

数式化によって 3次元測定から手舟状骨の形態を評価する試み

福 田 祥 二

広島大学医学部整形外科学講座 (主任: 生田義和教授)

受付 平成 13 年 7 月 10 日

受理 平成 13 年 10 月 3 日

舟状骨骨折は症状が軽度のため, 発見されたときには陳旧例となり, 骨吸収によって正常の形態が崩れていることも少なくない。手術時の整復操作は, 術者の経験に基づいた勘に頼らざるを得ないのが現状である。3D CT からの実物大モデルを再構築することができれば, より正確な治療に結びつくと考えた著者は, 舟状骨の形態計測を行うとともに, 3D CT 画像データからの再構築を試みた。本論文は, その基礎データを解析したものである。対象は, 系統解剖用遺体40体 (男性23体, 女性17体) の内, 左右対の摘出が11体 (男性9体, 女性2体) に可能であったが, 残りの29体は片側だけの摘出となったため, 51手 (男性32手, 女性19手), 右27手, 左24手であった。測定には接触型3次元スキャナーを使用した。男女間では, 長軸長に有意差を認め, フーリエ係数には認めなかった。左右では, 長軸長, フーリエ係数ともに有意差を認めなかった。Compson らの形態分類に従い3型に分類可能であったが, その3型間のフーリエ係数には有意差を認めた。また, 全体, 男女別, 型別に, 各々の中央値を用いて再生曲線を作成した。この曲線を立体モデル化すれば, 舟状骨骨折の手術時に本来の掌側面をどの様に再建すべきかの目安として, 臨床応用が可能と思われた。10手に関しては, 3次元スキャナー計測群, 舟状骨単体の3D CT からの計測群と手関節3D CT から切り出した舟状骨の計測群の長軸長とフーリエ係数の比較検討をおこなった。計測システムの拡大率を補正できれば, 3D CT から作成されるモデルは実際の測定結果に近づくことがわかった。今回の画像処理システムでは, 手関節3D CT から舟状骨のモデルを作成することに関して誤差が大きかった。現状では, 健側手関節3D CT 画像の鏡面像から舟状骨を含むモデルを作製し, ある程度の拡大を考慮して臨床応用すべきだと考えた。

Key words : Fourier transformation, Morphological study, Scaphoid, Three-Dimensional CT

近年の画像処理技術の進歩によって, 複雑な手根骨の形態も比較的正確に把握できるようになってきた¹⁰⁾。とくに Three-Dimensional Computed Tomography (3D CT) システムの発達¹¹⁾によって手根骨の長さ, 体積, 表面積などの測定も可能となってきた⁶⁾。しかし, 個々の手根骨に注目した詳細な形態学的検討は少なく, その複雑な形状から数値的な検討は困難であった。著者は, 手根骨の中でも骨折の頻度が高く, その治療に難渋することがある舟状骨に注目した。舟状骨骨折は, 骨折自体による症状が軽いため, 発見が遅れることがある。発見されたときにはすでに陳旧例となり, 図1のように骨吸収によって, 正常の形態が崩れていることも少なくない。そのため, 陳旧例の舟状骨骨折

を整復するには, 術者の経験に基づいた勘に頼らざるを得ないのが現状である。また, 舟状骨は, その形状の複雑さから, 内固定に関しては, 技術的に容易であるとは言えない。実物大モデルが利用可能となれば, 舟状骨骨折手術時の整復の指標となり, より正確な内固定を短時間に行うための手術シミュレーション²⁾に適用できるはずである。頭部や股関節領域などでは, 現在3D CT からの実物大モデルが手術シミュレーションモデルとして臨床応用されている⁷⁾が, 手の外科領域ではその報告はない。そこで著者は, 解剖用遺体から舟状骨を摘出し, 3次元スキャナーを利用しての形態計測⁸⁾を行い, その形状を数値的に検討する方法を試みた。さらに, 手根骨などの小さな骨に対して

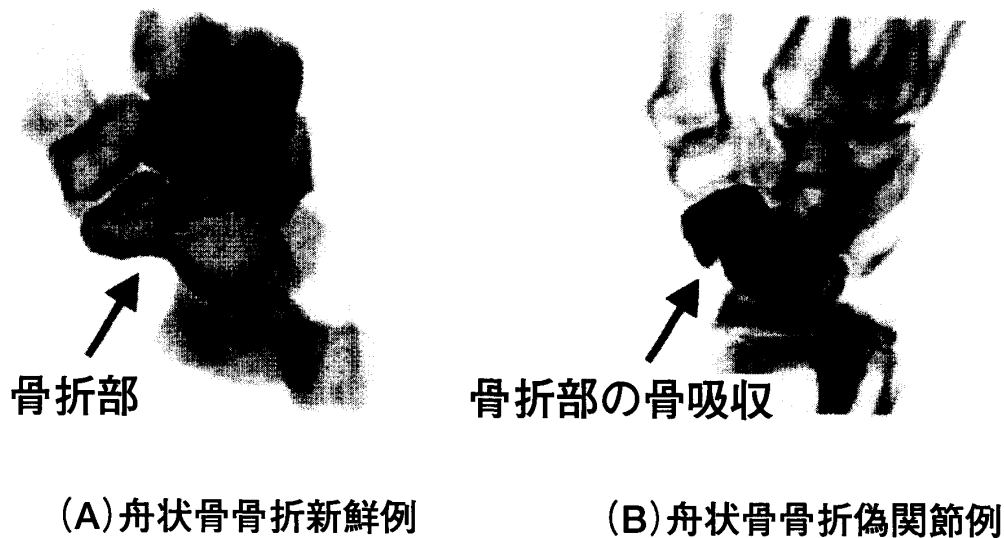


図1 舟状骨骨折 (3D CT 画像)

図 (A) は新鮮例である。骨折が治癒せずに骨折部に骨吸収がおきると図 (B) のように正常の形態を示さなくなる。

も実物大モデルを利用するために、3D CT の位置情報から舟状骨の輪郭データを取り出し、実際に測定したデータとの比較を行うことによって、より正確なモデルを作成する方法を検討した。

