# 数値解析
# 第拾壱回　補間法
# 補間多項式

舟木　剛

平成26年12月10日２限

# シラバス

- 授業の目的
  - 工学分野でよく用いられる数値計算の算法ならびにそれらの数値的な特性について理解させる.
- 授業計画
  - 数値計算と誤差（1回）
    - 数値計算の必要性ならびに誤差の種類について説明するとともに，行列式とその性質，行及び列の交換などの基本演算，逆行列の定義と求め方について説明する.
  - 代数方程式（2回）
    - ２分法，Newton-Raphson 法，Bailey 法について解説する. また，多変数に対するNewton-Raphson 法と収束に関する留意点について述べる.
  - 連立方程式（３回）
    - Gauss の消去法，Gauss-Jordan の掃き出し法，LU 分解法の手順ならびに計算複雑度について解説する. また，Jacobi 法，Gauss-Seidel 法，SOR 法などの反復法について手順並びに収束条件について解説する.
  - 行列の固有値（３回）
    - 固有値の性質，べき乗法，Householder 法，QR 法について述べる. QR 法の収束定理について解説する.
  - 補間法（２回）
    - 線形補間，Lagrange 補間，Newton 補間，スプライン補間について述べる. 多項式補間については算出方法をスプライン補間については３次のスプライン関数の導出方法を説明する. また，自然なスプライン関数とその特徴について解説する.
  - 関数近似（１回）
    - 最小２乗法による関数の近似について解説する.
  - 数値積分（１回）
    - 台形公式，シンプソンの公式による数値積分について解説する.
  - 常微分方程式（１回）
    - 単区分法である Euler 法，修正Euler 法，Runge-Kutta 法ならびに複区分法である Adams-Moulton の予測子・修正子法について解説する. また，数値不安定性についても解説する.
- 教科書 佐藤・中村共著「よくわかる数値計算」日刊工業新聞社

# 多項式補間の誤差

- 近似しようとする関数$f(x)$
  - 異なる$n+1$個の補間点$x_i$ $(i=0,1,\cdots,n)$に対する$n$次の補間多項式$g_n(x)$
  - 補間多項式の誤差$E(x)$
    - $E(x)=f(x)-g_n(x)$
    - 補間点において誤差は0となる
      - $E(x_i)=f(x_i)-g_n(x_i)=0$
- $n+1$次の多項式
  - $F(x)=E(x)-K(x-x_0)(x-x_1)\cdots(x-x_n)=E(x)-K\prod_{i=0}^{n}(x-x_i)$
    - $n+1$ 次なので$K$を用いて$n+1$個の補間点$x_i$ $(i=0,1,\cdots,n)$の他に1点$x'$で$F(x')=0$とできる。

# 多項式補間の誤差

- 補間多項式$g_n(x)$は$n$次式
  - $n+1$回微分は$\frac{d^n}{dx^n} g_n(x) = 0$となる，$\frac{d^n}{dx^n} K \prod_{i=0}^{n}(x - x_i) = K(n+1)!$
  - $f(x)$を$n+1$回微分可能として，$n+1$回微分を$f^{(n+1)}(x)$と表す
  - $F(x)$の$n+1$回微分$F^{(n+1)}(x) = E^{(n+1)}(x) - K(n+1)! = f^{(n+1)}(x) - K(n+1)!$
  - $x = x^*$において$F^{(n+1)}(x^*) = 0$となるように$K$を定める
    - $F^{(n+1)}(x^*) = f^{(n+1)}(x^*) - K(n+1)! = 0$
    - $K = \frac{f^{(n+1)}(x^*)}{(n+1)!}$
    - $F(x) = E(x) - \frac{f^{(n+1)}(x^*)}{(n+1)!} \prod_{i=0}^{n}(x - x_i)$

