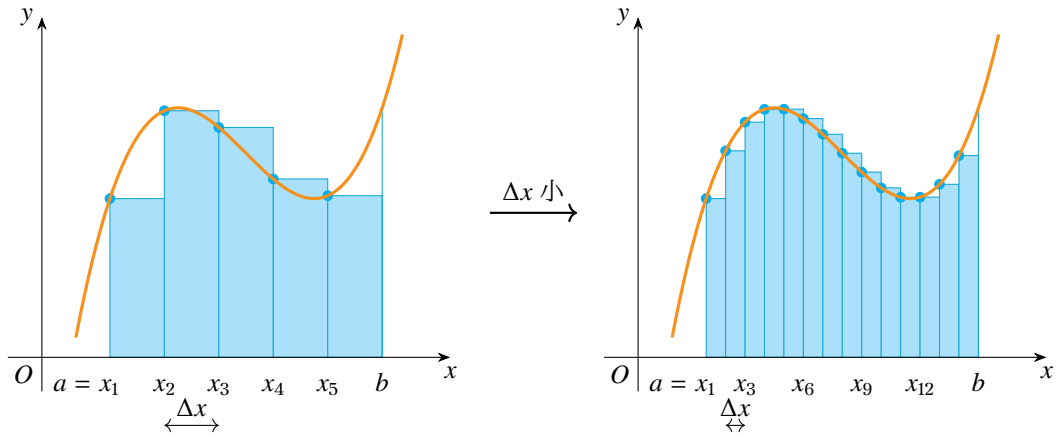
長方形では、積み重ねる線の長さは一定だが、他の形状では、積み重ねる線の長さが変化する。積み重ねるべき線の長さを、関数で表すことができれば…

* * *

関数 $y = f(x)$ が与えられたとき、高さ $f(x)$ の線分を a から b までの区間で積み重ねることで、 x 軸とグラフに挟まれた部分の面積を求めることを考える。



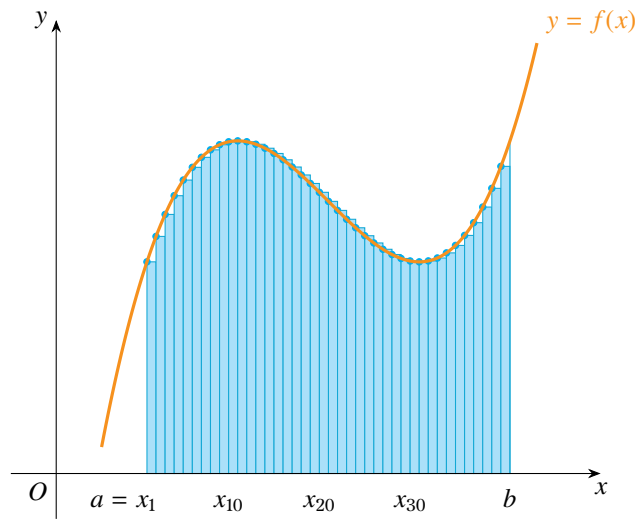
この考え方は、面積を求めたい部分を長方形に分割し、長方形の幅を限りなく 0 に近づけるとい
う操作で表現できる。



$a \leq x \leq b$ の区間を n 等分して、 x_1, x_2, \dots, x_n とする。
分割された各長方形は、幅が Δx で、高さが $f(x)$ であるので、各長方形の面積は次のように表せる。

$$\Delta S = f(x) \cdot \Delta x$$

どんどん Δx を小さくしていくと、細かい長方形分割で、面積を求めたい図形を近似できる。



つまり、求めたい面積は、分割した長方形の面積をすべて足し合わせることで近似できる。

$$S \approx \sum_{i=1}^n f(x_i) \cdot \Delta x$$

$\Delta x \rightarrow 0$ の果てでは、幅を持たなくなった長方形は線分とみなせるので、もはや近似ですらなくな
るだろう。

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f(x_i) \cdot \Delta x$$

このような考え方は、区分求積法と呼ばれる。

1.2.2 定積分：面積を求める積分

ここで、区間 $a \leq x \leq b$ における関数 $y = f(x)$ と x 軸の間の面積 S を求める式を、次のように表記する。

$$S = \int_a^b f(x) dx$$

Σ は離散的な和を表す記号であり、例えば $\sum_{i=0}^n$ であれば、 i を 1 ずつ増やして n に達するまで足し合わせることを意味する。

一方、ここで新たに導入した \int は連続的な和を表す記号であり、微小変化を繰り返しながら足し合わせることを意味する。

Σ は間隔を取って足し合わせるのに対し、 \int は間隔を限りなく小さくして足し合わせる。

足し合わせる間隔を限りなく小さくするという操作は、極限を取る操作に相当するので、 Σ の極限を取ったもの $\lim \Sigma$ をまとめて \int という記号で表記したと捉えることができる。