対象と方法

対象は、橈骨遠位端骨折後などの手関節に明らかな変形を有する例を除外した系統解剖用遺体(広島大学) 40体 (男性23体, 女性17体), 51手 (男性32手, 女性19手), 右27手, 左24手であった。左右対の摘出が11体 (男性9体, 女性2体) に可能であった。平均身長は, 男性 165.7 cm, 女性 150.9 cm であり, 死亡時年齢は, 67歳から94歳, 平均84歳であった。掌側アプローチで舟状骨に到達し, 軟骨, 骨膜を傷つけないよう注意深く周囲組織を剥離した。ついで背側アプローチに移り, 舟状骨を完全に分離, 摘出した。

摘出した舟状骨の測定には, Roland 社製, 接触型3次元スキャナー PICZA® (広島工業大学) を使用した。この3次元スキャナーはプローベ先端についたセンサーが座標上を移動し, 設置された検体に接触することにより, その3次元座標を記録するものであり, 精度は最高 0.05 mm であった。検体である舟状骨の長軸を X 軸方向にあわせ, Z 軸方向を決定するために, 舟状骨の結節部が直上を向くように設置した。センサーに対する舟状骨の掌側面を 0.5 mm 間隔で取り込み, これを DXF (Drawing Interchange Format) 形式で保存した。3次元デザインソフト (auto.des.sys 社

製 form・Z®) で平行・回転移動を行い, 舟状骨の長軸を X 軸とし, 長軸から結節部頂点への垂線を Z 軸とした (図2)。まず, この状態で長軸長を測定し, X Y 平面における画像を Compson からの分類に基づき 3 型に分類した。次に, 舟状骨長軸上の結節部の頂点を通る曲線を, X Z 平面上の画像から取り出した。接触型3次元スキャナーの特性として辺縁部の誤差が大きくなるため, 結節部から体部の頂点を通る曲線を取り出すこととした。この曲線が通る部位は, 図1に示すように, 舟状骨骨折が最も起こりやすい部位であり, 評価対象として適当である (図3)。この曲線の位置情報を数値化するために, 3次元グラフィックソフト (Copyright 社製 Shade®) を利用し text 形式に変換した。以上の操作で曲線の座標を数値として取り出すことが可能となった。

この曲線に対して, 開曲線にも適用可能な P 形記述子⁹⁾c を用いたフーリエ変換³⁾を行った (表1)。複素数値関数を用いて計算しているため, P 形記述子 c の実数部を $\text{Re}(c)$, 虚数部を $\text{Im}(c)$ と表現した。また計算上, 曲線を有限個に離散化するために, 曲線を長さ δ の n 本の折線図形と考え, これを曲線と同一視することとした。変換には広島工業大学が作成したソフトを使用した。

この係数と曲線 C の長さを n 等分した距離 δ から計算される N 次の再生曲線 C_N は, P 形記述子 c のうちの $2N+1$ 個の低域成分で記述された曲線であり, 原曲線 C のある種の近似になっている。P 形記述子は,

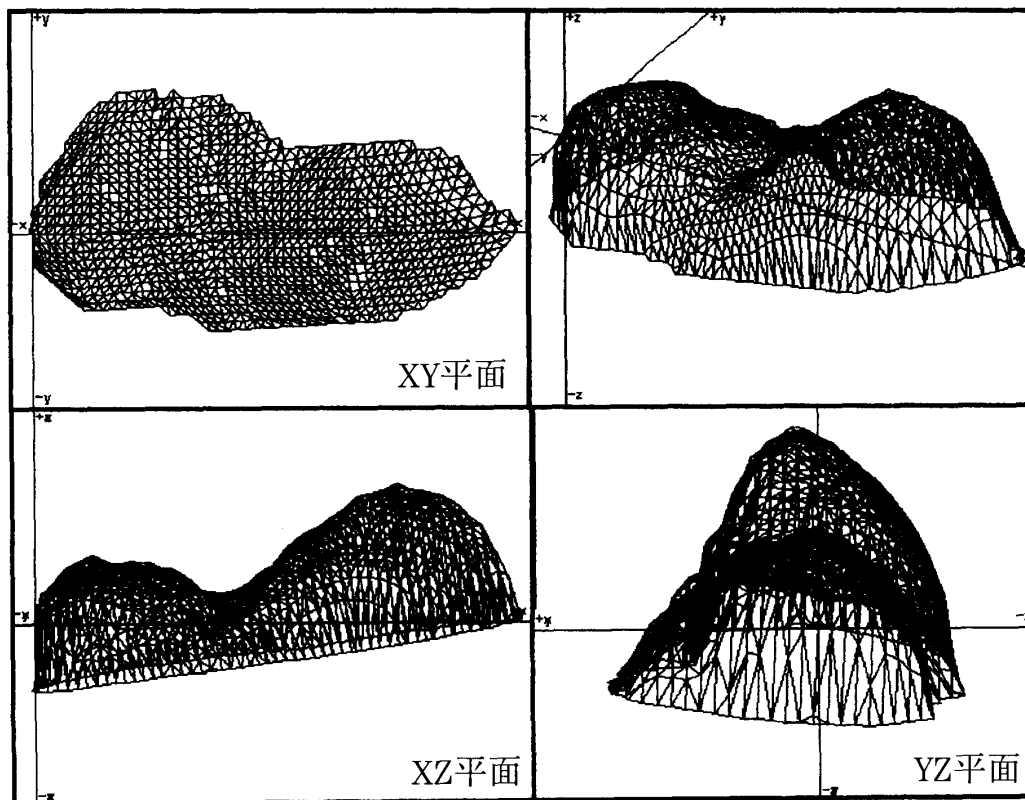


図2 3次元スキャナー画像からの軸の決定と曲線の切り出し
舟状骨の長軸をX軸とし、長軸から結節部頂点への垂線をZ軸とする。
XZ平面上の輪郭が、舟状骨長軸上の結節部の頂点を通る曲線である。

