

# sp-13. 数値微分と数値積分

(Scheme プログラミング)

URL: <https://www.kkaneko.jp/cc/scheme/index.html>

金子邦彦



# アウトライン



13-1 数値微分と数値積分

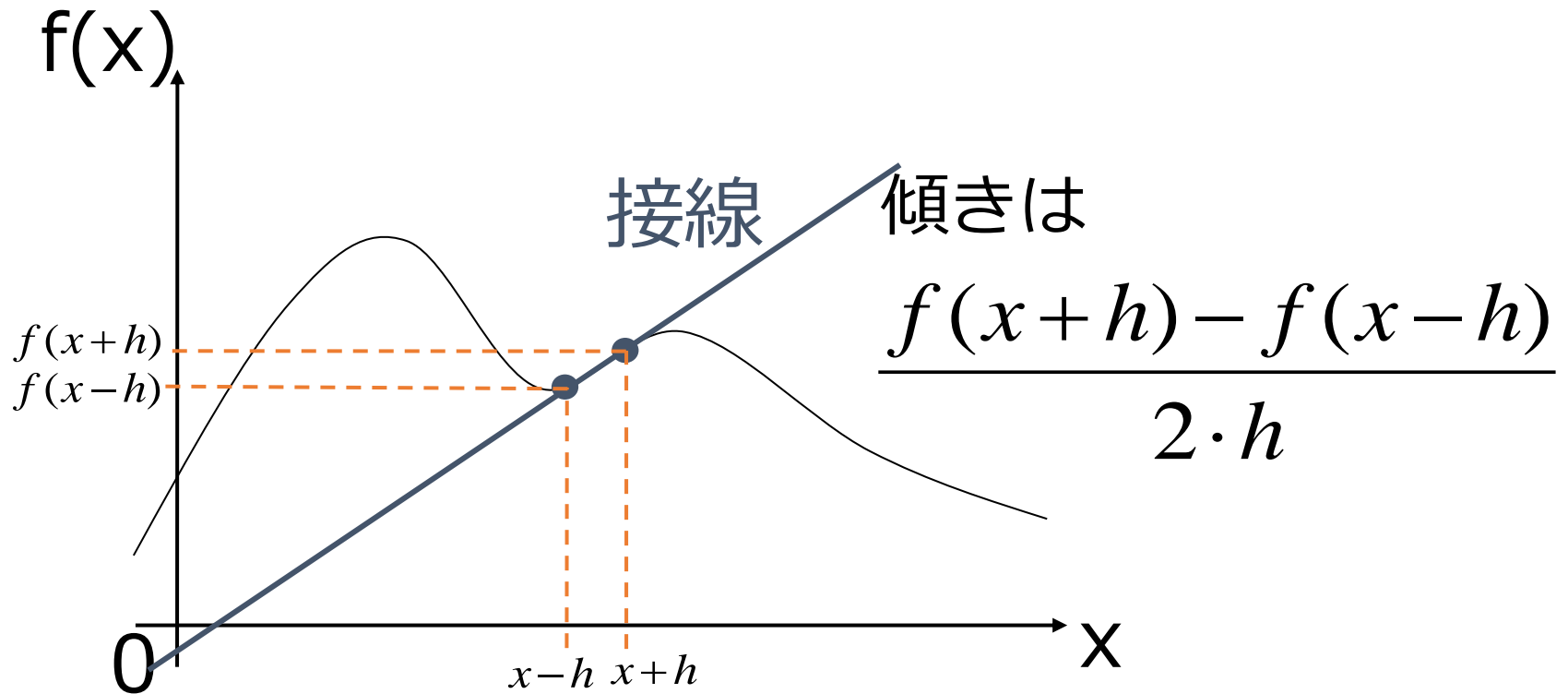
13-2 パソコン演習

13-3 課題

# 13-1 数値微分と数値積分

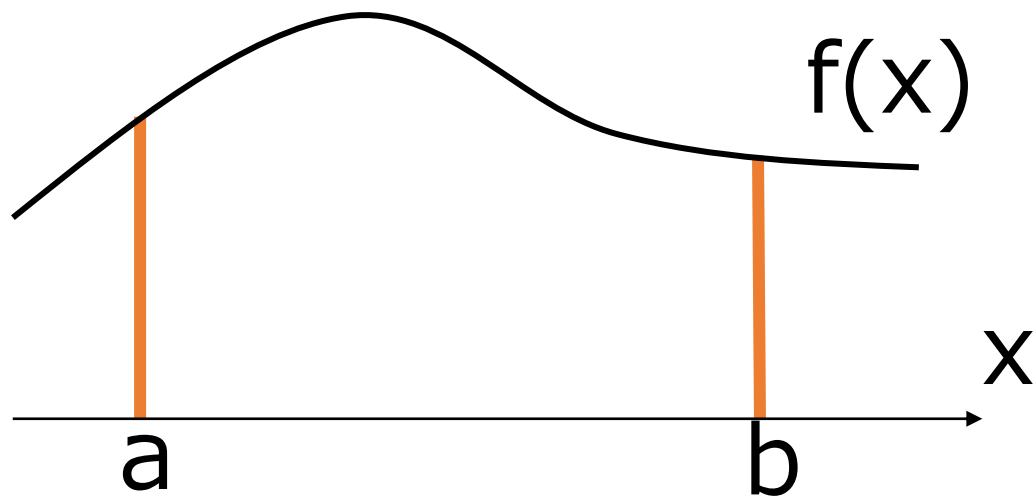
1. 接線の傾き  $d/dx$
2. 台形則による数値積分 **trapezoid**