さらに、 $\lim_{\Delta x \rightarrow 0}$ とした果ての Δx は、微小変化を意味する dx と書き換えられている。

定積分

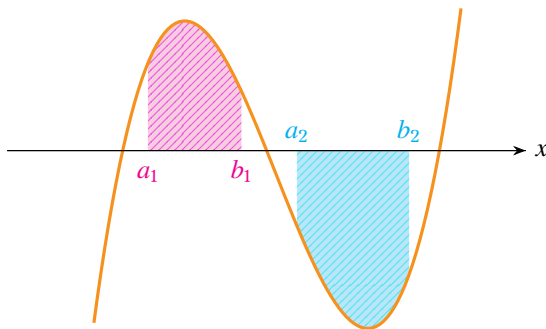
$a \leq x \leq b$ の区間内における関数 $f(x)$ のグラフと x 軸の間の領域の符号付き面積を求める

演算を定積分と定義し、次のように表記する。

$$\int_a^b f(x) dx$$

このとき、 $f(x)$ を被積分関数と呼ぶ。

$f(x)$ の値が負になる区間では、定積分の値も負になるため、定積分は符号付き面積を表す。



1.2.3 微小範囲の定積分から微分へ

定積分 $\int_a^b f(x)dx$ は、積分区間の取り方 (a や b の値) を変えると、当然異なる計算結果になる。

ここで、下端 a は固定し、上端 b を変化させて積分区間を広げていくことを考えよう。

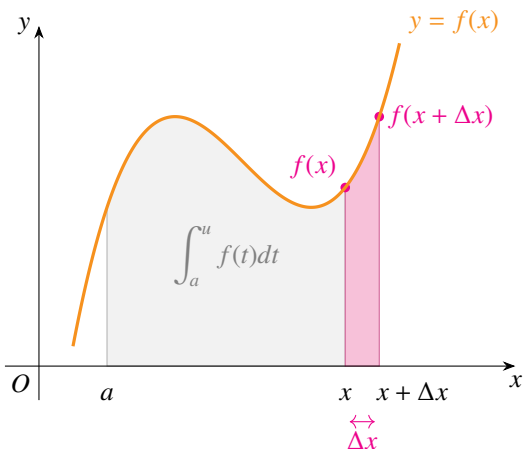
上端が変化することを強調するため、上端は x と表記することにする。

このとき、定積分 $\int_a^x f(t)dt$ は、上端 x の関数として捉えられる。

$$S(x) = \int_a^x f(t)dt$$



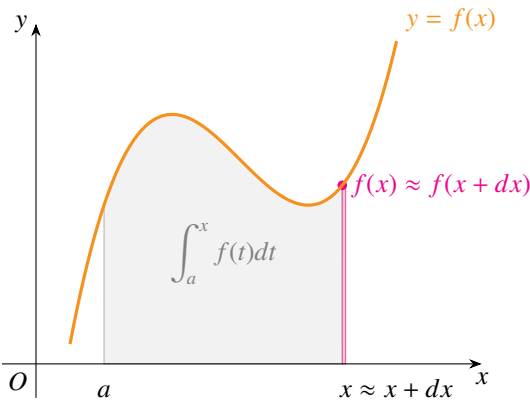
\int の中で使っている変数 t は、積分区間の下端から上端まで動く変数であり、どんな文字を使ってもよい。「 t が下端 a から上端 x まで動く」なら違和感なく聞こえるが、「 x が下端 a から上端 x まで動く」というのはややこしいので、上端 x と区別するために t を使うことにした。



x を Δx だけ増加させたときに増える面積は、

$$S(x + \Delta x) - S(x) = \int_x^{x+\Delta x} f(t)dt$$

となるが、ここでさらに Δx を小さくしていくと…
増えた領域は、幅 dx 、高さ $f(x)$ の長方形とみなせるので、その面積は $f(x)dx$ となる。



よって、 $\Delta x \rightarrow 0$ としたときには、

$$S(x + dx) - S(x) = f(x)du$$

という式が成り立ち、これは実は見慣れた微分の関係式と同じ形をしている。

元の関数 導関数

$$S(x + dx) = S(x) + f(x) du$$

この式は、定積分したもの $F(x)$ を x で微分すると、積分前の関数 $f(x)$ に戻るとことを示している。

このような「積分したものを微分すると、元の関数に戻る」という事実は、微積分学の基本定理として知られている。

微積分学の基本定理 積分の逆の演算は微分である。

1.2.4 不定積分：原始関数を求める積分

定積分の定義は面積から始まったが、定積分という操作で「微分したら元の関数に戻る」ような関数を作ることでもできた。

ここで、「微分したら元の関数に戻る」関数を次のように定義する。

原始関数

微分することで元の関数 $f(x)$ が得られる関数を、 $f(x)$ の 原始関数 と呼び、 $F(x)$ と表す。

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

「微分したら元の関数に戻る」関数の1つが、前節で調べた $S(x) = \int_a^x f(t)dt$ であったが、実はこのような関数は他にも存在する。

例えば、定数を微分すると 0 になるため、 $S(x)$ に任意の定数 C を加えた関数 $S(x) + C$ を作っても、その微分結果は変わらず元の関数になる。

