

## イメージマッチング法を用いた健常者、腱板断裂患者の肩関節 3次元動態解析

小藪直哉<sup>1</sup>, 岡田貴充<sup>1</sup>, 竹内直英<sup>1</sup>, 濱井敏<sup>1</sup>, 日垣秀彦<sup>2</sup>, 下戸健<sup>3</sup>,  
見明豪<sup>1</sup>, 中西芳応<sup>1</sup>, 千住隆博<sup>1</sup>, 中島康晴<sup>1</sup>

1. 九州大学大学院医学系学府 整形外科
2. 九州産業大学工学部 バイオロボティクス学科
3. 福岡工業大学工学研究科 情報システム工学科

### 1. はじめに

肩関節の挙上動作は日常生活の様々な動作においてよく行われ、肩関節機能上最も重要な動作の一つである<sup>1)2)</sup>。Codman<sup>1)</sup>は、肩関節挙上動作における上腕骨と肩甲骨の協調運動を肩甲上腕リズム (scapulohumeral rhythm、以下 SHR) と名付け、Inman ら<sup>3)</sup>は肩関節外転時における SHR の肩甲上腕関節と肩甲胸郭関節の運動の比が 2:1 であることを報告した。肩関節の動態解析は従来、X 線画像を用いた二次元動態解析<sup>4)</sup>から、体表面マーカー<sup>5)</sup>を用いた三次元動態解析が主流であった。しかしながら、体表面マーカーを用いる三次元動態解析は、並進運動ならびに回転運動の測定誤差が大きいことが欠点である<sup>5)</sup>。近年、高精度動態解析法として直接骨にピンを刺入し、そのピンに固定した磁気センサーを用いて肩関節の三次元動態を解析する方法を報告した研究<sup>6)</sup>が散見されるが、直接骨にピンを刺入するという侵襲的な手技であることが欠点とされる。そこで我々は非侵襲的な手法であり、かつ高精度動態解析が行えるイメージマッチング法<sup>7)8)</sup>に着目した。イメージマッチング法は Computed tomography (CT) 画像から作成する 3次元骨モデルと X 線透視画像を用いて骨動態を直接測定する手法<sup>7)8)</sup>である。この手法は膝関節や股関節の高精度動態解析法として多数の研究報告がなされている<sup>7)8)</sup>。

本研究の目的は、高精度動態解析法の一つであるイメージマッチング法を用いて健常者および腱板断裂患者の肩甲骨面挙上動作時における SHR を比較検討することである。

### 2. 研究方法

#### 2.1. 対象

対象は右肩関節に既往歴や愁訴のない健常者 5 名 (全例男性, 平均年齢  $33.0 \pm 2.5$  歳, 平均身長  $173.4 \pm 2.2$  cm, 平均体重  $67.6 \pm 6.6$  kg)、腱板広範囲断裂を有した患者 5 名 (男性 4 名, 女性 1 名, 平均年齢  $73.8 \pm 2.2$  歳, 平均身長  $161.6 \pm 6.8$  cm, 平均体重  $62.4 \pm 8.7$  kg) とされた。全ての被験者から Institutional Review Board に承認された本研究に参加する同意が得られた。

#### 2.2. 測定方法

撮影範囲 420 mm (横) × 420 mm (縦)、解像度 0.274 mm × 0.274 mm/pixel を有する Flat panel detector (FPD; Ultimax-I, Toshiba, Tochigi, Japan) を用いて、肩甲骨面挙上動作の連続 X 線正面像が撮影された (図 1)。肩甲骨面挙上動作は、肘関節伸展位でかつ親指を上立てつつ前腕外旋位となるように保持し、上肢を体幹につけた状態から肩関節を肩甲骨面上で最大挙上した動作と定義した。また、全被験者に対し上腕骨と肩甲骨を含む範囲を 512 × 512 pixel、スライス