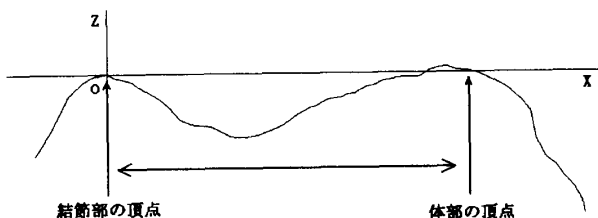


図3 評価対象となる曲線
図2に示したXZ平面上の輪郭から、結節部から体部の頂点を通る曲線を取り出し評価の対象とした。

曲がりの情報を被展開関数としているため、視覚との整合性がよいと言われている。再生曲線の視覚的な外形と細部は、P形記述子のそれぞれ低域部分、高域部分に対応しているとみることができる。再生曲線をグラフ化すると、図4のように次数Nの値が大きいくほど、曲線 C_N は原曲線と等しくなる。一方、再生曲線の次数Nを小さくしていくと、ある所からは再生曲線は、原曲線のパターンとして認識できなくなる。認識における物体を把握できる範囲をパターンクラスと呼ぶ

表1 フーリエ変換（開曲線にも適用可能なP形記述子）
P形記述子 c を $\hat{c}(k)$ とし、 $|k| > N$ である高域成分を0と定義する

$$\hat{c}(k) = \begin{cases} c(k) & (k=0, 1, 2, \dots, n/2) \\ c(n+k) & (k=-n/2+1, \dots, -1) \\ 0 & (|k| > N) \end{cases}$$

複素数値関数によるN次のP表現

$$\omega_N(j) = \sum_{k=-N}^N \hat{c}(k) \exp\left(2\pi i \frac{jk}{n}\right)$$

$i = \sqrt{-1}$ は、虚数単位

曲線CのN次の再生曲線 C_N を表す式

$$Z_N(j) = Z_N(0) + \delta \sum_{r=1}^{j-1} \omega_N(r)$$

ただし、 $Z_N(0) = Z(0)$ 、 δ は曲線Cの長さの n 等分値
(N, j, r は正の整数、 n は正の偶数)

平面上の曲線を周波数領域で記述する方法にフーリエ記述子がある。連続曲線上の曲率を曲線に沿って積分したものを全曲率関数と言うが、この全曲率関数を指数関数の指数部にもつ複素数値関数をフーリエ展開し、得られた係数をP形記述子 c とすれば、開曲線にも適用可能となる。 δ は再生曲線作成時に、その大きさを決定するためのものであり、曲線の形状には関与していない。

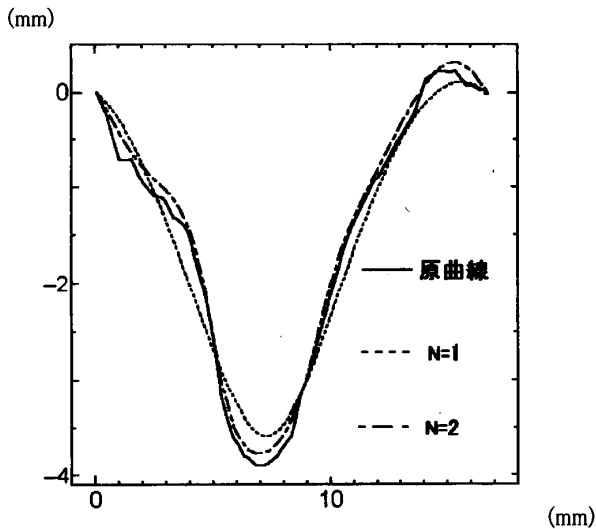


図4 Nの変化による近似曲線の比較

N次の再生曲線 C_N はP形記述子 c のうちの $2N+1$ 個の低域成分で記述された曲線であり, Nの値が大きいくほど曲線 C_N は元の曲線と等しくなる。横軸は, 舟状骨の結節部の頂点から体部の頂点までの長さを示し, 縦軸は各頂点からの舟状骨腰部までの深さを示すものである。原曲線は, 測定対象曲線, 全51例の中の1つである。

が, このパターンクラス情報が失われてしまう直前の次数を, そのパターンクラスの弁別閾と呼び N^* で表す。上坂⁹⁾は, 一筆書きができる英小文字筆記体のパターン22種の弁別閾を求め, 文字 c, e, l の筆記体のような単純な形状の弁別閾 $N^*=1$ であるとしている。今回求める曲線の形状であれば, その弁別閾 $N^*=1$ であると考えられた。よって再生曲線の形状の比較評価は, パターンクラス情報を保存する最小次数である $N=1$ で行うこととした。1次の再生曲線では, c_{n-1}, c_0, c_1 が評価対象となるが, 今回は $n=128$ に統一したので, c_{127}, c_0, c_1 項につき統計処理を行った。また c_{n-1} と c_1 は, 虚軸に対して理論的には鏡面像に近くなるため, 比較検討には c_0 と c_1 のみを用いた。これらのフーリエ係数, および距離 δ を統計処理し, 代表値を用いて再生曲線を作成した。また, 男女および左右別に長軸長とフーリエ係数を比較した。さらに, Compson¹⁰⁾の分類に従った3型について, そのフーリエ係数を比較した。距離 δ は再生曲線作成時に, その大きさを決定するために必要であるが, 曲線の形状には関与していないので, 比較の対象とはしていない。

