

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：16201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25750264

研究課題名(和文) 肩甲骨3次元運動解析に基づく上肢帯筋骨格系の力学的機能解析

研究課題名(英文) Mechanical Function of the Musculoskeletal System for Scapular Rotation Based on Three-dimensional Scapular Motion Analysis

研究代表者

井上 恒 (Inoue, Koh)

香川大学・工学部・助教

研究者番号：90624205

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、上肢挙上時の肩甲骨3次元位置および方位から瞬間回転軸を算出し、それに基づいて肩甲骨回旋筋のモーメントアームを求めた。その結果、上肢挙上中の肩甲骨回転を促す向きにモーメントを発揮可能な状態にあるのは僧帽筋と前鋸筋の下部であることが示された。また、モーメントアームの大きさは上肢挙上に伴い変化し、前鋸筋は上部と下部で相反する運動を発生させる筋束を有していた。

研究成果の概要(英文)：The moment arms of the scapular rotators were calculated based on the three-dimensional position, rotation, and rotation axis of the scapula during humeral elevation. As the results, the moment arms of all scapular rotator changed with humeral elevation. The trapezius and the lower part of the serratus anterior muscle showed the moment arms that were able to facilitate the scapular rotation. The upper part and lower part of only the serratus anterior muscle showed opposite functions for scapular rotation each other.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：肩甲骨 3次元運動解析 筋骨格系 モーメントアーム

## 1. 研究開始当初の背景

肩の運動は日常生活、労働作業、スポーツ活動等多くの場面で必要不可欠である (Ebaugh, 2010). 肩は上肢の最も近位に位置しているため、上肢の運動において極めて重要な部位である (Kibler, 2010). 肩の運動は肩甲上腕関節(肩関節)と肩甲胸郭関節(胸郭に対する肩甲骨)の運動によって構成されており、肩甲骨は上肢の運動の土台となっている (Inman, 1944). 肩に障害のある患者では、肩甲骨の動きが健常者と異なることが知られている (Lukasiewicz, 1999). そのため、傷害発生メカニズム解明などのために、肩甲骨の運動の仕組みを明らかにすることが要求されている。また、リハビリテーションやスポーツの現場では、傷害発生メカニズムやトレーニング効果の検証が要求されている。

この障害発生メカニズムの検証やトレーニング効果などの検討には、生体を用いて実証することが最も確実であるが、倫理的な観点などから困難である。そこで、コンピュータシミュレーションが有用となる。また、筋骨格系の力学的機能を解明するためにも、筋の委縮等を仮想的に再現できるシミュレーションが役立つ。しかし、そのためには詳細な筋骨格系のモデル構築が不可欠である。そして、モデル構築のためには、筋骨格系の特徴をバイオメカニクスのように明らかにする必要がある。

上記に関してこれまで、上肢運動中における外力と動作速度が肩甲骨3次元運動に影響すると考えられ、検討されてきている。先行研究において、外力が無い状態での上肢運動中の肩甲骨3次元運動は多く示されていたが (McClure, 2001), 申請者によって外力印加状態における上肢運動中の肩甲骨3次元運動がはじめて示された。また、外力が無い状態での上肢の動作速度の影響も検討されている (Fayad, 2006). しかし、これらは骨格系の運動について記述しているのみで、肩甲骨3次元運動をもたらす筋骨格系の力学的特徴については未だ解明されていない。

## 2. 研究の目的

上肢の最も近位にある肩の運動は、肩甲上腕関節と肩甲胸郭関節の運動によって構成されている。そのため、上肢動作中の肩甲骨3次元運動は、上肢の運動のパフォーマンスや傷害発生の重要な決定因子であると考えられている。そこで、肩および肩甲骨の運動の仕組みをバイオメカニクスのように詳細に解明することによって、肩の傷害予防、リハビリテーション、トレーニング等の具体的な指針を示すことが将来的な研究に望まれる。

これまで、申請者らによって、肩甲骨3次元運動の分析・評価方法が確立されている。本研究は、それに基づく力学解析によって、肩甲骨の運動に作用する筋骨格系のバイオメカニクスの特徴について明らかにするこ

