

今後の授業予定

- 6/27(月) (今日)
- 7/4(月)
- ◇ 7/9(土) 2 限に補講 (質問会) の予定
- 7/11(月) は見直し水曜日で本授業なし
- 7/12(火) (補講日) 3 限に補講
教室：3-221 教室 (ここ)
(同日 2 限には「基礎物理学」の補講予定)

- 7/18(月) 期末試験 (多分)

本講義後半の主題は、

積分

である

高校で習った積分

- 逆微分としての「原始関数」
 $f(x) = F'(x)$ となる F を求める
- 原始関数の区間両端での値の差としての
「定積分」 $\int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a)$
- 定積分は実は「面積」を表す

積分・微分の発見

歴史的には、実は順番が逆で、
積分の起源の方が微分よりも遥かに早い

- 「積分」：面積を求める手法の探求
(エジプト・ギリシャ：2000年以上前)
- 「微分」：物体の運動の数学的探求
(Newton, Leibniz：17世紀)

それぞれ別のものとして発見されたものが
実は密接に関連していた!!
… 「**微分積分学の基本定理**」

積分法

- 統一的な求積法としての「定積分」
- 積分の上端を動かして、
積分値を上端の関数とみる

$$F(x) = \int_a^x f(t) dt : \text{「定積分関数」}$$

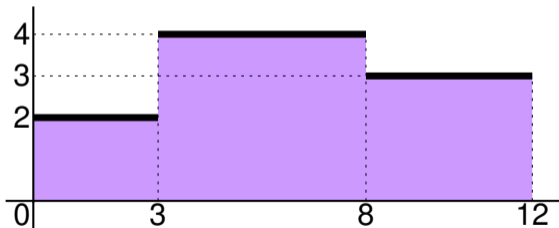
- 実は定積分関数を微分すると元の関数

$$\frac{d}{dx} \int_a^x f(t) dt = f(x)$$

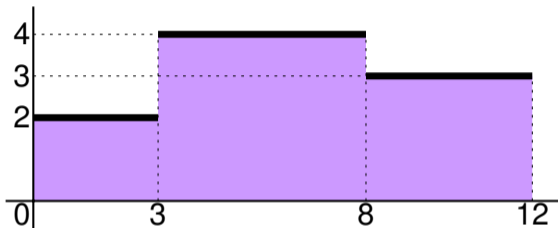
「微分積分学の基本定理」

積分の定式化

$$I = \int_0^{12} f(x) dx, \quad f(x) = \begin{cases} 2 & (0 \leq x < 3) \\ 4 & (3 \leq x < 8) \\ 3 & (8 \leq x \leq 12) \end{cases}$$



積分の定式化



$$\begin{aligned} I &= \int_0^{12} f(x) dx \\ &= 2 \times (3 - 0) + 4 \times (8 - 3) + 3 \times (12 - 8). \end{aligned}$$