10手に関しては, 舟状骨摘出前に手関節の3D CT

撮影を行い, 3次元スキャナーでの測定後にノギスで長軸長を計測し, さらに舟状骨単体の3D CT撮影を追加した。測定幅 0.63 mm, スライス厚 1.25 mm の multi slice CT system (GE 横河メディカルシステム社製 LightSpeed QX/i[®]) を使用し, できるだけ舟状骨の長軸が測定方向と直交するようにした。舟状骨単体の3D CTを, DICOM形式に保存し, これをポリゴン処理の可能な3次元ソフト(Studio PON社製 Forge[®])を利用して再構築した。DXF形式に変換したデータを, 3次元スキャナーでの測定と同様に処理した。手関節の3D CTからの舟状骨単体の切り出しは, 外部に依頼した。DICOM形式に保存した3D CT画像から, 舟状骨の輪郭の点データを取り出し, その点群から舟状骨単体の3次元モデル構築を行った。DXF形式に変換したデータを, 3次元スキャナーでの測定と同様に処理した。3次元スキャナーからの計測群(S群), 舟状骨単体の3D CTからの計測群(C群), ならびに手関節3D CTから切り出した舟状骨の計測群(C_n 群)の比較検討を長軸長, フーリエ係数について行った。長軸長ではノギスでの計測値との比較も追加した。

各群における計測値の分布の差異に関する検定には統計学的手法⁵⁾を用いた。ノンパラメトリック検定で評価し, 対応のある2群の検定には Wilcoxon の符号付き順位検定, 対応のない2群には Mann-Whitney のU検定, 対応のある多群には Friedman の検定, 対応のない多群には Kruskal-Wallis の検定, 多群間の比較には Tukey の多重比較を使用した。危険率は5%とした。

成 績

全51例の長軸長, c_{127}, c_0, c_1 の実数部, 虚数部, 原曲線Cの長さを n 等分した距離 δ と, 正規分布としては不適当であったので, 中央値を代表値とした⁴⁾(表2)。 c_{127}, c_0, c_1 の実数部, 虚数部, 距離 δ の中央値を用いて, 図5に示す曲線を作成した。

男女の比較では, 長軸長は有意に男性が大きかった。しかし係数では, $\text{Re}(c_0), \text{Im}(c_0), \text{Re}(c_1), \text{Im}(c_1)$ のすべてにおいて, 有意差は認められなかった(表3)。作成した男女別の再生曲線は, 係数の評価と同様に, 形状の明らかな差はなかった(図6-A)。左右摘出できた11例については, 長軸長, $\text{Re}(c_0), \text{Im}(c_0), \text{Re}(c_1), \text{Im}(c_1)$ のすべてで, 左右での有意差を認められなかった(表3)。Compson¹⁰⁾の分類に従えば, XY平面上での結節部と体部の面積がほぼ等しい type 1 が23例(45.10%), 結節部が体部に比較して発達している type 2 が14例(27.45%), 体部が結節部

に比較して発達している type 3 が14例 (27.45%) であった (表4)。男女とも, type 1 が40%以上を占め, 最も多かった。男性は, type 1, 2 の順に多く, 女性は, type 1 と 3 が同数であった。係数の比較では,

表2 全51例の記述統計結果

	中央値	歪度	尖度	平均値
長軸長	27.8 mm	0.164	-0.767	28.2 mm
Re (c ₀)	115.022	-0.255	-0.618	114.505
Im (c ₀)	0.042	0.255	-0.088	0.060
Re (c ₁)	-25.305	0.120	-0.229	-24.922
Im (c ₁)	-15.187	0.279	-0.907	-13.813
Re (c ₁₂₇)	27.816	-0.140	0.155	27.643
Im (c ₁₂₇)	-19.037	0.374	-0.440	-17.811
距離 δ	0.151 mm	-0.124	-0.838	0.149 mm

c : P形記述子

Re (c) : P形記述子の実数部

Im (c) : P形記述子の虚数部

δ : 原曲線Cの長さを n 等分した距離 (n = 128)

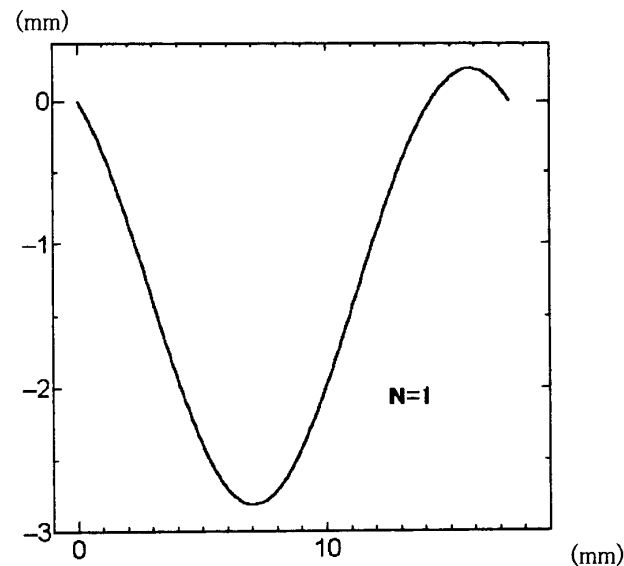


図5 各項の代表値を用いた再生曲線

係数, 距離 δとも中央値 (表2) を代表値として, 舟状骨長軸上の掌側面における結節部の頂点から体部の頂点までの再生曲線を計算しグラフ化した。軸は図4と同様である。

表3 男女, 左右の比較

	長軸長	Re (c ₀)	Im (c ₀)	Re (c ₁)	Im (c ₁)
男女差 (Mann-Whitney のU検定)	<0.01	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
左右差 (Wilcoxon の符号付き順位検定)	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.