# 多項式補間の誤差

- $F(x') = 0$より
  - $F(x') = E(x') - \frac{f^{(n+1)}(x^*)}{(n+1)!}\prod_{i=0}^{n}(x' - x_i) = 0$
  - $x'$は区間$[x_0, x_n]$にあり$x' \neq x_i$ $(i = 0,1,\cdots,n)$の任意の点$x$
    - $x'$における誤差
      - $E(x') = \frac{f^{(n+1)}(x^*)}{(n+1)!}\prod_{i=0}^{n}(x' - x_i)$
        » $|x' - x_i| \leq |x_n - x_0|$ $(i = 0,1,\cdots,n)$より$\prod_{i=0}^{n}(x' - x_i) \leq (x_n - x_0)^{n+1}$
        » $\left|f^{(n+1)}(x^*)\right| \leq \max_{x_0 \leq x^* \leq x_n} f^{(n+1)}(x^*)$
        » $E(x') \leq \frac{\max_{x_0 \leq x^* \leq x_n} f^{(n+1)}(x^*)}{(n+1)!}(x_n - x_0)^{n+1}$
    - $x' = x_i$ $(i = 0,1,\cdots,n)$では$E(x_i) = 0$

# ルンゲ現象

- 多項式補間において，多項式の次数を高くすると補間誤差が大きくなる現象
  - 例　$f(x) = \frac{1}{1+25x^2}$
    - $-1$~$1$までの$n+1$個の等間隔の補間点$x_i$ $(i = 1, \cdots, n+1)$での多項式補間
      - $x_i = -1 + (i-1)\frac{2}{n}$ $(i = 1, \cdots, n+1)$
      - 誤差$E(x) = \frac{f^{(n+1)}(x)}{(n+1)!}\prod_{i=0}^{n}(x - x_i)$
        » $f^{(1)}(x) = \frac{-50x}{(1+25x^2)^2}$　　$\left|f^{(1)}(1)\right| = \frac{50}{26^2} \cong 0.074$
        » $f^{(2)}(x) = \frac{5000x^2(1+25x^2)-50(1+25x^2)^2}{(1+25x^2)^4}$　　$\left|f^{(2)}(1)\right| = \frac{96200}{26^4} \cong 0.2165$
        » どんどん大きくなる

# スプライン補間

- 多項式補間の課題
  - 高次多項式における誤差(ルンゲ現象)
    - 区間全体を1つの多項式で近似するのが原因
    - 区分的多項式によって補間する
      - $[a,b]$上の連続関数で，各区間$[x_{k-1},x_k]$に制限された多項式
      - $n$個の多項式$p_0,p_1,\cdots,p_{n-1}$を用いて区分的多項式$P$を定義
        » $P(x)=\begin{cases} p_0(x) & x_0 \le x < x_1 \\ \vdots & \\ p_{n-1}(x) & x_{n-1} \le x < x_n \end{cases}$
        » 多項式の次数の最大値を区分的多項式の次数とする
          - $\deg P \coloneqq \max_{0 \le i \le n-1} \deg p_i$
        » 高々$k$次の区分的多項式で$C^{k-1}(a,b)$に属するものを高々$k$次のスプライン関数と呼ぶ

# スプライン補間

- 関数の滑らかさ → 関数の微分可能性
  - 高階の導関数を持つ関数ほど滑らか
  - 関数$f$に$k$階の導関数が存在して連続である時，$f$は$k$階連続微分可能
    - $C^k$級の関数と呼ぶ
- スプライン補間
  - 小区間に分割した補間多項式の境界条件として，微分が等しくなるような補間
  - ３次のスプライン補間
    - $n+1$個の補間点$(x_0 < x_1 < \cdots < x_n)$を考える

# ３次のスプライン補間

- 各部分区間$[x_{i-1}, x_i]$を3次関数で補間
  - 各部分区間の3次多項式$S_i(x)$で補間する
  1. 隣合う部分区間における補間関数の境界条件
     - $S_i(x_i) = S_{i+1}(x_i) = y_i (i = 1, \cdots, n-1)$
     - 3次関数
  2. 補間関数の1階微分の境界条件
     - $S'_i(x_i) = S'_{i+1}(x_i)\ (i = 1, \cdots, n-1)$
     - 2次関数
  3. 補間関数の2階微分の境界条件
     - $S''_i(x_i) = S''_{i+1}(x_i) = M_i (i = 1, \cdots, n-1)$
     - 1次関数
     - 補間点$(x_1, M_1) \cdots (x_{n-1}, M_{n-1})$