# 接線の傾き



h を 0 に近づけることで、接線の傾き  
( $=f'(x)$ ) の「近似値」が求まる

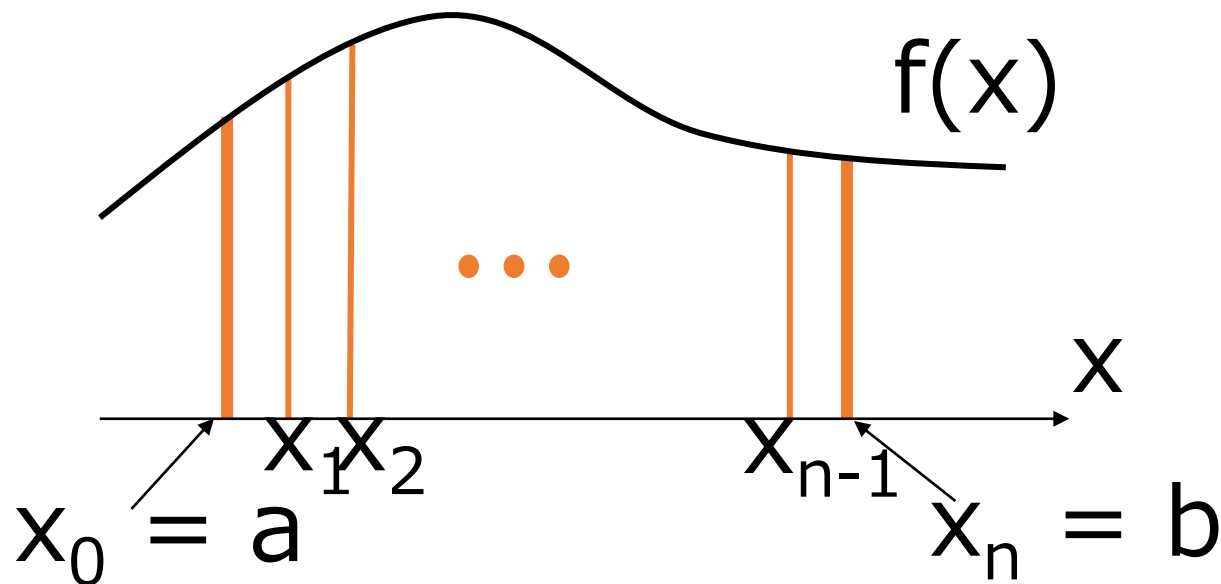
# 定積分



$$\text{定積分} : I = \int_a^b f(x) dx$$

区間  $[a, b]$  で, 連続関数  $f$ ,  $x$  軸,  
 $x=a$ ,  $x=b$  で囲まれた面積

# 区間 $[a, b]$ の小区間への分割



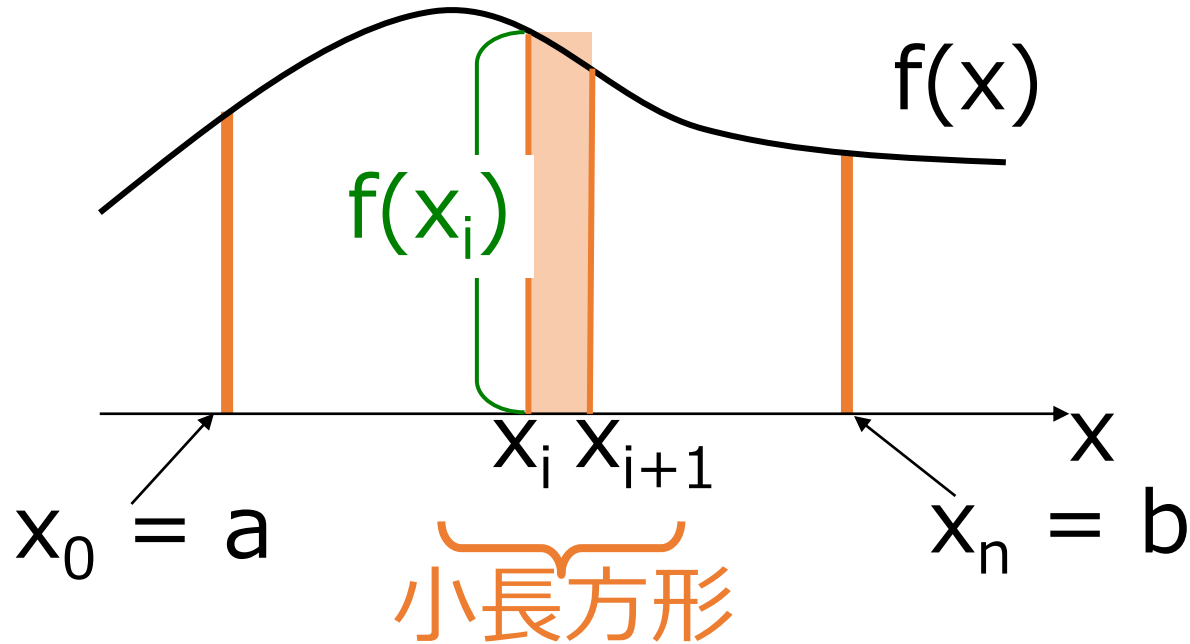
- $n$  個の等間隔な小区間に分割

- 幅 :  $h = (b-a) / n$

- 小区間 :  $[x_0, x_1], [x_1, x_2], \dots, [x_{n-1}, x_n]$

但し,  $x_0 = a, x_i = x_0 + i \times h$

# 小長方形

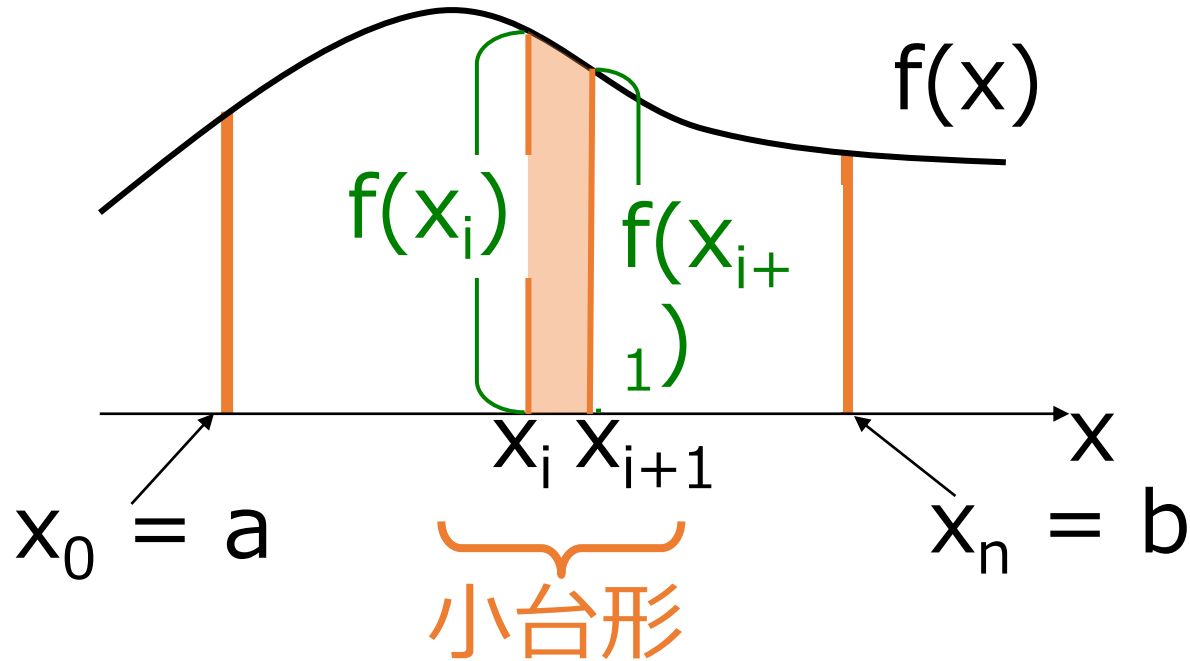


- 小長方形の面積は

$$f(x_i)h$$



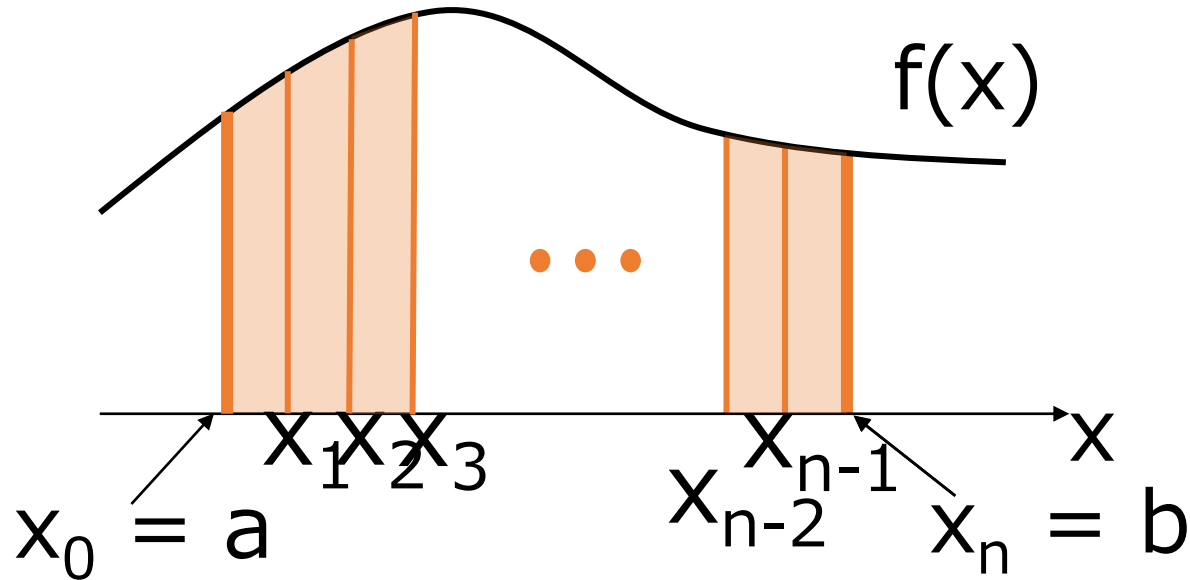
# 小台形



- 小台形の面積は