「積分」は「積和」である

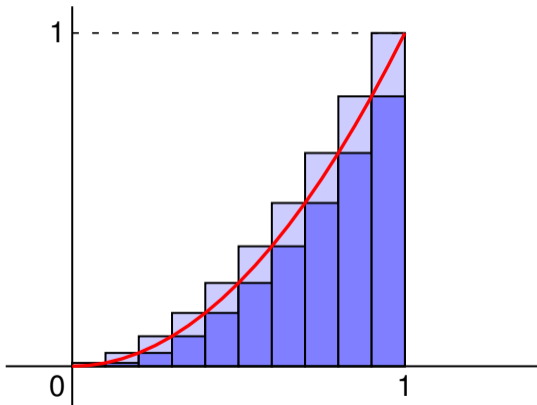
積分の定式化

では、

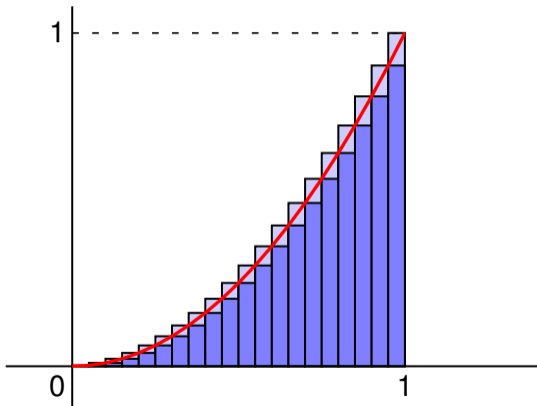
$$I = \int_0^1 f(x) dx, \quad f(x) = x^2$$

はどう考えるか？

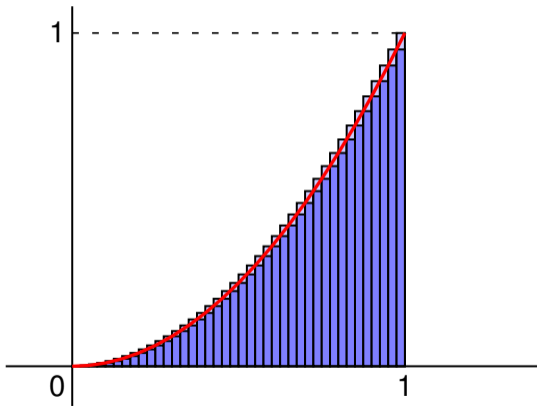
$$I = \int_0^1 f(x) dx, \quad f(x) = x^2$$



$$I = \int_0^1 f(x) dx, \quad f(x) = x^2$$



$$I = \int_0^1 f(x) dx, \quad f(x) = x^2$$



演習問題

$f(x) = x^2$ の $[0, a]$ での定積分

$$I = \int_0^a f(x) dx$$

を計算したい。

分割 $\Delta_n : 0 = x_0 < x_1 < \cdots < x_n = a$ を
 n 等分な分割 (即ち $x_i = \frac{ia}{n}$) とする。

(1) 各小区間 $[x_{i-1}, x_i]$ での
 $f(x)$ の下限 m_i および上限 M_i は?

$$(2) \quad s_{\Delta_n} = \sum_{i=1}^n m_i(x_i - x_{i-1}) \quad \text{及び}$$

$$S_{\Delta_n} = \sum_{i=1}^n M_i(x_i - x_{i-1}) \quad \text{を計算せよ。}$$

- (3) 任意の n に対して $s_{\Delta_n} \leq I \leq S_{\Delta_n}$ であることから、 $I = \int_0^a f(x) dx$ を求めよ。
($\lim_{n \rightarrow \infty} s_{\Delta_n}$, $\lim_{n \rightarrow \infty} S_{\Delta_n}$ が、それぞれ存在して等しくなることを確かめよ。)

積分の定式化

どんなに細かく切っても、
その小区間内で定数になる訳ではないが、
上下から見積もることは出来るだろう

$$\text{(下からの見積)} \leq \text{(面積)} \leq \text{(上からの見積)}$$

もしあれば

細かく切れば、
上下からの見積もりが同じ値に近付くなら、
これを「面積 (積分)」と呼んで良いだろう

積分の定式化

どんなに細かく切っても、
その小区間内で定数になる訳ではないが、
上下から見積もることは出来るだろう

$$\text{(下からの見積)} \leq \text{(面積)} \leq \text{(上からの見積)}$$

もしあれば

細かく切れば、
上下からの見積もりが同じ値に近付くなら、
これを「面積 (積分)」と呼んで良いだろう

積分の定式化

細かく切る方法は n 等分が簡単そうだが、
これだけを考えるのでは、話が旨く進まない

例えば、基本的な等式

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

を示そうとすると...