厚 1 mm となるように CT 撮影 (Aquilion, Toshiba, Tochigi, Japan) を施行した (図 2)。

上腕骨と肩甲骨の解剖学的座標系は International Society of Biomechanics の基準に従い定義された<sup>9)</sup>。上腕骨の座標の原点は上腕骨頭を球体と見立てその中心と定義された。上腕骨の上下軸 (Z 軸) は上腕骨の原点、そして外側上顆と内側上顆の中点を結んだ線で、上腕骨の原点を指すように定義された。上腕骨の前後軸 (Y 軸) は外側上顆と内側上顆と上腕骨の原点によって形成される平面に対し垂直な線で、前方を指すように定義された。上腕骨の内外軸 (X 軸) は前述 2 軸の外積から算出され、右方を指すように定義された。次いで、肩甲骨の座標の原点は肩峰角と定義された。肩甲骨の内外軸 (X 軸) は肩甲棘三角と肩峰角を結んだ線で、肩峰角を指すように定義された。肩甲骨の前後軸 (Y 軸) は下角と肩峰角と肩甲棘三角によって形成される平面に対し垂直な線で、前方を指すように定義された。肩甲骨の上下軸 (Z 軸) は前述 2 軸の外積から算出され、上方を指すように定義された。

肩甲骨面挙上動作中の上腕骨と肩甲骨の 3 次元的位置と姿勢は画像相関を用いたイメージマッチング法にて定義された (図 3)。CT 撮影から得られたスライス画像データは、骨密度等の情報を含んだグレースケール 3 次元モデルの構築に用いられた。グレースケール 3 次元モデルは、 $0.351 \times 0.351 \times 1.0$  mm のボクセル (Volume cell, voxel) で構成される。このグレースケール 3 次元モデルをコンピュータ上で任意の空間に配置し、光源および投影面を X 線撮影時と同様の条件にすることで、6 自由度に変化することができる投影シミュレーション像の作成を行った (図 2)。そして、グレースケール 3 次元モデルから作成された投影シミュレーション像と FPD を用いて得られた連続 X 線画像を重ね合わせた (図 3)<sup>7) 8)</sup>。解析対象となる投影シミュレーション像と実際の X 線画像間の各ピクセルにおける画素値の画像相関を用いたイメージマッチングを行うことで、生体肩関節の動態解析が行われた。先行研究において、このイメージマッチング法の平均誤差は in-plane の並進運動で 0.36 mm、out-of-plane の並進運動で 0.37 mm、回転運動で 0.48 度であった<sup>10)</sup>。

### 2.3. 検討項目

検討項目は、肩甲骨面挙上動作時の肩関節外転角度 (上腕骨 Y 軸周り) と肩甲骨上方回旋角度 (肩甲骨 Y 軸周り) の差を肩甲骨上方回旋角度 (肩甲骨 Y 軸周り) で割り、SHR を算出した。SHR は健常者群および腱板断裂症例群ともに、肩関節外転  $15^\circ$  から  $120^\circ$  まで  $15^\circ$  毎に算出された。

### 2.4. 統計解析

測定値はすべて平均値±標準偏差で示した。健常者群および腱板断裂症例群における肩関節外転  $15^\circ$  から  $120^\circ$  までの SHR に対し Repeated measures ANOVA を行い、この結果に有意差が認められた場合には、対応のない t 検定を行った。統計処理には JMP Pro 13 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) を使用し、 $P < 0.05$  を有意差ありとした。

## 3. 結果

健常者群および腱板断裂症例群の SHR を図 4 に示す。腱板断裂症例群は肩関節外転  $15^\circ$  において、健常者群より有意に SHR が大きかった ( $P < 0.05$ )。また、腱板断裂症例群は肩関節外転  $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $105^\circ$  において、健常者群より有意に SHR が小さかった ( $P < 0.05$ )。健常

者群では、肩関節外転 90° で SHR が  $4.2 \pm 1.6$  と最大となり、肩関節外転 15° で SHR が  $1.3 \pm 0.4$  と最小となった。腱板断裂症例群では、肩関節外転 15° で SHR が  $3.4 \pm 1.5$  と最大となり、肩関節外転 60° で SHR が  $1.3 \pm 0.3$  と最小となった。また、SHR の全体平均は、健常者群で  $2.9 \pm 0.9$ 、腱板断裂症例群で  $1.9 \pm 0.8$  であった。