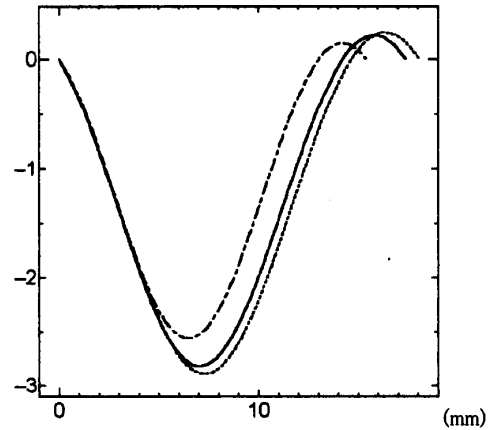
N.S. : not significant

c : P形記述子, Re (c) : P形記述子の実数部, Im (c) : P形記述子の虚数部

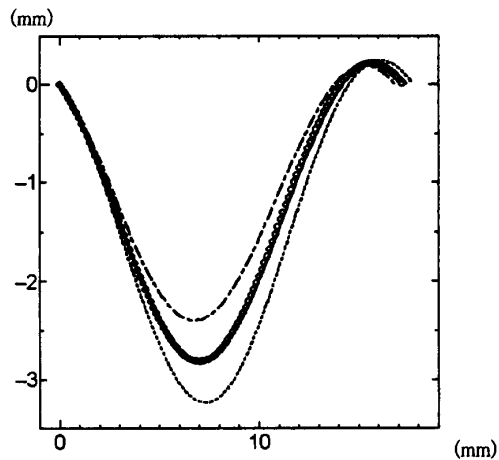
Re (c₀), Re (c₁) において, 型間の有意差が認められ, Im (c₀), Im (c₁) に有意差を認めなかった (表5)。作成した型別の再生曲線は, 図6-Bに示すように type 1 は全体の再生曲線に近い曲線を描き, type 2 は谷が深く, type 3 は谷が浅い傾向がみられた。

3D CT 撮影が可能であった10手の舟状骨の長軸長

(mm)



— 全体の再生曲線 男性の再生曲線 - - - 女性の再生曲線
(A) 男女別再生曲線



— 全体の再生曲線
○ Type 1. Equally developed pole
--- Type 2. Underdeveloped proximal pole
- · - Type 3. Underdeveloped distal pole
(B) Compsonらの分類別の再生曲線

図6 男女別・Compsonらの分類別の再生曲線
係数, 距離 δとも, 各々の中央値を代表値として作成した。軸は図4と同様である。

表4 舟状骨の形態分類

	男性	女性	計 (例)
Type 1	15	8	23
Type 2	11	3	14
Type 3	6	8	14
	32	19	51

Type 1. Equally developed pole
 Type 2. Underdeveloped proximal pole
 Type 3. Underdeveloped distal pole
 (分類は Compson ら (1994) による)

表5 形態分類後の係数比較

(Kruskal-Wallis の検定)

	Re (c ₀)	Im (c ₀)	Re (c ₁)	Im (c ₁)
	<0.01	N.S.	<0.05	N.S.
Type 1 (中央値)	113.956	0.010	-24.739	-15.029
Type 2 (中央値)	112.426	0.116	-27.467	-16.870
Type 3 (中央値)	118.235	0.057	-24.213	-13.163

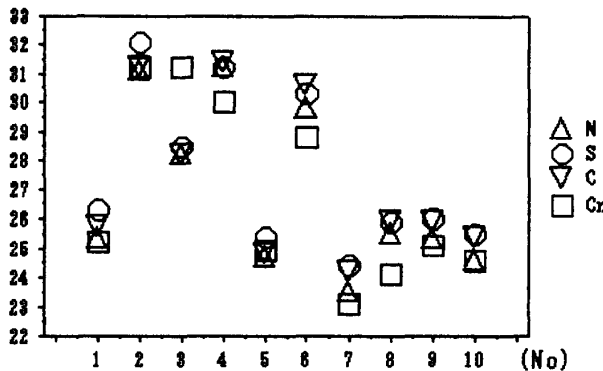
(分類は Compson ら (1994) による)

N.S : not significant

Re (c) : P 形記述子の実数部

Im (c) : P 形記述子の虚数部

(mm)

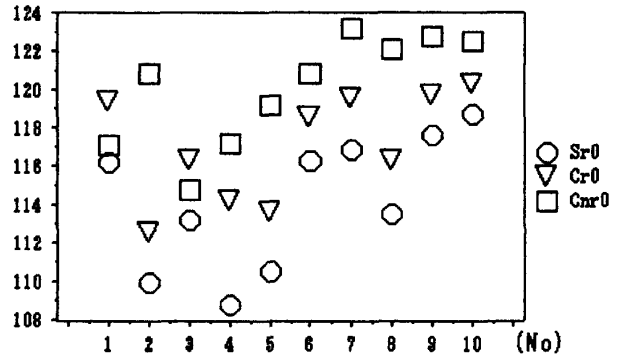


縦軸：長軸長
 横軸：各種計測を行った舟状骨の番号
 N: ノギスでの計測値
 S: 3次元スキャナーからの計測値
 C: 舟状骨単体の3D CT画像からの計測値
 Cn: 手関節3D CTから切り出した舟状骨の計測値

図7 長軸の計測法による比較

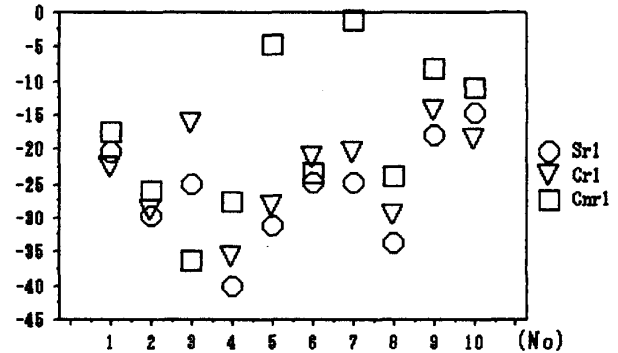
症例ごとに各計測の数値を散布図とした。

は、図7のように各計測法によって異なる測定値を示した。係数 Re (c₀), Re (c₁) も同様に、異なる測定値を示した (図8)。各計測群間の長軸長に Friedman の検定を行うと、群間の有意差を認めた (表6)。Tukey の多重比較の結果では、ノギスでの計測群 (N 群) と3次元スキャナーからの計測群 (S 群) 間と、



(A) 係数 Re(c₀)