積分の定式化

細かく切る方法は n 等分が簡単そうだが、
これだけを考えるのでは、話が旨く進まない

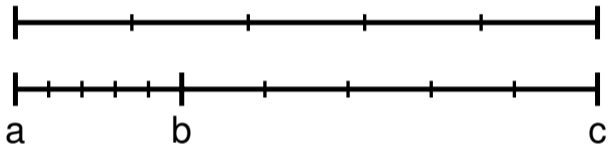
例えば、基本的な等式

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

を示そうとすると...

積分の定式化

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

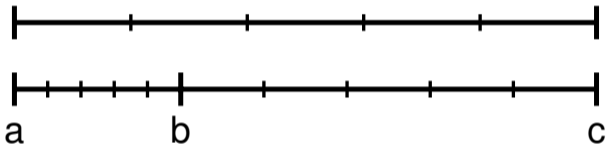


n 等分点が食い違って比較し難い

→ 予め「全ての分割」を考慮に入れて定義せよ!!

積分の定式化

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



n 等分点が食い違って比較し難い

→ 予め「全ての分割」を考慮に入れて定義せよ!!

余談 …… 現代数学の手法の特徴 (の一つ) :

「苦勞を先に買っておく」

定式化の段階で先に苦勞をしておくと、
後で証明が楽になる

人間の都合でなく、
数学のものたちの気持ちに、
我々の気持ちを合わせる

その代わりに、
人間には解り難くなることもあるけれど

余談 …… 現代数学の手法の特徴 (の一つ) :

「苦勞を先に買っておく」

定式化の段階で先に苦勞をしておくと、
後で証明が楽になる

人間の都合でなく、
数学のものたちの気持ちに、
我々の気持ちを合わせる

その代わり、
人間には解り難くなることもあるけれど

余談 …… 現代数学の手法の特徴 (の一つ) :

「苦勞を先に買っておく」

定式化の段階で先に苦勞をしておくと、
後で証明が楽になる

人間の都合でなく、
数学のものたちの気持ちに、
我々の気持ちを合わせる

その代わり、
人間には解り難くなることもあるけれど

では、少々苦勞はあるが、

「積分」の定義

をきちんとしましょう

積分の定義

仮定：

- 積分区間 $I = [a, b]$: 有界閉区間
- 被積分関数 $f : I$ で 有界
即ち、

$$\exists m, M : \forall x \in I : m \leq f(x) \leq M$$

「積分」の定義の方針

- 区間を分割せよ
- 各区間で上下から見積もれ
- それを足し上げよ
- 以上を全ての分割について考えよ
- 上下からの見積が一致するか？

「積分」の定義の方針

- 区間を分割せよ
- 各区間で上下から見積もれ
- それを足し上げよ
- 以上を全ての分割について考えよ
- 上下からの見積が一致するか？

「積分」の定義の方針

- 区間を分割せよ
- 各区間で上下から見積もれ
- それを足し上げよ
- 以上を全ての分割について考えよ
- 上下からの見積が一致するか？

「積分」の定義の方針

- 区間を分割せよ
- 各区間で上下から見積もれ
- それを足し上げよ
- 以上を全ての分割について考えよ
- 上下からの見積が一致するか？

「積分」の定義の方針

- 区間を分割せよ
- 各区間で上下から見積もれ
- それを足し上げよ
- 以上を全ての分割について考えよ
- 上下からの見積が一致するか？

積分の定義

$\Delta : a = x_0 < x_1 < x_2 < \cdots < x_n = b$: 区間の分割

$I_i := [x_{i-1}, x_i]$: 各小区間 ($i = 1, \dots, n$)

$\delta(\Delta) := \max_i (x_i - x_{i-1})$: 分割の最大幅

$m_i := \inf_{x \in I_i} f(x) = \inf \{f(x) \mid x \in I_i\}$

$M_i := \sup_{x \in I_i} f(x) = \sup \{f(x) \mid x \in I_i\}$

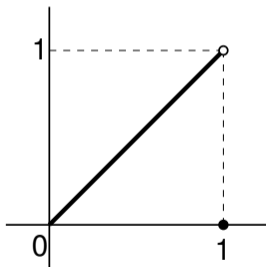
: 区間 I_i に於ける f の下限・上限

上限・下限について(補足)