#### 4. 考察

本研究は高精度動態解析法の一つであるイメージマッチング法を用いて健常者および腱板断裂患者の肩甲骨面挙上動作時における SHR を比較検討することを目的とした。Codman<sup>1)</sup>が肩関節挙上動作における上腕骨と肩甲骨の協調運動を SHR と提唱して以来、様々な動態解析法で SHR が研究されてきた<sup>4)5)6)</sup>。Inman ら<sup>3)</sup>は肩関節外転初期の 0° から 60° までを setting phase と名付け、上腕骨の動きを安定化させるために肩甲帯が準備をする段階であると定義した<sup>3)</sup>。すなわち、健常者では肩甲帯周囲の筋群によって肩甲骨が胸郭にしっかりと固定されるために setting phase では肩甲骨の動きが少ないとされ、setting phase (肩関節外転 0° ~60°)での SHR は大きく、肩関節外転 60° から最大挙上までの SHR は小さいと報告されていた<sup>3)11)</sup>。その他、上肢への負荷や利き手非利き手の相違<sup>12)</sup>など様々な条件下での上腕骨と肩甲骨の協調運動が検討されるようになった。

過去の研究にて、McClure らは健常肩関節の SHR が 1.7 となり挙上とともに減少したと報告している<sup>13)</sup>。また、Matsuki らは健常肩関節の SHR が平均して 2.6 になったと報告している<sup>12)</sup>。本研究では、健常者群の SHR の平均は 2.9 であり、イメージマッチング法を用いた Matsuki ら<sup>12)</sup>の結果と類似していた。しかしながら、我々の研究結果は McClure ら<sup>13)</sup>と異なり、setting phase (肩関節外転 0° ~60°)では健常肩関節の SHR は小さく、肩関節外転 60° から最大挙上までの健常肩関節の SHR は大きくなるという結果であった。これらの相違は動態解析手法の違い、ならびに解剖学的座標系の違いや肩関節挙上スピードの違い等様々な要因が考えられた。

また、岩下らは腱板大・広範囲断裂症例の SHR を X 線透視画像で評価し、肩関節外転 20° では SHR は 3 以上と最大値となり、肩関節外転 40° 以上では SHR は 1.5 前後で推移したと報告している<sup>14)</sup>。本研究の結果では、腱板断裂症例群は肩関節外転 15° で SHR は 3.3、肩関節外転 45° から 90° までは SHR は 1.5 前後を推移しており、岩下ら<sup>14)</sup>の結果と非常に類似した結果となった。

本研究の今回の結果からは、setting phase (肩関節外転 0° ~60°)を過ぎた肩関節外転 60° から外転 105° までの SHR において、腱板断裂症例群と健常者群とで明らかに差が見られた。この原因は、腱板断裂症例群では肩甲骨面挙上動作時に腱板機能不全の代償として肩甲骨の上方回旋量が大きくなるためではないかと考えられた。

本研究の限界として、第 1 に解析した被験者数が少ない点があげられる。第 2 に年齢、体格などの要因が挙上パターンに影響を及ぼす可能性が考えられた。今後さらに解析症例数を増やし評価検討する必要がある。

#### 5. まとめ

本研究では、高精度動態解析法の一つであるイメージマッチング法を用いて健常者および腱板

断裂患者の肩甲骨面挙上動作時における SHR を比較検討した。本研究結果から、肩関節外転 60° から外転 105° までの SHR において腱板断裂症例群が健常者群より有意に小さくなり、腱板断裂症例群では腱板機能不全の代償として肩甲骨の過剰な上方回旋が起こっている可能性が示唆された。

