

令和元年6月6日現在

機関番号：23903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K09213

研究課題名(和文) 三次元相同モデルを用いた寛骨形状の加齢性変化に関する定量的解析

研究課題名(英文) Studies on age and sex dependent morphological changes of the coxal bone by three dimensional analysis of the homologous models.

研究代表者

青木 康博 (AOKI, Yasuhiro)

名古屋市立大学・大学院医学研究科・教授

研究者番号：90202481

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：3次元CT画像から作成した相同モデル(男性：514例，女性：388例，16-100歳)を用いて，寛骨形状の性差および年齢依存性形態学的特徴を定量的に分析した。各性別および各年代の寛骨平均画像を主成分分析の結果をもとに作成した。男女の平均画像を基準モデルとし，各相同モデルの8,472の対応点の平均頂点間距離を測定することによって，93%以上の例で性別が正しく判定された。一方，いくつかの主成分は年齢と相関があり，腸骨稜の湾曲，弓状線および大坐骨切痕等の形状が影響していることが示された。しかし，年齢と相関のある主成分を使用した平均画像との比較による年代層推定においては，良好な結果を得られなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

性別判定，年齢推定は法医学的個人識別における重点課題であり，骨盤骨はヒトにおいて性的二型のもっとも顕著な骨であるとともに，恥骨結合面や寛骨耳状面の形態などが年齢推定に有用であることなどから，従来より重視されてきた。本研究では三次元像を相同モデリングにより標準化することにより三次元的定量解析を可能にし，主成分分析などを用いて，年齢依存性の形態変化の検索や性別判別法の開発を行い，一定の成果を得た。相同モデルは骨の三次元分析に利用可能なことが示され，今後の法医学分野における相同モデリングの利用促進が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Sexual dimorphisms and age-dependent morphological features of the human coxal bone were quantitatively analyzed using homologous models created from three-dimensional CT images of the pelvis (male: 514, female: 388 samples, age 16-100). Average coxal images of each sex and age decade were generated through principle component analyses (PCA). By measuring average point-to-point distances of 8472 corresponding points (ACPDs) between each homologous coxal image and the average images, the sex of more than 93% of the samples was correctly assigned. Some principal components (PCs) detected in PCA of the homologous models of the samples correlated fairly well with age and are affected by features of the curvature of the iliac crest, the arcuate line and the greater sciatic notch. However, neither multiple regression analysis using PCs related to age nor comparison of ACPDs with the average images of each age decade could produce accurate results for age decade assignment of unknown samples.

研究分野：法医学

キーワード：法医学 寛骨 相同モデル 三次元解析 多変量解析 年齢推定 性別判定 CT画像

1. 研究開始当初の背景

(1) 骨盤骨はヒトにおいて性的二型のもっとも顕著な骨であり、また恥骨結合面や寛骨耳状面の形態などが年齢推定に有用であることなどから、従来より法医人類学的に重視されてきた。性別判定については二次元計測を用いた方法が多く提唱されており、これらは、非計測学的方法に比して、客観的な数値に基づき判定・比較が可能であることや、熟練を必ずしも必要とせず、観察者間誤差が小さいなどの利点がある。しかし、一方で、計測学的方法が正確性において非計測学的方法より優れているとは必ずしもいえないことから、非計測学的判定方法も広く利用されている。これは年齢推定についても同様であって、むしろ年齢推定にはもっぱら非計測学的な方法が用いられていると言ってよい。計測学的方法の精度向上には三次元計測の導入による情報量の増大が有効であると推測された。

(2) 近年はマルチスライスヘリカル CT や非接触三次元形状計測装置の普及により、複雑な形状を有するものであっても精緻な三次元像を比較的容易に得ることができるようになり、研究・実務に利用されている。われわれはこれまで、骨盤骨 CT 画像から再構成した三次元画像、および恥骨標本を三次元スキャナで撮影した画像を利用し、大坐骨切痕や恥骨部の性差や、恥骨結合面や腸骨窩の加齢性変化などに関する定量的解析を行い、法医学実務への応用を試みてきた。その過程で、骨盤の様々な部位の形状が加齢によって変化することに着目するようになった。寛骨は湾曲やねじれといった立体的構造を有しており、表面や任意断面の距離計測などではその特徴を把握しにくい、標準化された三次元像を用いて統計処理等を行えば定量化が可能であると考えられた。

(3) 三次元像について統計処理を行うための画像再構成法の一つに、相同モデリングがある。相同モデルは、個々の形状データを同一点数、同一位相（トポロジー）のデータ点により再構成する、換言すれば各データ点を解剖学的に同じ意味をもつように定義することにより得られる。このモデルを利用して多数の寛骨像につき解析を行うことにより、その年齢依存性変化や性別による差異を三次元的・定量的に表現できると考えられた。