# ３次のスプライン補間

- 異なる2点$(x_{i-1}, M_{i-1})$, $(x_i, M_i)$を通る直線（一次関数$S''_i(x)$)で表す
  - $S''_i(x) = \frac{M_i - M_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}(x - x_i) + M_i$

$$= \frac{(M_i - M_{i-1})(x - x_i) + M_i(x_i - x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}}$$

$$= \frac{M_i(x - x_i + x_i - x_{i-1}) - M_{i-1}(x - x_i)}{x_i - x_{i-1}}$$

$$= \frac{M_i(x - x_{i-1}) - M_{i-1}(x - x_i)}{x_i - x_{i-1}}$$

$$= \frac{M_i(x - x_{i-1}) - M_{i-1}(x - x_i)}{h_i}$$

  - ただし$h_i = x_i - x_{i-1}$

# ３次のスプライン補間

- $S'_{i-1}(x)$は$S''_{i-1}(x)$の積分
  - $S'_{i-1}(x) = \int S''_{i-1}(x)dx =$
    $\int \frac{M_i(x-x_{i-1})-M_{i-1}(x-x_i)}{h_i}dx$
    $$= \frac{M_i(x-x_{i-1})^2 - M_{i-1}(x-x_i)^2}{2h_i} + C_i$$
    $$= \frac{M_i(x-x_{i-1})^2}{2h_i} - \frac{M_{i-1}(x-x_i)^2}{2h_i} + C_i$$
    - $C_i$:積分定数

# ３次のスプライン補間

- $S_{i-1}(x)$は$S'_{i-1}(x)$の積分
  - $S_{i-1}(x) = \int S'_{i-1}(x)dx$

$$= \int \left\{ \frac{M_i(x - x_{i-1})^2}{2h_i} - \frac{M_{i-1}(x - x_i)^2}{2h_i} + C_i \right\} dx$$

$$= \frac{M_i(x - x_{i-1})^3}{6h_i} - \frac{M_{i-1}(x - x_i)^3}{6h_i} + C_i x + D_i$$

    - $D_i$ :積分定数

# ３次のスプライン補間

- 各部分空間の条件
  - $S_{i-1}(x_{i-1}) = y_{i-1} = \frac{M_i(x_{i-1}-x_{i-1})^3}{6h_i} - \frac{M_{i-1}(x_{i-1}-x_i)^3}{6h_i} + C_i x_{i-1} + D_i$

    $$= -\frac{M_{i-1}(-h_i)^3}{6h_i} + C_i x_{i-1} + D_i$$

    - $\frac{M_{i-1}{h_i}^2}{6} + C_i x_{i-1} + D_i = y_{i-1}$
  - $S_{i-1}(x_i) = y_i = \frac{M_i(x_i-x_{i-1})^3}{6h_i} - \frac{M_{i-1}(x_i-x_i)^3}{6h_i} + C_i x_i + D_i$

    $$= \frac{M_i{h_i}^3}{6h_i} + C_i x_i + D_i$$

    - $\frac{M_i{h_i}^2}{6} + C_i x_i + D_i = y_i$

# ３次のスプライン補間

- 積分定数を求める
  - $C_i x_{i-1} + D_i = y_{i-1} - \frac{M_{i-1} {h_i}^2}{6}$
  - $C_i x_i + D_i = y_i - \frac{M_i {h_i}^2}{6}$
  - $C_i (x_i - x_{i-1}) = y_i - y_{i-1} - \frac{M_i {h_i}^2}{6} + \frac{M_{i-1} {h_i}^2}{6}$
  - $C_i h_i = y_i - y_{i-1} - \frac{{h_i}^2}{6}(M_i - M_{i-1})$
  - $C_i = \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} - \frac{h_i}{6}(M_i - M_{i-1})$

# ３次のスプライン補間

- 積分定数を求める
  - $D_i = y_{i-1} - \frac{M_{i-1}{h_i}^2}{6} - C_i x_{i-1}$

$$= y_{i-1} - \frac{M_{i-1}{h_i}^2}{6} - \left\{\frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} - \frac{h_i}{6}(M_i - M_{i-1})\right\} x_{i-1}$$

$$= \frac{1}{h_i}\{h_i y_{i-1} + (y_i - y_{i-1})x_{i-1}\} - \frac{h_i}{6}\{M_{i-1}h_i + (M_i - M_{i-1})x_{i-1}\}$$

$$= \frac{1}{h_i}\{(x_i - x_{i-1})y_{i-1} - (y_i - y_{i-1})x_{i-1}\}$$

$$- \frac{h_i}{6}\{M_{i-1}(x_i - x_{i-1}) - (M_i - M_{i-1})x_{i-1}\}$$

$$= \frac{1}{h_i}\{x_i y_{i-1} - x_{i-1} y_i\} - \frac{h_i}{6}\{M_{i-1}x_i - M_i x_{i-1}\}$$