## 6. 謝辞

本研究の遂行にあたり、研究助成を賜りました公益財団法人ミズノスポーツ振興財団に厚く御礼申し上げます。また本研究の一部は、公益財団法人日本スポーツ治療医学研究会の平成 28 年度研究助成を受けて行いました。ここに感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) Codman EA. The Shoulder. Thomas Todd, Boston 1934; 32-64.
- 2) Hovelius L. Incidence of shoulder dislocation in Sweden. Clin Orthop Relat Res 1982; 166: 127-131.
- 3) Inman VT, et al. Observation of the function of the shoulder joint. J Bone Joint Surg Am 1944; 26: 1-31.
- 4) Yamaguchi K, et al. Glenohumeral motion in patients with rotator cuff tears: a comparison of asymptomatic and symptomatic shoulders. J Shoulder Elbow Surg 2000; 9(1): 6-11.
- 5) Karduna AR, et al. Dynamic measurements of three-dimensional scapular kinematics: a validation study. J Biomech Eng 2001; 123(2): 184-190.
- 6) Dal Maso F, et al. Coupling between 3D displacements and rotations at the glenohumeral joint during dynamic tasks in healthy participants. Clin Biomech (Bristol, Avon) 2014; 29(9): 1048-1055.
- 7) Hara D, et al. Dynamic hip kinematics in patients with hip osteoarthritis during weight-bearing activities. Clin Biomech (Bristol, Avon) 2016; 32: 150-156.
- 8) Hamai S, et al. In Vivo Kinematics of Healthy and Osteoarthritic Knees During Stepping Using Density-Based Image-Matching Techniques. J Appl Biomech 2016; 32(6): 586-592.
- 9) Wu G, et al. ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion--Part II: shoulder, elbow, wrist and hand. J Biomech 2005; 38: 981-992.
- 10) Hara D, et al. Kinematic analysis of healthy hips during weight-bearing activities by 3D-to-2D model-to-image registration technique. Biomed Res Int 2014; 2014: 457573.
- 11) Warner JJ, et al. Scapulothoracic motion in normal shoulders and shoulders with glenohumeral instability and impingement syndrome. A study using Moiré topographic analysis. Clin Orthop Relat Res 1992; 285: 191-199.
- 12) Matsuki K, et al. In vivo 3-dimensional analysis of scapular kinematics: comparison of dominant and nondominant shoulders. J Shoulder Elbow Surg 2011; 20(4): 659-665.

- 13) McClure PW, et al. Direct 3-dimensional measurement of scapular kinematics during dynamic movements in vivo. *J Shoulder Elbow Surg* 2001; 10(3): 269-277.
- 14) 岩下哲ほか. 透視画像による腱板断裂例における肩甲骨上腕リズムの検討. *肩関節* 2015; 39(2): 388-391.