例: $I = [0, 1]$

$$f(x) = \begin{cases} x & (0 \leq x < 1) \\ 0 & (x = 1) \end{cases}$$

関数 $f(x)$ ($x \in I$) に
最大値はないが、
どう見ても 1 が
“最大値みたいな値”
である



上限・下限について (補足)

1 は最小の上界 :

- 1 が上界である : $\forall x \in I : f(x) \leq 1$
- 1 より少しでも小さくしたら上界でない :

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists x \in I : f(x) > 1 - \varepsilon$$

どんな (小さな) 正の数 ε についても

或る (うまい / まずい) $x \in I$ があって

$f(x)$ が $1 - \varepsilon$ を超える

このことを、

1 が f の I における **上限 (supremum)** である

と言い、 $\sup_{x \in I} f(x) = 1$ と書く

積分の定義

$$s_{\Delta} := \sum_{i=1}^n m_i(x_i - x_{i-1})$$

$$S_{\Delta} := \sum_{i=1}^n M_i(x_i - x_{i-1})$$

: 分割 Δ に関する上下からの見積もり

→

$$s_{\Delta} \leq \text{“面積”} \leq S_{\Delta}$$

分割 Δ を色々考えて、見積もりを精密にせよ。

積分の定義

全ての分割 Δ を考えて、

下からの見積もりをどこまで上げられるか

$$\longrightarrow s := \sup_{\Delta} s_{\Delta} : \text{下積分}$$

上からの見積もりをどこまで下げられるか

$$\longrightarrow S := \inf_{\Delta} S_{\Delta} : \text{上積分}$$

$$s \leq \text{“面積”} \leq S$$

一般に $s \leq S$ であるが、 $s = S$ とは限らない !!

積分の定義

全ての分割 Δ を考えて、

下からの見積もりをどこまで上げられるか

$$\longrightarrow s := \sup_{\Delta} s_{\Delta} : \text{下積分}$$

上からの見積もりをどこまで下げられるか

$$\longrightarrow S := \inf_{\Delta} S_{\Delta} : \text{上積分}$$

$$s \leq \text{“面積”} \leq S$$

一般に $s \leq S$ であるが、 $s = S$ とは限らない !!

$s \leq S$ となる例

$$I = [0, 1], \quad f(x) = \begin{cases} 1 & (x : \text{有理数}) \\ 0 & (x : \text{無理数}) \end{cases}$$

任意の分割 Δ に対し、

$$s_{\Delta} = 0, \quad S_{\Delta} = 1$$

従って、

$$s = 0 \leq S = 1$$

積分の定義

$s = S$ のとき、これが “面積” と呼ぶべき唯一の値
この時、

f は I で積分可能 (**integrable**)

と言い、

この値を

$$\int_a^b f(x) dx \quad \left(\text{または} \int_I f(x) dx \right)$$

と書いて、

f の I に於ける**定積分** (**definite integral**)

と呼ぶ

例 :

$$I = [0, 1], \quad f(x) = \begin{cases} 1 & (x = \frac{1}{2}) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases}$$