縦軸：係数 Re(c₀) P形記述子の実数部
 横軸：各種計測を行った舟状骨の番号
 Sr0: 3次元スキャナーからの計測値
 Cr0: 舟状骨単体の3D CT画像からの計測値
 Cnr0: 手関節3D CTから切り出した舟状骨の計測値



(B) 係数 Re(c₁)

縦軸：係数 Re(c₁) P形記述子の実数部
 横軸：各種計測を行った舟状骨の番号
 Sr1: 3次元スキャナーからの計測値
 Cr1: 舟状骨単体の3D CT画像からの計測値
 Cnr1: 手関節3D CTから切り出した舟状骨の計測値

図8 係数の計測法による比較

症例ごとに各計測の数値を散布図とした。

3次元スキャナーからの計測群 (S 群) と手関節 3D CT から切り出した舟状骨の計測群 (Cn 群) 間に、長軸長の有意差を認めた (表6-a)。また、各計測群間の係数に Friedman の検定を行うと、Re (c₀), Re (c₁) に計測群間の有意差を認めた。3次元スキャナーからの計測群 (S 群) と舟状骨単体の 3D CT から計測群 (C 群) 間の係数 Re (c₀) に有意差を認め、3次元スキャナーからの計測群 (S 群) と手関節 3D CT から切り出した舟状骨の計測群 (Cn 群) 間にも、係数 Re (c₀) に有意差を認めた (表6-b)。

考 察

3次元計測および評価で最も重要なものは、普遍性のある座標軸設定である。長軸と結節部はすべての舟

表6 各計測群の長軸長と係数の比較

(a) 長軸長 (Friedman の検定 p<0.01)

	N 群	S 群	C 群	Cn 群
平均 (mm)	26.92	27.56	27.33	26.82
標準偏差	2.887	2.747	2.782	3.124
中央値 (mm)	25.40	26.15	25.90	25.15

(Tukey の多重比較)

N 群 vs. S 群	<0.01
N 群 vs. C 群	N.S.
N 群 vs. Cn 群	N.S.
S 群 vs. C 群	N.S.
S 群 vs. Cn 群	<0.01
C 群 vs. Cn 群	N.S.

(b) 係数 (Friedman の検定)

	Re (c ₀)	Im (c ₀)	Re (c ₁)	Im (c ₁)
	<0.01	N.S.	<0.01	N.S.
平均	114.126	-0.140	-26.246	-15.532
S 群 標準偏差	3.492	0.855	7.617	7.413
中央値	114.833	-0.202	-24.937	-15.567
平均	117.001	-0.248	-23.743	-15.598
C 群 標準偏差	2.835	0.716	6.768	5.928
中央値	117.367	-0.284	-22.126	-15.044
平均	120.029	0.079	-18.002	-16.279
Cn 群 標準偏差	2.878	0.892	11.403	5.647
中央値	120.846	0.110	-20.529	-17.085

(Tukey の多重比較)

	Re (c ₀)	Im (c ₀)	Re (c ₁)	Im (c ₁)
S 群 vs. C 群	<0.05	N.S.	N.S.	N.S.
S 群 vs. Cn 群	<0.01	N.S.	N.S.	N.S.
C 群 vs. Cn 群	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.

N 群：ノギスでの計測群

S 群：3次元スキャナーからの計測群

C 群：舟状骨単体の3D CTからの計測群

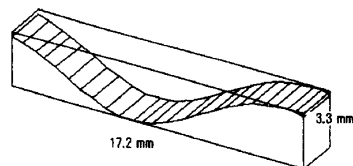
Cn 群：手関節3D CTから切り出した舟状骨の計測群

N.S.：not significant

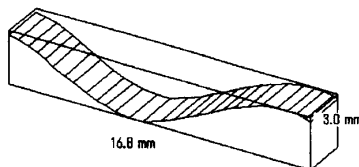
Re (c)：P形記述子の実数部

Im (c)：P形記述子の虚数部

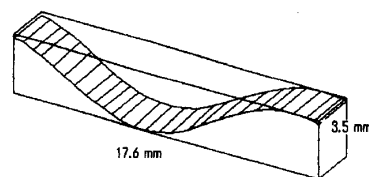
状骨に存在するため、軸の設定には十分適しているものと考られる。最初は同様の曲線を多項式近似によって評価しようと試みたが、多項式による形状評価にはどうしても長さや空間移動といった形状認識の面で限界があった。そこで、パターン認識による形状の評価を考え、フーリエ変換を用いることとした。フーリエ変換は、医学分野ではCT、MRIなどの画像作成に利用されていることが知られている。この形状評価によって、曲線の大きさや位置に関わらず、個々の係数



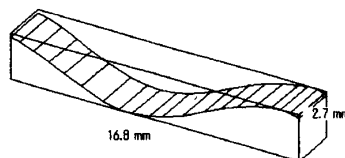
(A) 全体の中央値を代表値とした再生曲線の3次元化係数、各頂点間の長さともに全例の中央値としているため、単独でも舟状骨骨折の手術時に利用可能である。



Type 1. Equally developed pole



Type 2. Underdeveloped proximal pole



Type 3. Underdeveloped distal pole

(B) Compsonらの分類別再生曲線の3次元化

図9 代表値の再生曲線のモデル化

再生曲線をグラフィック処理により3次元化したもの。各モデルの長さは、任意に設定可能であるが、各々の中央値とした。高さは谷の深さを示すものである。手術時のモデルとして使用する際には、健側のX線像から型分類を行い、各頂点間の距離を長さに設定すれば、より詳しいモデルとして利用可能である。

の独立した評価が可能となった。

今回の代表値を用いた再生曲線は、3次元モデル作製器 MODERA® (広島工業大学) を使用して、立体的なモデルとすることが可能である (図9-A)。このモデルの大きさは、モデルの作成過程で任意に設定可能であるので、全51例の結節部と体部の頂点間の直線距離を求め、その中央値をモデルの長さとした。このモデルは、舟状骨骨折の陳旧例の手術時に、掌側面の再建の目安として利用可能と考えている。またCompsonら¹⁾の形態分類の3型間には、フーリエ係数に有意差があるため、型ごとに異なった再生曲線が作成可能である。左右のフーリエ係数に有意差がなかつ