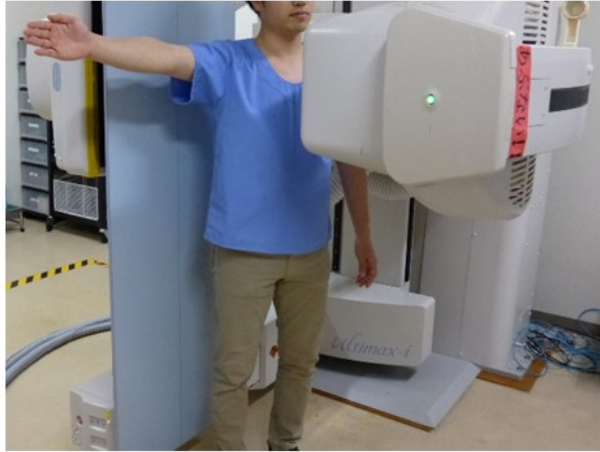


図 1. 肩甲骨面挙上動作の肩関節連続 X 線撮影

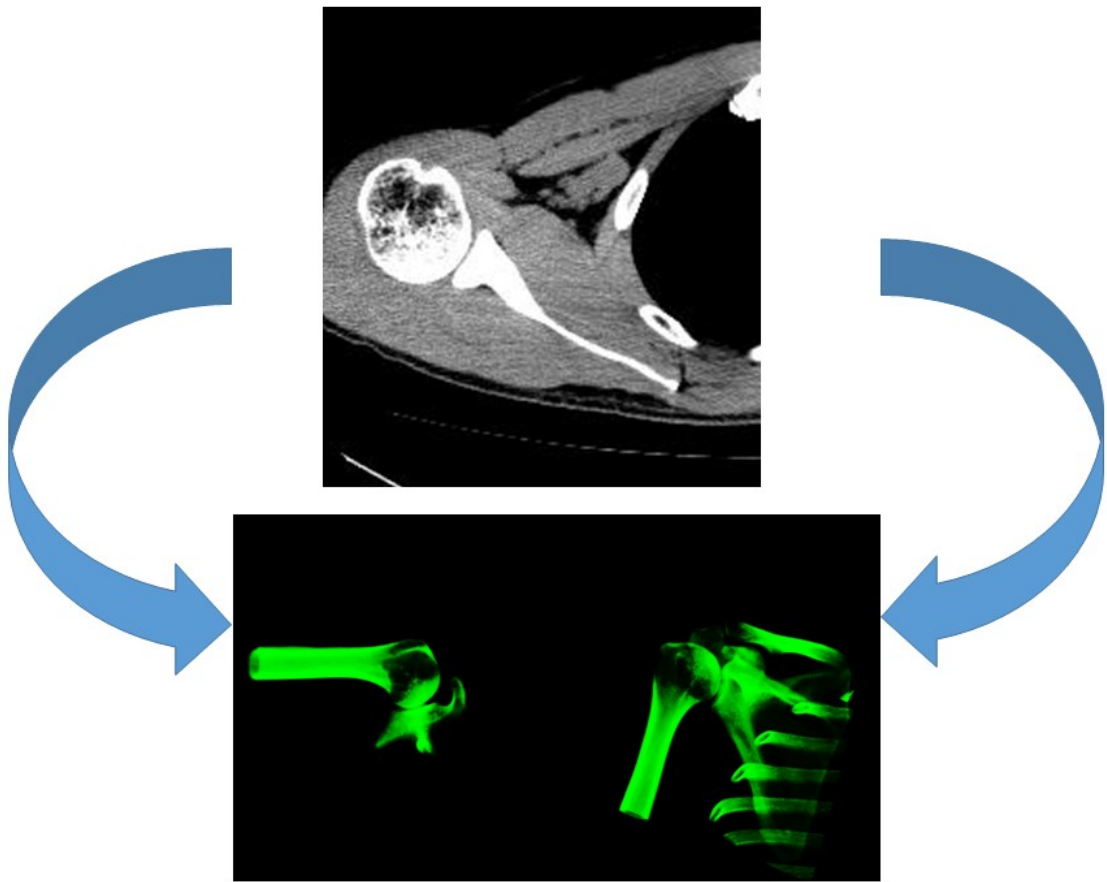
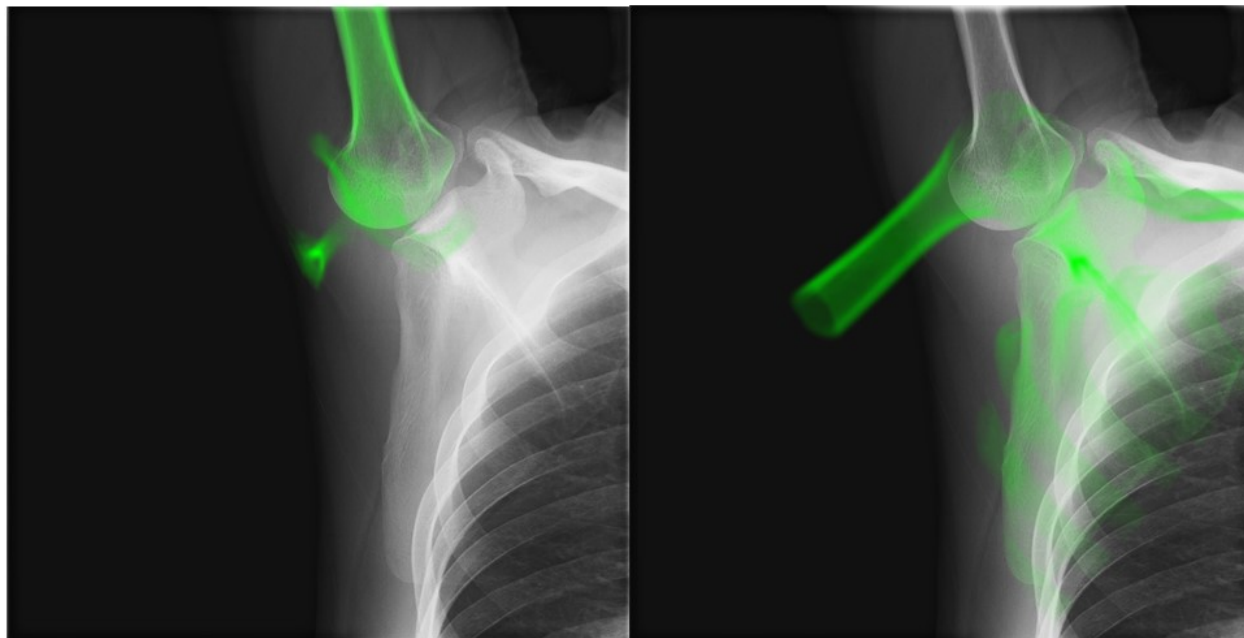