任意の分割 Δ に対し、 $s_{\Delta} = 0$

一方、 $\forall \varepsilon > 0$ に対し、 $S_{\Delta} \leq \varepsilon$ なる分割 Δ が存在

従って、

$$s = S = 0 = \int_0^1 f(x) dx$$

例：

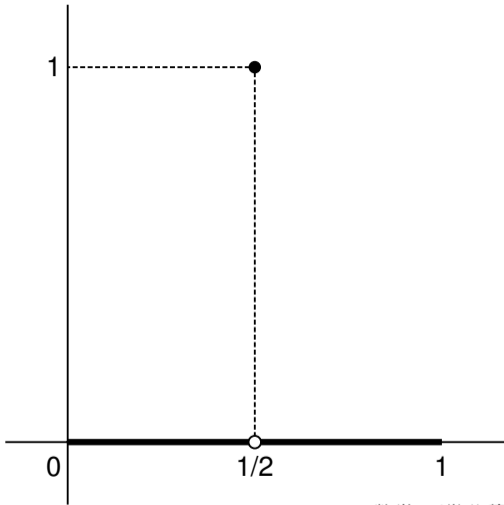
$$I = [0, 1], \quad f(x) = \begin{cases} 1 & (x = \frac{1}{2}) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases}$$

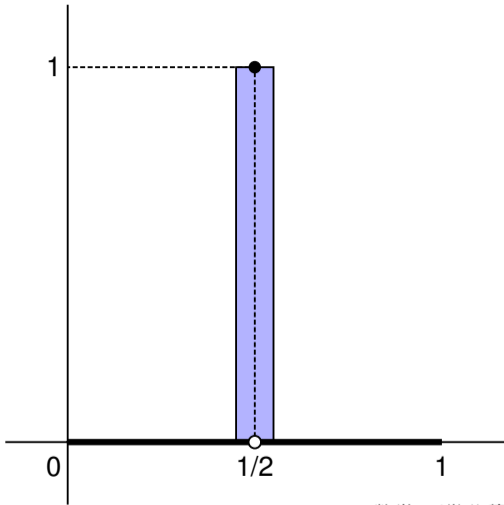
任意の分割 Δ に対し、 $s_{\Delta} = 0$

一方、 $\forall \varepsilon > 0$ に対し、 $S_{\Delta} \leq \varepsilon$ なる分割 Δ が存在

従って、

$$s = S = 0 = \int_0^1 f(x) dx$$





任意の分割を考えたので、
次のような事実の証明が簡明になった

$a < c < b$ とし、

区間 $[a, b]$ に於ける下積分を $s(a, b)$ と書くと、

$$s(a, b) = s(a, c) + s(c, b)$$

同様に、

$$S(a, b) = S(a, c) + S(c, b)$$

任意の分割を考えたので、
次のような事実の証明が簡明になった

$a < c < b$ とし、

区間 $[a, b]$ に於ける下積分を $s(a, b)$ と書くと、

$$s(a, b) = s(a, c) + s(c, b)$$

同様に、

$$S(a, b) = S(a, c) + S(c, b)$$

$$s(a, b) = s(a, c) + s(c, b)$$

$$S(a, b) = S(a, c) + S(c, b)$$

従って、

f が 区間 $[a, c], [c, b]$ で積分可能
 $\implies f$ は区間 $[a, b]$ でも積分可能で、

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

ところで、積分を定義するのに
全ての分割を考えることにしたということは、

- (前回の演習のように)
 n 等分だけを考えたのでは不十分なのか？
- 実際に計算することは不可能なのではないか？

→ 実は大丈夫で、次の定理が成り立つ

ところで、積分を定義するのに
全ての分割を考えることにしたということは、

- (前回の演習のように)
 n 等分だけを考えたのでは不十分なのか？

- 実際に計算することは不可能なのではないか？

→ 実は大丈夫で、次の定理が成り立つ

ところで、積分を定義するのに
全ての分割を考えることにしたということは、

- (前回の演習のように)
 n 等分だけを考えたのでは不十分なのか？

- 実際に計算することは不可能なのではないか？

→ 実は大丈夫で、次の定理が成り立つ

Darboux の定理:

$(\Delta_n)_{n=1}^{\infty}$: 分割の列に対し、

$$\delta(\Delta_n) \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty)$$



$$\exists \lim_{n \rightarrow \infty} s_{\Delta_n} = s, \quad \exists \lim_{n \rightarrow \infty} S_{\Delta_n} = S$$

(証明略)