$$\frac{h}{2} (f(x_i) + f(x_{i+1}))$$

# 台形則 trapezoidal rule



- 小台形の面積の和は

$$S_n = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{h}{2} (f(x_i) + f(x_{i+1}))$$

- 定積分  $I$  を, この和  $S_n$  で近似  $\Rightarrow$  台形則という

# 台形則による数値積分



- 区間  $[a, b]$  を  $n$  等分 (1区間の幅  $h=(b-a)/n$ )
- $n$  個の台形を考え, その面積の和  $S_n$  で, 定積分  $I$  を近似
  - $f(x)$  が連続関数のときは,  $n$  を無限大に近づければ,  $S_n$  は  $I$  に近づく

$$I = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{h}{2} (f(x_i) + f(x_{i+1})) = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n$$

- 但し, 単純に「 $n$  を大きくすればよい」とは言えない
  - $n$  を大きくすると  $\Rightarrow$  計算時間の問題, 丸め誤差の問題が発生

- 式で書いてある関数の積分  
⇒ ごく限られた関数しか定積分できない
- 「数値積分」が重要になる

- 両端  $x_0 = a$  と  $x_n = b$  を除いて,  $f(x_i)$  は2度現れる

$$\begin{aligned} S_n &= \sum_{i=0}^{n-1} \frac{h}{2} (f(x_i) + f(x_{i+1})) \\ &= \frac{h}{2} (f(x_0) + \underbrace{2(f(x_1) + \cdots + f(x_{n-1}))}_{\text{2回現れる部分}} + f(x_n)) \\ &= h \cdot \left( \frac{1}{2} f(x_0) + \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + \frac{1}{2} f(x_n) \right) \\ &= h \cdot \left( \frac{1}{2} f(a) + \sum_{i=1}^{n-1} f(a + ih) + \frac{1}{2} f(b) \right) \end{aligned}$$