たため、臨床応用時には健側のX線像を参考にして、その型と大きさにあわせたモデルが利用可能であると考へた。各モデルの長さは、型ごとの中央値とした(図9-B)。

3D CT 画像データとの比較では、長軸長と $Re(c_0)$, $Re(c_1)$ のフーリエ係数に計測群間の有意差を認めた。微妙なカーブを形成している舟状骨をノギスで測定することは、長軸が決めにくいことと、軟部組織を含めた測定になるため組織を圧迫することになり、測定誤差を生じたものと思われた。スキャナーによる測定も、測定間隔(0.5 mm)未満の器械精度上の誤差を含んでいた。舟状骨単体での3D CT撮影は、軟部組織と空気の信号強度が明らかに違うので、付着する軟部組織や軟骨も描出可能であるが、理論的には撮影の方向には測定間隔の倍、すなわち 1.25×2 mm 未満の誤差があり、スライス面には、 0.176×2 mm 未満の器械精度上の誤差が存在していた。舟状骨の長軸が撮影方

向と直交するように設置したが、測定方向に大きい誤差が残っていると考へられた。また、ポリゴン処理における誤差も考慮に入れる必要があつた。

手関節 3D CT からの舟状骨の切り出し像には、3D CT の器械精度上の誤差に加えて画像処理システムの精度が誤差として考へられた。現在のところ、軟骨と軟部組織の区別には、解剖学的な知識と、解像度の改善が必要で、現在の CT 画像では困難である。画像処理システムがソフト面、ハード面で外部依頼することなしに構築できれば、その誤差は舟状骨単体の 3D CT からの計測群(C群)により近いものに改善することができると考へられた。

3次元スキャナーからの計測群(S群)と、舟状骨単体の3D CTからの計測群(C群)間では、長軸長に有意差は無く、係数 $Re(c_0)$ に有意差があつた。長軸長と係数 $Re(c_0)$ における2群の散布図と回帰直線を図10に示すが、高い相関関係を持ち、規則性を持つ

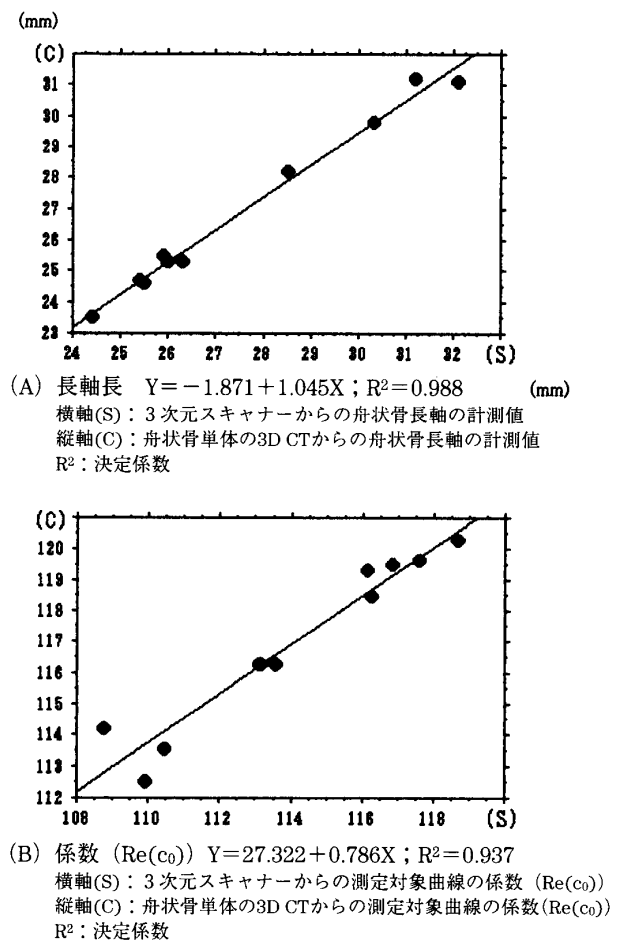


図10 3次元スキャナーからの計測群と舟状骨単体の3D CTからの計測群の比較
 S群, C群の長軸長と係数 $Re(c_0)$ は、高い相関関係を持ち規則性を持った拡大が生じていた。