# ３次のスプライン補間

- $S_{i-1}(x)$に積分定数を適用

$$-S_{i-1}(x) = \frac{M_i(x-x_{i-1})^3}{6h_i} - \frac{M_{i-1}(x-x_i)^3}{6h_i} + C_i x + D_i$$

$$= \frac{M_i(x-x_{i-1})^3}{6h_i} - \frac{M_{i-1}(x-x_i)^3}{6h_i}$$

$$+ \left\{\frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} - \frac{h_i}{6}(M_i - M_{i-1})\right\} x$$

$$+ \left\{\frac{1}{h_i}\{x_i y_{i-1} - x_{i-1} y_i\} - \frac{h_i}{6}\{M_{i-1} x_i - M_i x_{i-1}\}\right\}$$

# ３次のスプライン補間

– $=\frac{M_i(x-x_{i-1})^3}{6h_i}-\frac{M_{i-1}(x-x_i)^3}{6h_i}+\frac{1}{h_i}\{x_iy_{i-1}-x_{i-1}y_i+(y_i-y_{i-1})x\}-\frac{h_i}{6}\{(M_i-M_{i-1})x+M_{i-1}x_i-M_ix_{i-1}\}$

$$=\frac{M_i(x-x_{i-1})^3}{6h_i}-\frac{M_{i-1}(x-x_i)^3}{6h_i}$$
$$+\frac{1}{h_i}\{-y_{i-1}(x-x_i)+y_i(x-x_{i-1})\}$$
$$-\frac{h_i}{6}\{-M_{i-1}(x-x_i)+M_i(x-x_{i-1})\}$$

– 各部分区間の補間関数$S_{i-1}(x)=\frac{M_i(x-x_{i-1})^3}{6h_i}-\frac{M_{i-1}(x-x_i)^3}{6h_i}+\left\{\frac{h_iM_{i-1}}{6}-\frac{y_{i-1}}{h_i}\right\}(x-x_i)-\left\{\frac{h_iM_i}{6}-\frac{y_i}{h_i}\right\}(x-x_{i-1})$

# ３次のスプライン補間

- $S'_{i-1}(x)$に積分定数を適用
  - $S'_{i-1}(x) = \frac{M_i(x-x_{i-1})^2}{2h_i} - \frac{M_{i-1}(x-x_i)^2}{2h_i} + C_i$

    $= \frac{M_i(x-x_{i-1})^2}{2h_i} - \frac{M_{i-1}(x-x_i)^2}{2h_i} + \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} - \frac{h_i}{6}(M_i - M_{i-1})$
- 各部分空間で1階微分は連続
  - $S'_{i-1}(x_i) = S'_i(x_i) \qquad i = 2,3,\cdots,n-1$
    - $\frac{M_i(x_i-x_{i-1})^2}{2h_i} - \frac{M_{i-1}(x_i-x_i)^2}{2h_i} + \frac{y_i-y_{i-1}}{h_i} - \frac{h_i}{6}(M_i - M_{i-1}) = \frac{M_{i+1}(x_i-x_i)^2}{2h_{i+1}} - \frac{M_i(x_i-x_{i+1})^2}{2h_{i+1}} + \frac{y_{i+1}-y_i}{h_{i+1}} - \frac{h_{i+1}}{6}(M_{i+1} - M_i)$
    - $\frac{M_i {h_i}^2}{2h_i} + \frac{y_i-y_{i-1}}{h_i} - \frac{h_i}{6}(M_i - M_{i-1}) = -\frac{M_i {h_{i+1}}^2}{2h_{i+1}} + \frac{y_{i+1}-y_i}{h_{i+1}} - \frac{h_{i+1}}{6}(M_{i+1} - M_i)$
    - $\frac{M_i h_i}{2} + \frac{y_i-y_{i-1}}{h_i} - \frac{h_i}{6}(M_i - M_{i-1}) = -\frac{M_i h_{i+1}}{2} + \frac{y_{i+1}-y_i}{h_{i+1}} - \frac{h_{i+1}}{6}(M_{i+1} - M_i)$
    - $M_{i-1}\frac{h_i}{6} + M_i\left(-\frac{h_i}{6} + \frac{h_i}{2} + \frac{h_{i+1}}{2} - \frac{h_{i+1}}{6}\right) + M_{i+1}\frac{h_{i+1}}{6} = \frac{y_{i+1}-y_i}{h_{i+1}} - \frac{y_i-y_{i-1}}{h_i}$
    - $\frac{h_i}{6}M_{i-1} + \frac{h_i+h_{i+1}}{3}M_i + \frac{h_{i+1}}{6}M_{i+1} = \frac{y_{i+1}-y_i}{h_{i+1}} - \frac{y_i-y_{i-1}}{h_i}$