2. 研究の目的

生体および死体のマルチスライス CT 画像（DICOM データ）から再構成した計約 1,100 例の骨盤骨三次元像を用いて、寛骨の相同モデルを作成し、各種計測および主成分分析などの多変量解析を行って、現代日本人男女における年齢による形態変化および性差を定量化することを通じ、法医学的個人識別（年齢推定）にとって有用なデータを得るとともに、デジタルデータの特性を活かした三次元的解析法を提唱することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 寛骨三次元像の作成

902 例（男性 514 例、女性 388 例、16-100 歳）の CT 画像データ（DICOM データ）から、ソフトウェア（OsiriX, Pixmeo）のレンダリング機能を用いて骨盤骨の三次元像を再構成し、不要領域を削除して左右寛骨像を抽出した。これとは別に検証用として、214 例の CT 画像（男性 117 例、女性 97 例）を同様に処理した。

(2) テンプレート像の作成

男性骨盤模型の左寛骨を非接触三次元計測装置によりスキャンし、これについてポリゴン編集ソフトウェア (Artec Studio, データ・デザイン) を用いて、8,472 点群 (16,944 平面) からなる左寛骨テンプレート像を作成した。鏡像を右寛骨テンプレート像として利用した。

(3) 相同モデリング

それぞれの寛骨三次元像に、ソフトウェア (HBM Ruggle, メディック・エンジニアリング) 上で 35 の標記点を、テンプレート像のそれに対応する形でマークし、位置と大きさを合わせて両者を重ね合わせ、相同モデルを作成した (mHBM, AIST, 図 1)。

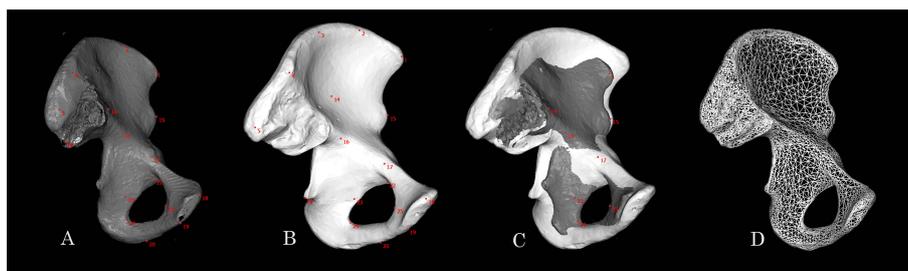


図 1 相同モデリング。A: 三次元 CT 像, B: 8472 の点群データからなるテンプレート像。A, B それぞれに 35 の標記点をマークし, A に B を重ね合わせ (C, A: 灰色, B: 白色), A の相同モデル (D) を作成する。

(4) 平均像との差異を利用した性別判定

男女別にそれぞれの相同モデルを用いて主成分分析を実施し、その各主成分の平均値を利用して、男女別、年代別の平均像を作成した。さらにそれらの平均像を用いて主成分分析を行い、男女間で最も大きな差異を示す主成分を求めた。また男女それぞれの平均主成分値をもとに、男女各 1 個の平均像を作成した。これを基準モデルとし、各相同モデルとの間の平均頂点間距離を算出し、どちらの基準モデルに近い (距離が短い) かにより性別判定を試みた。

(5) 年齢依存性を有する主成分の検索

男女それぞれの主成分分析により検出された各主成分につき、年齢との相関の有無を検索した。相関が認められた主成分を変数として、寛骨の年齢依存性形態変化を可視化した (HBM-Ruggle)。さらに、年代別平均像を用いた主成分により検出された各主成分についても、同様の検討を行った。

(6) 相同モデルを用いた年齢推定

① 主成分値による重回帰分析

赤池情報基準により選択した各主成分の値を説明変数、年齢を目的変数とした多重線形重回帰分析を行った。

② 年代別平均像を利用した年齢推定

検証用サンプルの年齢推定を、各年代別平均像との頂点間距離の比較により行い、妥当性について検討した。

(7) 寛骨形態の左右差に管する検討

各右寛骨相同モデルを鏡像反転し、同一人の左寛骨との頂点間距離を計測した。また、それらをまとめて男女別に主成分分析を行い、左右差を示す主成分を検出し、その主成分値に

影響を与える部位の特定を試みた。

4. 研究成果

(1) 性別判定

両性の相同モデルの平均像を用いた主成分分析では第1主成分値が男女間で顕著な差を示した(図2)。そこで、男女それぞれの平均第1主成分値を適用し、男性および女性の基準モデル画像を作成し、これらの基準モデルと検証用モデルとの平均頂点間距離により性別判定を試みたところ、正判率は男性で93.1%、女性94.8%であった。検証用の男性の右寛骨像と、女性および男性の基準画像との間の平均頂点間距離の平均値は、それぞれ4.17mmおよび3.46mmであった($p < 0.001$, 図3)。不一致例は主に若年男性および高齢女性に見られた。