このことは、「原始関数には定数 C 分の不定性がある」などと表現されることがある。

「微分したら元の関数に戻る」関数を求める演算、すなわち「微分の逆演算」として捉えた積分を新たに定義してみよう。

不定積分

関数 $f(x)$ から原始関数 $F(x)$ を求める演算を、 $f(x)$ の 不定積分 と呼び、次のように表す。

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

ここで、 C は 積分定数 と呼ばれる任意の定数である。

1.2.5 原始関数による定積分の表現

少し前に、定積分 $\int_a^x f(t)dt$ を上端 x の関数 $S(x)$ とみて、 x を微小変化させることで、 $S(u)$ が $f(u)$ の原始関数である ($S(u)$ を u で微分したら $f(u)$ になる) ことを確かめた。

REVIEW

区間 Δx での面積の増分を考え、

$$S(x + \Delta x) - S(x) = \int_x^{x+\Delta x} f(t)dt$$

$\Delta x \rightarrow 0$ とすれば、次のような微分の関係式が得られる。

$$S(x + dx) = \overset{\text{元の関数}}{S(x)} + \overset{\text{導関数}}{f(x)} dx$$

さらに前節では、「微分したら元に戻る」原始関数は1つだけではなく、任意の定数 C を用いた $F(x) + C$ も、 $f(x)$ の原始関数であることを述べた。

そこで、 $f(x)$ の任意の原始関数を $F(x)$ とおくことにする。

原始関数は任意の定数 C 分だけ異なるので、 $f(x)$ の原始関数の1つである $S(x)$ は、 $f(x)$ の他の原始関数 $F(x)$ を C 分ずらしたものになるはずである。

$$S(x) = F(x) + C$$

ここで、 $S(x) = \int_a^x f(t)dt$ に、 $x = a$ を代入すると、下端と上端が一致する領域の面積（定積分）は明らかに0なので、

$$S(a) = \int_a^a f(t)dt = 0$$

なんとここから、 C を求めることができる。

$$S(a) = F(a) + C = 0 \text{ より、}$$

$$C = -F(a)$$

この C を用いて、 $S(x)$ を次のように表現できる。

$$S(x) = F(x) - F(a)$$

$x = b$ を代入することで、積分区間の上端を b に戻した定積分を考えると、

$$S(b) = F(b) - F(a)$$

$$S(b) = \int_a^b f(x)dx$$

という、 $S(b)$ について 2 通りの表現が得られる。



上端を表す x という変数が現れなくなったので、 \int の中で使っていた変数 t はしれっと x に戻している。 \int 中の x は「下端 a から上端 b まで動く」という意味しか持っていないので、何の文字を使っても意味は変わらない。

得られた 2 通りの表現式を組み合わせることで、次のような関係が成り立つ。

$$\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a)$$

原始関数による定積分の表現

関数 $f(x)$ の原始関数が $F(x)$ であれば、定積分は次のように計算できる。

$$\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a)$$

ここで現れる $F(b) - F(a)$ という量は、次の記号で表される。

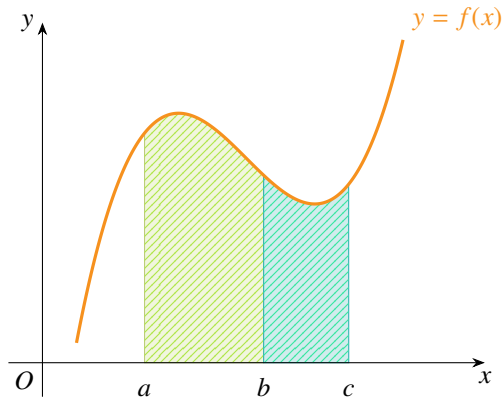
$$\left[F(x) \right]_a^b = F(b) - F(a)$$