図 2. 投影シミュレーション像(上腕骨, 肩甲骨): 撮影した CT 画像より作成した.



上腕骨

肩甲骨

図 3. イメージマッチング：X 線画像と投影シミュレーション像の画素値の画像相関を行った。



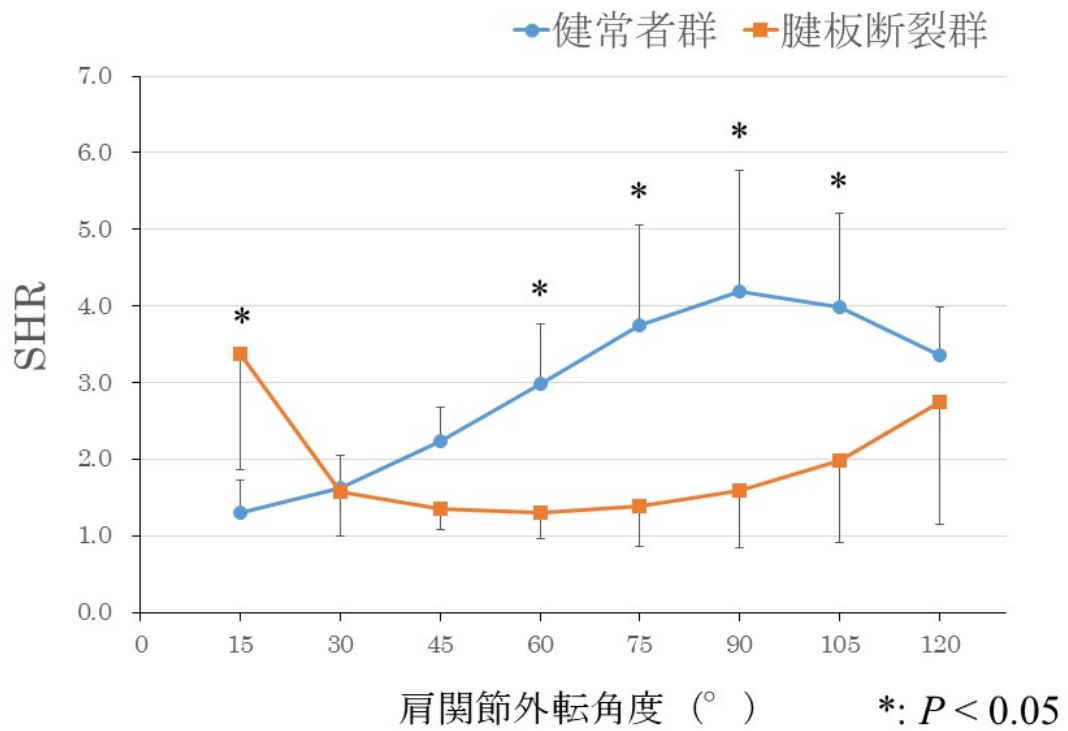


図 4. 肩関節外転角度に対する肩甲上腕リズム (SHR)