但し  $h = (b-a) / n$  13

# 13-2 パソコン演習

- 資料を見ながら、「例題」を行ってみる
- 各自、「課題」に挑戦する
- 自分のペースで先に進んで構いません

- DrScheme の起動

プログラム → PLT Scheme →  
DrScheme

- 今日の演習では 「Advanced Student」  
に設定

Language

→ Choose Language

→ Advanced Student

→ OK

→ 「Execute ボタン」



# 例題 1 . 接線の傾き



- 接線の傾きを求める関数  $d/dx$  を作り, 実行する
  - 数値  $x, h$  と関数  $f$  から,  $x$  における  $f$  の傾き ( $= f'(x)$ ) の近似値を求める
  - $d/dx$  は高階関数

## 「例題 1. 接線の傾き」の手順

1. 次を「定義用ウィンドウ」で、実行しなさい
  - 入力した後に、Execute ボタンを押す

```
;; d/dx: (number->number) number number -> number
;; inclination of the tangent
;; Example: (d/dx f 3 0.0001)
;;          = ((- (f 3.0001) (f 2.9999)) 0.0002)
(define (d/dx f x h)
  (/ (- (f (+ x h)) (f (- x h)))
      (* 2 h)))
(define (f2 x)
  (- (* x x) 2))
```

2. その後、次を「実行用ウィンドウ」で実行しなさい

```
(d/dx f2 3 0.0001)
```

```
;; d/dx: (number->number) number number -> number  
;; inclination of the tangent  
;; Example: (d/dx f 3 0.0001)  
;;           = ((- (f 3.0001) (f 2.9999)) 0.0002)  
(define (d/dx f x h)  
  (/ (- (f (+ x h)) (f (- x h)))  
     (* 2 h)))
```

まず、関数 d/dx を定義している

```
Untitled - DrScheme
File Edit Windows Show Language Scheme Help
Untitled Save
Check Syntax Step Execute Break

;; d/dx: (number->number) number number -> number
;; inclination of the tangent
;; Example: (d/dx f 3 0.0001)
;;           = ((- (f 3.0001) (f 2.9999)) 0.0002)
(define (d/dx f x h)
  (/ (- (f (+ x h)) (f (- x h)))
      (* 2 h)))

;; f2: number -> number
;; Example: (f2 3) = 7
(define (f2 x)
  (- (* x x) 2))

>
```

次に関数 **f2** を定義している  
(define (f2 x)  
 (- (\* x x) 2))

これは、  
(d/dx f2 3 0.0001)  
と書いて、x の値を 3 に、  
h の値を 0.0001 に、  
f を f2 に設定しての実行

```
;; d/dx: (number  
;; inclination o  
;; Example: (d/d  
;;  
(define (d/dx f  
  (/ (- (f (+  
        (* 2 h  
;; f2: number ->  
;; Example: (f2 3) = 7  
(define (f2 x)  
  (- (* x x) 2))
```

> (d/dx f2 3 0.0001)

6

> (f2 3)

7

>

実行結果である「6」が  
表示される

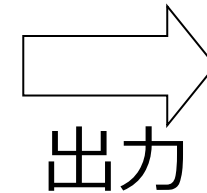
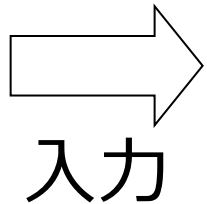
# 入力と出力



f2

3

0.0001



f2'(3) の近似値

入力は2つの数値と  
関数

出力は数値

d/dx は, 関数を入力とするような関数  
(つまり高階関数)

# d/dx 関数



```
:: d/dx: (number->number) number number -> number
```

```
:: inclination of the tangent
```

```
:: Example: (d/dx f 3 0.0001)
```

```
:: = ((- (f 3.0001) (f 2.9999)) 0.0002)
```

```
(define (d/dx f x h)
```

```
  (/ (- (f (+ x h)) (f (- x h)))
```

```
      (* 2 h)))
```

関数が、  
「d/dx」の入力になっている

# (dx/d f2 3 0.0001) から 6 が得られる過程の概略

`(dx/d f2 3 0.0001)` 最初の式

$$= (/ (- (f2 (+ 3 0.0001)) (f2 (- 3 0.0001))))$$
$$(* 2 0.0001))$$

$$= (/ (- (- (* (+ 3 0.0001) (+ 3 0.0001)) 2)$$
$$(- (* (- 3 0.0001) (- 3 0.0001)) 2)$$
$$(* 2 0.0001))))$$

= ...