# ３次のスプライン補間

- $\frac{h_i}{6}M_{i-1}+\frac{h_i+h_{i+1}}{3}M_i+\frac{h_{i+1}}{6}M_{i+1}=\frac{y_{i+1}-y_i}{h_{i+1}}-\frac{y_i-y_{i-1}}{h_i}$ $(i=2,3,\cdots,n-1)$より

$$\frac{h_2}{6}M_1+\frac{h_2+h_3}{3}M_2+\frac{h_3}{6}M_3=\frac{y_3-y_2}{h_3}-\frac{y_2-y_1}{h_2}$$

$$\frac{h_3}{6}M_2+\frac{h_3+h_4}{3}M_3+\frac{h_4}{6}M_4=\frac{y_4-y_3}{h_4}-\frac{y_3-y_2}{h_3}$$

$$\vdots$$

$$\frac{h_{n-1}}{6}M_{n-2}+\frac{h_{n-1}+h_n}{3}M_{n-1}+\frac{h_n}{6}M_n$$
$$=\frac{y_n-y_{n-1}}{h_n}-\frac{y_{n-1}-y_{n-2}}{h_{n-1}}$$

  - 未知数$M_1,M_2,\cdots,M_n$の$n$個に対して，条件式$n-2$個
    - 2個の条件を加える必要あり

# ３次のスプライン補間

- 自然スプライン
  - 区間端部$x_1, x_n$の境界条件
    - $S_1''(x_1) = M_1 = 0$
    - $S_{n-1}''(x_n) = M_n = 0$
- 両端での傾き$S_1'(x_1) = \alpha, S_{\mathrm{n-1}}'(x_n) = \beta$を考える場合
  - $S'_1(x_1) = \alpha = \frac{M_2(x_1 - x_1)^2}{2h_2} - \frac{M_1(x_1 - x_2)^2}{2h_2} + \frac{y_2 - y_1}{h_2} - \frac{h_2}{6}(M_2 - M_1) = -\frac{M_1 {h_2}^2}{2h_2} + \frac{y_2 - y_1}{h_2} - \frac{h_2}{6}(M_2 - M_1) = -\frac{h_2}{3}M_1 - \frac{h_2}{6}M_2 + \frac{y_2 - y_1}{h_2}$
  - $S_{\mathrm{n-1}}'(x_n) = \beta = \frac{M_n(x_n - x_{n-1})^2}{2h_n} - \frac{M_{n-1}(x_n - x_n)^2}{2h_n} + \frac{y_{\mathrm{n}} - y_{\mathrm{n-1}}}{h_n} - \frac{h_{\mathrm{n}}}{6}(M_n - M_{n-1}) = \frac{M_n {h_n}^2}{2h_n} + \frac{y_{\mathrm{n}} - y_{\mathrm{n-1}}}{h_n} - \frac{h_{\mathrm{n}}}{6}(M_n - M_{n-1}) = \frac{M_n h_n}{2} + \frac{y_{\mathrm{n}} - y_{\mathrm{n-1}}}{h_n} - \frac{h_{\mathrm{n}}}{6}(M_n - M_{n-1}) = \frac{h_n}{3}M_n - \frac{h_{\mathrm{n}}}{6}M_{n-1} + \frac{y_{\mathrm{n}} - y_{\mathrm{n-1}}}{h_n}$