つまり、実際の計算は、

$\delta(\Delta_n) \rightarrow 0$ となるような分割の列 $(\Delta_n)_{n=1}^{\infty}$
(で計算し易いもの) を一揃い考えれば充分

Darboux の定理:

$(\Delta_n)_{n=1}^{\infty}$: 分割の列に対し、

$$\delta(\Delta_n) \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty)$$



$$\exists \lim_{n \rightarrow \infty} s_{\Delta_n} = s, \quad \exists \lim_{n \rightarrow \infty} S_{\Delta_n} = S$$

(証明略)

つまり、実際の計算は、

$\delta(\Delta_n) \rightarrow 0$ となるような分割の列 $(\Delta_n)_{n=1}^{\infty}$
(で計算し易いもの) を一揃い考えれば充分

定積分の値の見当がついているときには、
次を利用することも出来る

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



任意の $\varepsilon > 0$ に対し、
[a, b] の或る分割 $\Delta = \Delta_\varepsilon$ が存在して、
 $I - \varepsilon < s_\Delta, \quad S_\Delta < I + \varepsilon$

さて、先の例のように、
積分にとって、不連続性は致命的ではない

逆に言うと、連続だからと言って、
積分可能かどうかは自明ではない

しかし、幸いな (偉大な) ことに、実は、

閉区間で連続な関数は積分可能である!!

さて、先の例のように、
積分にとって、不連続性は致命的ではない

逆に言うと、連続だからと言って、
積分可能かどうかは自明ではない

しかし、幸いな (偉大な) ことに、実は、

閉区間で連続な関数は積分可能である!!

さて、先の例のように、
積分にとって、不連続性は致命的ではない

逆に言うと、連続だからと言って、
積分可能かどうかは自明ではない

しかし、幸いな (偉大な) ことに、実は、

閉区間で連続な関数は積分可能である!!

定理 (連続関数の積分可能性) :

f : 閉区間 $I = [a, b]$ で連続
(このとき自動的に有界)



f : I に於いて積分可能

$s(x, y)$: 区間 $[x, y]$ に於ける下積分

特に、 $s(x) := s(a, x)$ と書くとき

主張 :

$s(x) : [a, b]$ で微分可能で、
 $s'(x) = f(x)$

即ち、

$\forall \varepsilon > 0 : \exists \delta > 0 : \forall h :$

$$0 < |h| < \delta \implies \left| \frac{s(x+h) - s(x)}{h} - f(x) \right| < \varepsilon$$

$s(x, y)$: 区間 $[x, y]$ に於ける下積分

特に、 $s(x) := s(a, x)$ と書くとき

主張 :

$s(x) : [a, b]$ で微分可能で、
 $s'(x) = f(x)$

即ち、

$\forall \varepsilon > 0 : \exists \delta > 0 : \forall h :$

$$0 < |h| < \delta \implies \left| \frac{s(x+h) - s(x)}{h} - f(x) \right| < \varepsilon$$

定理 :

f : 閉区間 $I = [a, b]$ で連続
(このとき自動的に有界)



f : I に於いて積分可能

更に、今の証明を振り返ると、

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

(上端 x の関数で、定積分関数と呼ぶ)
が f の原始関数になっていることが判る

定理 :

f : 閉区間 $I = [a, b]$ で連続
(このとき自動的に有界)



f : I に於いて積分可能

更に、今の証明を振り返ると、

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

(上端 x の関数で、**定積分関数**と呼ぶ)
が f の**原始関数**になっていることが判る

微分積分学の基本定理

f : 閉区間 $I = [a, b]$ で連続のとき

- $\frac{d}{dx} \int_a^x f(t) dt = f(x)$

即ち、 $F(x) = \int_a^x f(t) dt$ とおくと、

F は f の原始関数 (の一つ)

- F を f の原始関数 (の一つ) とすると、

$$\int_a^b f(t) dt = F(b) - F(a)$$