コンピュータ内部での計算

= `6` 実行結果

但し, f2 は

```
(define (f2 x)
  (- (* x x) 2))
```



# (dx/d f2 3 0.0001) から 6 が得られる過程の概略

(dx/d f2 3 0.0001)

$$= \left( \frac{(- (f2 (+ 3 0.0001)) (f2 (- 3 0.0001)))}{(* 2 0.0001)} \right)$$

$$= \left( \frac{(- (- (* (+ 3 0.0001) (+ 3 0.0001))) 2)}{(* 2 0.0001)} \right)$$

これは,

```
(define (d/dx f x h)
```

```
  (/ (- (f (+ x h)) (f (- x h)))  
      (* 2 h)))
```

の x を 3 で, h を 0.0001 で, f を f2 で置き換えたもの

# (dx/d f2 3 0.0001) から 6 が得られる過程の概略

(dx/d f2 3 0.0001)

= (/ (- (f2 (+ 3 0.0001)) (f2 (- 3 0.0001))))  
(\* 2 0.0001))

= (/ (- (- (\* (+ 3 0.0001) (+ 3 0.0001)) 2)  
(- (\* (- 3 0.0001) (- 3 0.0001)) 2)  
(\* 2 0.0001)))

=

これは,

```
(define (f2 x)  
  (- (* x x) 2))
```

の x を (+ 3 0.0001) や (- 3 0.0001) で置き換えたもの

## 例題 2. 台形則による数値積分



- 台形則による数値積分の関数 `trapezoid` を作り, 実行する

- 但し,

積分したい関数  $f(x) = e^{-x^2}$

積分区間:  $[a, b]$

区間数:  $n$

## 「例題 2. 台形則による数値積分」の手順

1. 次を「定義用ウィンドウ」で、実行しなさい

- 入力した後に、Execute ボタンを押す

```
(define (trapezoid-iter f a h k)
  (cond
    [(= k 1) (f (+ a h))]
    [else (+ (f (+ a (* h k)))
              (trapezoid-iter f a h (- k 1)))]))
;; trapezoid: number number number -> number
;; to compute the area under the graph of f between a and b
(define (trapezoid f a b n)
  (* (/ (- b a) n)
     (+ (trapezoid-iter f
                        a
                        (/ (- b a) n)
                        (- n 1))
        (/ (f a) 2)
        (/ (f b) 2))))
(define (f2 x)
  (exp (- (* x x))))
```

2. その後、次を「実行用ウィンドウ」で実行しなさい

```
(trapezoid f2 0 1 1000)
```

☆ 次は、課題に進んでください

```
Untitled - DrScheme
File Edit Windows Show Language Scheme Help
Untitled Save
define... Check Syntax Step Execute Break

(define (trapezoid-iter f a h k)
  (cond
    [(= k 1) (f (+ a h))]
    [else (+ (f (+ a (* h k)))
              (trapezoid-iter f a h (- k 1)))]))
;; trapezoid: number number number -> number
;; to compute the area under the graph of f between a and b
(define (trapezoid f a b n)
  (* (/ (- b a) n)
     (+ (trapezoid-iter f
                        a
                        (/ (- b a) n)
                        (- n 1))
        (/ (f a) 2)
        (/ (f b) 2))))

>
```



まず、関数 **trapezoid-iter**, **trapezoid** を定義している

```
File Edit Windows Show Language Scheme Help
Untitled Save Check Syntax Step Execute Break
(define (trapezoid-iter f a h k)
  (cond
    [(= k 1) (f (+ a h))]
    [else (+ (f (+ a (* h k)))
             (trapezoid-iter f a h (- k 1)))]))
;; trapezoid: number number number -> number
;; to compute the area under the graph of f between a and b
(define (trapezoid f a b n)
  (* (/ (- b a) n)
     (+ (trapezoid-iter f
                       a
                       (/ (- b a) n)
                       (- n 1))
        (/ (f a) 2)
        (/ (f b) 2))))
(define (f2 x)
  (exp (- (* x x))))
>
```

次に関数 **f2** を定義している  
(define (**f2** x)  
 (exp (- (\* x x))))  
これは、数値積分したい関数

```
File Edit Windows Show Language Scheme Help
Untitled Save
(define (trapezoid
  (cond
    [(= k 1) (f (+ a b) h)]
    [else (+ (f (+ a b) h)
              (trapezoid (+ a h) (+ b h) k))])
  ;; trapezoid: number
  ;; to compute the
  (define (trapezoid
    (* (/ (- b a) n)
      (+ (trapezoid
          (/ (f a) 2)
          (/ (f b) 2))))))
  (define (f2 x)
    (exp (- (* pi x))))
  > (trapezoid f2 0 1 1000)
  #i0.7468240714991842
  >
```