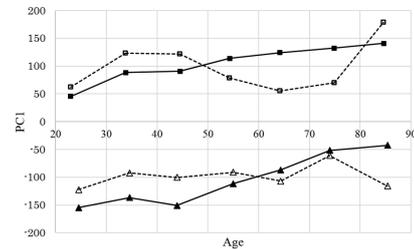


図2 男女の平均像の主成分分析における第1主成分値。各年齢層において顕著な性差を示している。■:男性左寛骨, □:男性右寛骨, ▲:女性左寛骨 △:女性右寛骨。

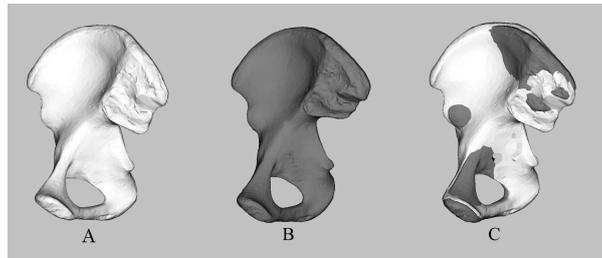


図3 女性の基準モデルへの男性のモデルの重ね合わせのプロセス。A:50歳男性の相同モデル, B:女性基準モデル, C:大きさを調整し平均頂点間距離が最小になるようにAをBに重ね合わせる。平均頂点間距離は5.72mmであった。一方Aと男性基準モデルとの間の平均頂点間距離は4.76mmであったので、男性寛骨と推定された。

(2) 相同モデルの主成分値と年齢との相関

各性別の左相同モデルの主成分分析により検出された成分の中で、男性の第1主成分(寄与率10.1%)および女性の第3主成分(同8.8%)が年齢と最も強い相関を示した(相関係数:男性0.45, 女性-0.59, 図4)。男性の第1主成分値と女性の第3主成分値をシフトさせることによって得られる左寛骨像の年齢依存性形態変化として、寛骨の幅の高さに対する比の増加, 腸骨稜, 弓状線および大坐骨切痕の曲率の増大が指摘でき, それらの傾向は女性でより顕著であった(図5)。右相同モデルでは、男女とも第1主成分(寄与率 男性11.4%, 女性性11.2%)がそれぞれ相関係数0.41, -0.66であった。各年代の平均像について同様に検討したところ、男女左右のいずれにおいても、第1主成分値が0.91~0.96(絶対値)と、年齢と強い相関を示した。主成分値に影響を与える部位は全サンプルの主成分分析の結果とほぼ同様であった(図6)。

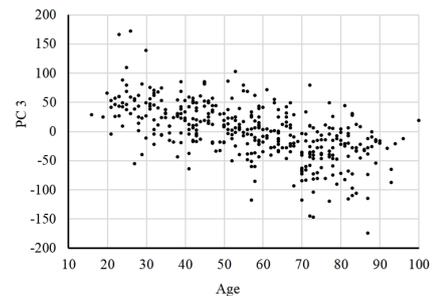


図4 女性左寛骨の主成分分析における第3主成分(PC3)と年齢との関係。相関係数:-0.59。

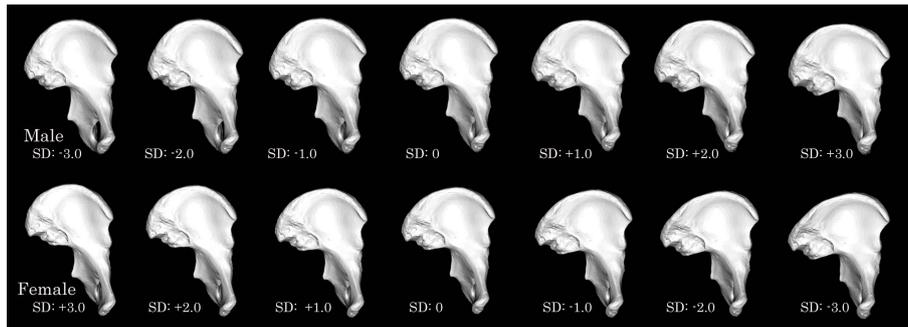


図5 年齢との相関を有する主成分（男性：第1主成分，女性：第3主成分）を変化させて像を再構成することにより，左寛骨の年齢依存性の形態変化を可視化した。上：男性，下：女性。左から右に行くにしたがい年齢が上がる。SDは当該主成分値の標準偏差であり，値は平均からのずれを表す。