1.2.6 定積分の性質

面積としての理解だけではうまく想像できない性質も、原始関数との関係を使うことで数式で確かめられるようになる。

積分区間の結合

2 つの定積分があり、それらの積分区間が連続していれば、1 つの定積分としてまとめて計算できる。



積分区間が連続する定積分の和

$$\int_a^b f(x)dx + \int_b^c f(x)dx = \int_a^c f(x)dx$$

面積として考えれば明らかな性質だが、原始関数を使って証明することもできる。

$f(x)$ の原始関数を $F(x)$ とすると、

$$\begin{aligned} \int_a^b f(x)dx + \int_b^c f(x)dx &= F(b) - F(a) + F(c) - F(b) \\ &= F(c) - F(a) \\ &= \int_a^c f(x)dx \end{aligned}$$

として、式が成立することがわかる。

積分区間の反転

積分区間の上限と下限を入れ替わると、符号が変わる。

定積分の積分区間の反転

$$\int_a^b f(x)dx = - \int_b^a f(x)dx$$

これは、積分区間が連続する定積分の和の性質における、 $c = a$ の場合の式である。

$$\begin{aligned}\int_a^b f(x)dx + \int_b^a f(x)dx &= \int_a^a f(x)dx \\ &= 0 \\ \int_a^b f(x)dx &= -\int_b^a f(x)dx\end{aligned}$$

定積分の線形性

微分や Σ 記号などと同様に、定積分も線形性を持つ。

定積分の線形性

$$\int_a^b \{\alpha f(x) + \beta g(x)\} dx = \alpha \int_a^b f(x)dx + \beta \int_a^b g(x)dx$$

この性質は、微分の線形性から導かれる。

$f(x)$ の原始関数を $F(x)$ 、 $g(x)$ の原始関数を $G(x)$ とすると、微分の線形性より、

$$\begin{aligned}\frac{d}{dx} \{\alpha F(x) + \beta G(x)\} &= \alpha \frac{d}{dx} F(x) + \beta \frac{d}{dx} G(x) \\ &= \alpha f(x) + \beta g(x)\end{aligned}$$

となるから、 $\alpha f(x) + \beta g(x)$ の原始関数は $\alpha F(x) + \beta G(x)$ である。

よって、定積分を原始関数を使って書き表すと、

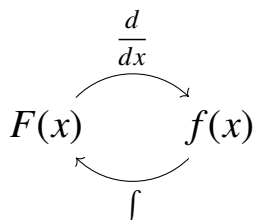
$$\begin{aligned}\int_a^b \{\alpha f(x) + \beta g(x)\} dx &= \alpha F(b) - \alpha F(a) + \beta G(b) - \beta G(a) \\ &= \alpha \{F(b) - F(a)\} + \beta \{G(b) - G(a)\} \\ &= \alpha \int_a^b f(x)dx + \beta \int_a^b g(x)dx\end{aligned}$$

となり、原始関数を使うことで、微分の線形性から定積分の線形性につながる事がわかる。

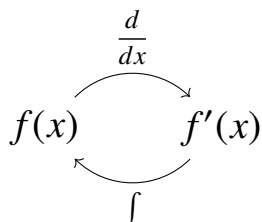
1.2.7 不定積分の性質

原始関数は、微分によって元の関数に戻る関数だった。

そして、元の関数から原始関数を求める演算が不定積分である。



原始関数という言葉にとらわれないように表現すると、結局は次のような関係が成り立っている。



不定積分と微分は逆の演算

関数を微分すると導関数になり、導関数を不定積分すると元の関数に戻る。

このような関係によって、微分が持つ性質から、不定積分の性質を導くことができる。

不定積分の線形性

微分の線形性から、不定積分の線形性も成り立つ。

REVIEW

微分の線形性

$$(\alpha F(x) + \beta G(x))' = \alpha F'(x) + \beta G'(x)$$

微分の線形性の式の両辺を不定積分すると、左辺は微分する前の関数 $\alpha F(x) + \beta G(x)$ に戻るのを、

$$\begin{aligned} \int (\alpha F(x) + \beta G(x))' dx &= \int \{\alpha F'(x) + \beta G'(x)\} dx \\ \alpha F(x) + \beta G(x) &= \int \{\alpha F'(x) + \beta G'(x)\} dx \end{aligned}$$

ここで、導関数を不定積分すると元の関数に戻ることから、

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

$$G(x) = \int G'(x)dx$$

と置き換えることができる。

これらを使って左辺を書き換えると、

$$\alpha \int F'(x)dx + \beta \int G'(x)dx = \int \{\alpha F'(x) + \beta G'(x)\} dx$$

$F(x)$ は $f(x)$ の原始関数、 $G(x)$ は $g(x)$ の原始関数であるとする、微分したらそれぞれ元に戻る、ので、次のように書き表せる。

$$\alpha \int f(x)dx + \beta \int g(x)dx = \int \{\alpha f(x) + \beta g(x)\} dx$$

不定積分の線形性

$$\int \{\alpha f(x) + \beta g(x)\} dx = \alpha \int f(x)dx + \beta \int g(x)dx$$