これは、  
(trapezoid f2 0 1 1000)  
と書いて、a の値を 0 に、  
b の値を 1 に、h の値を 1000 に、  
f を f2 に設定しての実行

実行結果である  
「#i0.7468240714991842」  
が表示される

```
(define (trapezoid-iter f a h k)
  (cond
    [(= k 1) (f (+ a h))]
    [else (+ (f (+ a (* h k)))
              (trapezoid-iter f a h (- k 1)))]))
```

;; trapezoid: number number number -> number

;; to compute the area under the graph of f between a and b

```
(define (trapezoid f a b n)
  (* (/ (- b a) n)
     (+ (trapezoid-iter f
                        a
                        (/ (- b a) n)
                        (- n 1))
        (/ (f a) 2)
        (/ (f b) 2))))
```



# 例題 3 . 台形則の計算の精度



- 例題 2 での台形則の計算の精度が，分割幅を小さくするほど高精度になることを確かめる。

- 但し，

積分したい関数  $f(x) = e^{-x^2}$

積分区間 0 から 1

分割数 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1280 の 8 通り

## 例題 3. 「台形則の計算の精度」の手順 (1/2)

1. 次を「定義用ウィンドウ」で，実行しなさい
  - 入力した後に，Execute ボタンを押す

```
(define (trapezoid-iter f a h k)
  (cond
    [(= k 1) (f (+ a h))]
    [else (+ (f (+ a (* h k)))
              (trapezoid-iter f a h (- k 1)))]))
;; trapezoid: number number number > number
;; to compute the area under the graph of f between a and b
(define (trapezoid f a b n)
  (* (/ (- b a) n)
     (+ (trapezoid-iter f
                        a
                        (/ (- b a) n)
                        (- n 1))
        (/ (f a) 2)
        (/ (f b) 2))))
(define (f2 x)
  (exp (- (* x x))))
```

これは，例題 2 と同じ

## 例題 3. 「台形則の計算の精度」の手順 (2/2)

2. その後, 次を「実行用ウィンドウ」で実行  
しなさい

```
(trapezoid 0 1 10)  
(trapezoid 0 1 20)  
(trapezoid 0 1 40)  
(trapezoid 0 1 80)  
(trapezoid 0 1 160)  
(trapezoid 0 1 320)  
(trapezoid 0 1 640)  
(trapezoid 0 1 1280)
```

- 分割幅を小さくするほど高精度

# おわりに



- 近似値を求める手法
  - 数値微分, 数値積分
  - 十分に役に立つ
  - 「必ず誤差が生じる」ことを意識しながら使うことが必要

# 13-3 課題

# 課題 1



- $f(x) = x \cos x$  について,  $f'(0)$ ,  $f'(0.2)$ ,  $f'(0.4)$ ,  $f'(0.6)$  の値を報告しなさい
  - 関数  $d/dx$  (授業の例題 1) を使いなさい
  - $h = 0.1$  としなさい

## 演習 2



- $f(x) = x \cos x$  について,  $h = 0.1, 0.01, 0.001$  と変えて関数  $d/dx$  を実行し, 結果を比べなさい
  - $h$  と誤差の関係が分かるグラフを作成せよ



# 演習 3



- 台形則を使って，次を計算せよ

$$\log_e 2 = \int_0^1 \frac{x}{1+x} dx$$

- 計算結果を，以下と比較せよ

```
> (log 2)  
#i0.6931471805599453
```

DrScheme での  $(\log 2)$  の実行結果

# 演習 4



- 演習 3 について, 区間数  $n$  を,  $n = 4, 8, 16, 32, 64, 128$  と変えて計算を行い, 刻み幅と誤差の関係を調べよ
  - 区間数  $n$  と誤差の関係を書いたグラフを作成せよ
  - この場合, おおよそ次の関係が成り立っていることを確認せよ