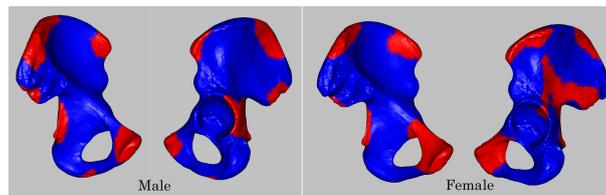


図6 左寛骨平均像の主成分分析において，年齢との高い相関を示す第1主成分値に影響を与える部位上位30%を赤色で示す。左：男性，右：女性。

(3) 年齢推定

①逐次選択法により選択された主成分を採用した重回帰分析によって求められた回帰式の決定係数は0.463~0.588であった。

②平均像との平均頂点間距離計測による年齢層推定による男女左右別平均正判率は17.6~29.7%にとどまった(図7)。個体差が大きく，決定係数が十分に高くないことが原因として考えられた。

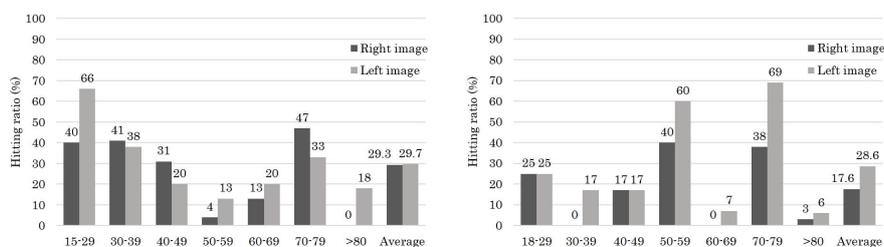


図7 年代別平均像との平均頂点間距離計測による検証用モデルの年齢層推定の結果。左：男性，右女性。数値は正判率。

(4) 左右寛骨の形態的左右差

左寛骨と右寛骨の鏡像間の平均頂点間距離は3.17mm(標準偏差:0.75mm)，男性のそれは2.80mm(同0.40mm)であり，女性の方が有意に大きかった($p < 0.001$)。主成分分析およびその視覚化の結果から，男女とも年齢層によらず腸骨窩の曲率等に差が見られた。

相同モデルを用いた主成分分析は，年齢依存性の形態変化や性差の分析法として有用と考えられた。相同モデル画像の再現性は平均誤差1mm程度であり，改善の余地はあるものの，骨の三次元分析に利用可能なことが示され，法医人類分野における相同モデリングの利用促進が期待される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

① Biwasaka H, Aoki Y, Takahashi Y, Fukuta M, Usui A *et al.* A quantitative morphological analysis of three-dimensional CT coxal bone images of contemporary Japanese using homologous models for sex and age estimation. *Legal Med* 2019; 36: 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.legalmed.2018.09.017> (査読あり)

[学会発表] (計 6 件)

① 琵琶坂 仁, 青木康博, 福田真未子, 白井章仁 他. 主成分分析を利用した骨盤骨の年齢依存性変化の解析 (第 3 報). 第 103 次日本法医学会学術全国集会. *日法医誌* 2019; 73: p109.

② 琵琶坂 仁, 青木康博, 白井章仁 他. 主成分分析を利用した骨盤骨の年齢依存性変化の解析 (第 2 報). 日本法科学技術学会第 24 回学術集会. *日本法科学技術学会誌* 2018; 23(Supple): 12.

③ Biwasaka H, Aoki Y, Fukuta M, Fujita S, Takamiya M, Dewa K, Usui A *et al.* Three-dimensional analysis of CT pelvic images using principle component analysis. 24th Congress of the International Academy of Legal Medicine. *Jpn J Legal Med* 2018; 72: 102-3.

④ 琵琶坂 仁, 成田孝仁, 青木康博, 藤田さちこ, 高宮正隆, 出羽厚二, 白井章仁 他. 主成分分析を利用した寛骨の加齢変化の解析 (第 3 報). 第 101 次日本法医学会学術全国集会. *日法医誌* 2017; 71: p76.

⑤ 琵琶坂 仁, 成田孝仁, 青木康博, 藤田さちこ, 高宮正隆, 出羽厚二, 白井章仁 他. 主成分分析を利用した寛骨の加齢変化の解析 (第 2 報). 第 100 次日本法医学会学術全国集会. *日法医誌* 2016; 70: p88.

⑥ 青木康博. 法医学的個人識別における定量的評価法に関する二・三のツール—DNA 鑑定の確率的評価および骨盤骨の 3 次元計測による年齢・性別推定. 第 100 次日本法医学会学術全国集会. *日法医誌* 2016; 70: p41-42.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：琵琶坂 仁

ローマ字氏名：(BIWASAKA, Hitoshi)

所属研究機関名：岩手医科大学

部局名：医学部

職名：非常勤講師

研究者番号：90405837

研究分担者氏名：白井章仁

ローマ字氏名：(USUI, Akihito)

所属研究機関名：東北大学

部局名：医学系研究科

職名：助教

研究者番号：90588394

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：谷尻豊寿

ローマ字氏名：(TANISJIRI, Toyohisa)