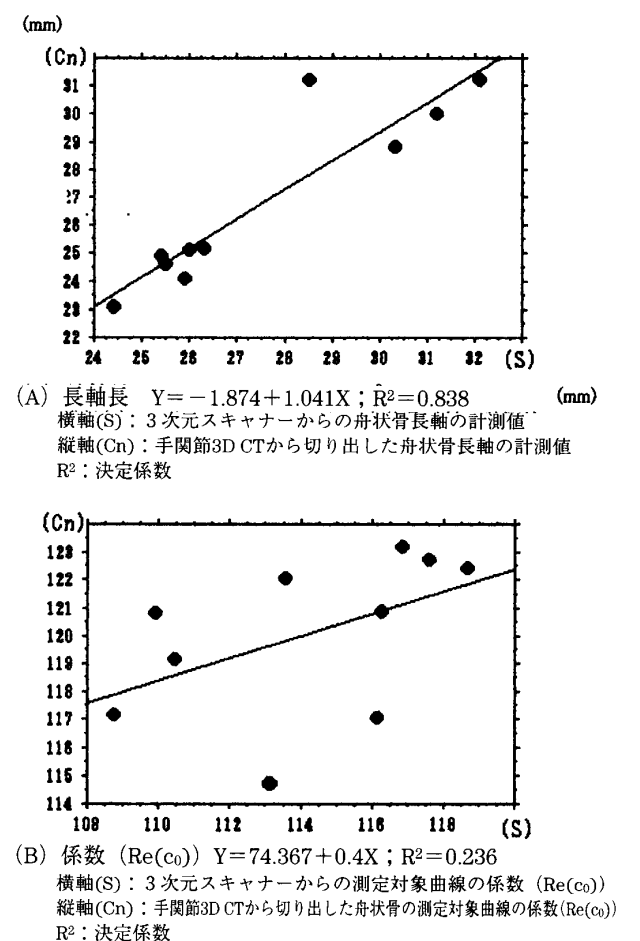


図11 3次元スキャナーからの計測群と手関節3D CTから切り出した舟状骨の計測群の比較
 S群, Cn群の長軸長は相関していたが係数は相関していなかった。

た拡大が生じていた。係数は、XZ平面上の舟状骨の輪郭を近似するものと考えられるので、長軸方向（X軸方向）のみならず、Z軸方向にも規則性を持った拡大が生じていたものと考えられた。計測システムの拡大率を補正できれば、3D CT から作成されるモデルは、より実際の測定結果に近づくと考えられた。一方、3次元スキャナーからの計測群（S群）と手関節3D CT から切り出した舟状骨の計測群（Cn群）間には、長軸長、係数 $Re(c_0)$ ともに有意差があった。長軸長と係数 $Re(c_0)$ におけるこの2群の散布図と回帰直線（図11）において、長軸長は相関していたが、係数は相関していなかった。よって、手関節3D CT から舟状骨を切り出してモデルを作成することに関しては、今回のシステムでは誤差が大きく正確性に欠けていたようであった。

以上より、舟状骨骨折のシュミレーションモデルとして、健側手関節の3D CT撮影が不可能な場合には、再生曲線の3次元モデルを利用し、健側手関節の3D CT撮影が可能であれば、3D CT画像の鏡面像から舟状骨を含むモデルを作製し、ある程度の拡大を考慮しながら利用することが、現状としては最適であると思われる。今後の課題として3D CTと、計測システムの拡大率をCT画像上の座標軸を元に計算し、画像処理システム上で補正を行えるように改良を加えていくつもりである。また、将来的には、画像処理システムを構築し、舟状骨単独のモデル作製を行っていきたいと考えている。

謝 辞

稿を終えるにあたり、御校閲を賜りました恩師生田義和教授に深甚なる謝意を表します。また、計測技術およびプログラム作成に関しまして、温かいご指導を頂きました広島工業大学工学部機械システム工学科木戸光夫教授、鈴木文博講師、広島工業大学との共同研究に、ご尽力いただきました広島大学医学部生化学第一講座川崎 尚名誉教授に深謝いたします。さらにご遺体の使用を許可いただきました解剖学第一講座安田

峯生名誉教授、3D CT計測にご理解、ご協力を頂きました放射線医学講座伊藤勝陽教授並びに放射線部の皆様、統計解析のご指導をしていただきました公衆衛生学講座宇多真一先生、最後に終始ご指導いただきました整形外科講座石田 治先生に厚く御礼申し上げます。

尚、本論文の要旨の一部は、第44回日本手の外科学会学術集会（2001、大阪）において発表した。

参 考 文 献

1. **Compson, J. P., Waterman, J. K. and Heatley, F. W.** 1994. The radiological anatomy of the scaphoid. Part I: Osteology. *J. Hand Surg. (Br.)* **19**: 183-187.
2. 泉田良一 2000. 三次元 CT を用いた関節手術シュミレーション. *関節外科* **19**: 52-63.
3. 小暮陽三 1999. 納得するフーリエ変換. 講談社, 東京.
4. 長田 理 1996. 臨床医のための統計テクノロジー. 中外医学社, 東京.
5. 長田 理 1999. 実例で考える統計解析の落とし穴. 克誠堂出版, 東京.
6. **Patterson, R. M., Elder, K. W., Viegas, S. F. and Buford, W. L.** 1995. Carpal bone anatomy measured by computer analysis of three-dimensional reconstructions of computed tomography images. *J. Hand Surg. (Am.)* **20**: 923-929.
7. 佐久間一郎 1999. 整形外科手術ロボットの展望. *関節外科* **18**: 6-13.
8. 角 光宏, 今村宏太郎, 岩崎勝郎 1995. 月状骨の形態に関する研究. *日手会誌* **12**: 84-88.
9. 上坂吉則 1984. 開曲線にも適用できる新しいフーリエ記述子. *電子通信学会論文誌 J67-A*: 166-173.
10. **Viegas, S. F., Hillman, G. R., Elder, K., Stoner, D. and Patterson, R. M.** 1993. Measurement of carpal bone geometry by computer analysis of three-dimensional CT images. *J. Hand Surg. (Am.)* **18**: 341-349.
11. 山下康行 2000. わかるヘリカル CT 撮像・読影の基本からマルチスライス CT まで. *メディカル・サイエンス・インターナショナル*, 東京.

A Morphological Study of the Scaphoid Bone using a Mathematical Technique and Three-Dimensional Measurements

Shoji FUKUDA

Department of Orthopaedic Surgery, Hiroshima University School of Medicine

(Director: Prof. Yoshikazu IKUTA)

As scaphoid fracture can be largely asymptomatic, diagnosis is often made after nonunion has already occurred. In order to properly treat scaphoid nonunion, precise reconstructive surgery is necessary. For this purpose, full-scale modeling of the scaphoid bone was attempted, utilizing data from 3D CT images. Data was directly measured from scaphoid bones using 51 hands removed from 40 cadavers, and derived from 3D CT images using 10 of the 51 hands. The resulting solid models of the regeneration curve, calculated using median data from the 51 scaphoid bones, seemed appropriate for clinical application as a standard of reconstruction in operations for scaphoid fracture. The model produced from 3D CT images more closely approximated physical measurements if the magnifying rate of the measurement system underwent correction. However, some degree of error is inevitable in restructuring independent models of scaphoid bone utilizing this system of image processing with data derived from 3D CT images. At present, the best way to utilize a model is from mirror images of 3D CT images of the other wrist joint, and then to apply this model clinically with due consideration of a certain amount of artifactual expansion.