$$Sn - I \approx \frac{c}{n^2} \quad (c \text{ は定数})$$

# 演習 4 . 関数のグラフ



- 関数  $d/dx$  (例題 1) を使って, 関数のグラフをグラフィックスで表示させなさい
  - プログラムは次ページ以降にある. このプログラムを実行させ, 実行結果を報告しなさい
  - 但し, 実行結果の報告では, 必ず関数  $f2$  を別のものに書き換えて実行しなさい

```
:: d/dx: (number->number) number number -> number
```

```
:: inclination of the tangent
```

```
:: Example: (d/dx f 3 0.0001)
```

```
::          = ((- (f 3.0001) (f 2.9999)) 0.0002)
```

```
(define (d/dx f x h)
```

```
  (/ (- (f (+ x h)) (f (- x h)))
```

```
      (* 2 h)))
```

```
:: samples: (number->number) number number number -> list of  
'posn' structure
```

```
(define (samples f a h k)
```

```
  (cond
```

```
    [(= k 1) (cons (make-posn (+ a h)
```

```
                    (f (+ a h)))
```

```
                empty)]
```

```
    [else (cons (make-posn (+ a (* h k))
```

```
                  (f (+ a (* h k))))
```

```
            (samples f a h (- k 1)))]))
```

```
; window size
(define WX 500)
(define WY 500)
; grid color, axis color and
(define GRID_COLOR 'blue)
(define AXIS_COLOR 'red)
(define GRAPH_COLOR 'red)
; draw-a-line
(define (sessen x px py d)
  (+ (* d (- x px)) py))
(define (draw-a-sessen from to px py d x0 y0 sx sy)
  (draw-solid-line (make-posn (+ (* from sx) x0) (+ (* (sessen from px py d) sy)
    y0))
    (make-posn (+ (* to sx) x0) (+ (* (sessen to px py d) sy) y0))
    GRAPH_COLOR))
(define (draw-sessen f px x0 y0 sx sy)
  (draw-a-sessen (/ (- x0) sx) (/ (- WX x0) sx) px (f px) (d/dx f px 0.00001) x0
    y0 sx sy))
```

```
; draw-polyline
(define (draw-polyline a-poly)
  (cond
    [(empty? (rest a-poly)) true]
    [else (and
            (draw-solid-line (first a-poly)
                             (first (rest a-poly)) GRAPH_COLOR)
            (draw-polyline (rest a-poly)))]))
```

```
; draw-h-lines
(define (draw-h-lines start skip stop width)
  (cond
    [(>= start stop)
     (draw-solid-line (make-posn 0 stop) (make-posn width stop)
                      GRID_COLOR)]
    [else
     (and
      (draw-solid-line (make-posn 0 start) (make-posn width start)
                       GRID_COLOR)
      (draw-h-lines (+ start skip) skip stop width))]))
```

```
; draw-v-lines
(define (draw-v-lines start skip stop height)
  (cond
    [(>= start stop)
     (draw-solid-line (make-posn stop 0) (make-posn stop height)
                      GRID_COLOR)]
    [else
     (and
      (draw-solid-line (make-posn start 0) (make-posn start height)
                       GRID_COLOR)
      (draw-v-lines (+ start skip) skip stop height))]))
```

; (x0, y0) is the origin. sx and sy represent one grid size

```
(define (draw-grid x0 y0 sx sy)
  (and
   (draw-v-lines (- x0 (* (quotient x0 sx) sx)) sx (+ (* (quotient (- WX x0) sx) sx)
                                                       x0) WY)
   (draw-h-lines (- y0 (* (quotient y0 sy) sy)) sy (+ (* (quotient (- WY y0) sy) sy)
                                                       y0) WX)
   (draw-solid-line (make-posn 0 y0) (make-posn WX y0) AXIS_COLOR)
   (draw-solid-line (make-posn x0 0) (make-posn x0 WY) AXIS_COLOR)))
```

```
; (x0, y0) is the origin. sx and sy represent one grid size
(define (scaling a-list x0 y0 sx sy)
  (cond
    [(empty? a-list) empty]
    [else (cons (make-posn (+ (* (posn-x (first a-list)) sx) x0)
                      (+ (* (posn-y (first a-list)) sy) y0))
                (scaling (rest a-list) x0 y0 sx sy))]))
;
; f2: number -> number
(define (f2 x)
  (- (* x x) 2))
; (X0, Y0) represents the origin of the graph.
; SX and SY represent the size of one grid
(define X0 (/ WX 2))
(define Y0 (/ WY 2))
(define SX 50)
(define SY 50)
(define PX 0.5)
(start WX WY)
(draw-grid X0 Y0 SX SY)
(draw-polyline (scaling (samples f2 (/ (- X0) SX) (/ 1 SX) WX) X0 Y0 SX SY))
(draw-sessen f2 PX X0 Y0 SX SY)
```