# 自然スプライン

- $\mathrm{HM} = \mathrm{Y}$
  - $\frac{h_{n-1}}{6}M_{n-2} + \frac{h_{n-1}+h_n}{3}M_{n-1} + \frac{h_n}{6}M_n = \frac{y_n - y_{n-1}}{h_n} - \frac{y_{n-1} - y_{n-2}}{h_{n-1}}$
  - $M_2 = M_n = 0$
- $\mathrm{M} = \begin{bmatrix} M_2 \\ M_3 \\ \vdots \\ M_{n-2} \\ M_{n-1} \end{bmatrix}$ $\quad \mathrm{Y} = \begin{bmatrix} \frac{y_3 - y_2}{h_3} - \frac{y_2 - y_1}{h_2} \\ \frac{y_4 - y_3}{h_4} - \frac{y_3 - y_2}{h_3} \\ \frac{y_5 - y_4}{h_5} - \frac{y_4 - y_{13}}{h_4} \\ \vdots \\ \frac{y_{n-1} - y_{n-2}}{h_{n-1}} - \frac{y_{n-2} - y_{n-3}}{h_{n-2}} \\ \frac{y_n - y_{n-1}}{h_n} - \frac{y_{n-1} - y_{n-2}}{h_{n-1}} \end{bmatrix}$

# 自然スプライン

$$
-\begin{bmatrix}
\frac{h_2+h_3}{3} & \frac{h_3}{6} & 0 & & & & \\
\frac{h_3}{6} & \frac{h_3+h_4}{3} & \frac{h_4}{6} & 0 & & & \\
0 & \frac{h_4}{6} & \frac{h_4+h_5}{3} & \frac{h_5}{6} & & & \\
 & & & & \ddots & & \\
 & & & & \frac{h_{n-2}}{6} & \frac{h_{n-2}+h_{n-1}}{3} & \frac{h_{n-1}}{6} \\
 & & & & 0 & \frac{h_{n-1}}{6} & \frac{h_{n-1}+h_n}{3}
\end{bmatrix}
$$

# 自然スプラインの滑らかさ

- 区間$[x_1, x_n]$で自然スプライン関数が最も滑らかであることを示す
  - 補間点$x_i$ $(i = 1, \cdots, n)$とその関数値$f(x_i)$ $(i = 1, \cdots, n)$を考える
  - $C^2$級である自然スプライン関数$S(x)$と$C^2$級である他の補間関数$g(x)$を考える
    - $\int_{x_1}^{x_n} \{g''(x)\}^2 dx$が最小となるとき，その補間関数は凸凹が最も小さく，最も滑らかな補間関数となる
      - $\{g''(x)\}^2 = \{g''(x) - S''(x)\}^2 + 2g''(x)S''(x) - \{S''(x)\}^2 = \{g''(x) - S''(x)\}^2 + 2\{g''(x) - S''(x)\}S''(x) + \{S''(x)\}^2$

# 自然スプラインの滑らかさ

- 第2項の積分（部分積分）
  - $\int_{x_1}^{x_n}\{g''(x)-S''(x)\}S''(x)dx = [\{g'(x)-S'(x)\}S''(x)]_{x_1}^{x_n} - \int_{x_1}^{x_n}\{g'(x)-S'(x)\}S'''(x)dx$
    - 右辺第1項は自然スプライン関数の条件より$S''(x_1) = S''(x_n) = 0$
      - $= \{g'(x_n)-S'(x_n)\}S''(x_n) - \{g'(x_1)-S'(x_1)\}S''(x_1) = 0$
    - 右辺第2項は，$S(x)$が3次関数なので$S'''(x) = K$（定数）
      - $\int_{x_1}^{x_n}\{g'(x)-S'(x)\}Kdx = K[\{g'(x_n)-S'(x_n)\} - \{g'(x_1)-S'(x_1)\}] = 0$

# 自然スプラインの滑らかさ

- 第2項 $\int_{x_1}^{x_n}\{g''(x)-S''(x)\}S''(x)dx=0$
- $\int_{x_1}^{x_n}\{g''(x)\}^2dx$

  $=\displaystyle\int_{x_1}^{x_n}\{g''(x)-S''(x)\}^2dx+\int_{x_1}^{x_n}\{S''(x)\}^2dx$

  $\geq\displaystyle\int_{x_1}^{x_n}\{S''(x)\}^2dx$

  – 任意の$C^2$級関数の中で自然スプライン関数の凸凹が最も小さい→もっとも滑らか