とを目的とした。

## 3. 研究の方法

### (1) 実験

右肩に既往歴のない健常な成人男性を対象として、上肢挙上における肩甲骨3次元運動の計測実験を行った。胸郭、右肩峰、右上腕について、肩甲骨面での上肢挙上時の肩甲骨の位置と向きを6自由度で計測した。上肢挙上動作には動作速度と外力を負荷条件として設定した。動作速度は上腕挙上(肩関節外転)の時間をメトロノームでコントロールした。挙上動作は肘を完全伸展の状態で行った。

上肢3次元運動の解析に必要な骨特徴点の認識は、国際バイオメカニクス学会が推奨する基準に基づいて行われた。胸郭の座標系を設定するのに用いた骨特徴点は、胸骨上縁(IJ)、剣状突起(PX)、第七頸椎棘突起(C7)、第八胸椎棘突起(T8)であった。肩甲骨の座標系には、肩峰角(AA)、肩甲棘と内側縁の交点(TS)、下角(AI)を用いた。上腕骨の座標系には、肩甲上腕関節回転中心(GH)、内側上顆(EM)、外側上顆(EL)を用いた。GHは、小さく肩甲上腕関節の分回し運動を行った時の各瞬間の回転軸の位置から推定した。

### (2) データ解析

#### 肩甲骨3次元運動

#### ・座標系の設定

上肢に関する国際バイオメカニクス学会推奨の基準に従い、胸郭、肩甲骨、上腕骨の座標系を設定した。胸郭の座標系はIJを原点とし、PXとT8の midpoint からIJとC7の midpoint に向かう線をYt軸、PXとT8の midpoint とIJとC7の3点で構成される面に垂直で右側に向かう線をZt軸、Yt軸とZt軸の外積方向に向かう線をXt軸とした。肩甲骨の座標系はAAを原点とし、TSからAAに向かう線をZs軸、AIとAAとTSの3点で構成される面に垂直で前方に向かう線をXs軸、Zs軸とXs軸の外積方向に向かう線をYs軸とした。上腕骨の座標系はGHを原点とし、EMとELの midpoint からGHに向かう線をYh軸、GHとEMとELの3点で構成される面に垂直で前方に向かう線をXh軸、Xh軸とYh軸の外積方向に向かう線をZh軸とした。

#### ・肩甲骨の方位(オイラー角)

胸郭に対する肩甲骨の方位を表すオイラー角は、胸郭と肩甲骨の座標系が一致している状態から、第1の回転をYt軸周りの回転、第2の回転をXs軸周りの回転、第3の回転をZs軸周りの回転とした。この第1の回転を外転角、第2の回転を上方回旋角、第3の回転を後方傾斜角とした。また、胸郭に対する上腕骨の方位を表すオイラー角は、胸郭と上腕骨の座標系が一致している状態から、第1の回転をYh軸周りの回転、第2の回転をXh軸周りの回転、第3の回転をYh軸周りの回転とした。

・肩甲骨の重心位置

肩甲骨の重心位置はモデル解析によって推定した。van der Helm が作成した上肢の筋骨格モデルをもとに、各被験者の肩甲骨の重心位置を推定した。肩甲骨座標系に対する重心位置を推定するために、モデルにおける重心から AA と TS と AI を含む平面に垂線を下ろし、平面と線の交点の位置ベクトルを AA と TS と AI の位置ベクトルを用いて表した。その後、各実験参加者とモデルの AA, TS, AI で構成される三角形の面積の比を、モデルの AA, TS, AI を含む平面から重心までの距離にかけ、各実験参加者の肩甲骨重心位置を求めた。なお、上肢挙上中の肩甲骨重心位置は、胸骨上縁を原点にした胸郭の座標系で表した。

・回転軸の向きと回転中心の位置

方位を示すオイラー角を回転行列に変換し、そこから肩甲骨の回転軸の向きを求めた。上肢挙上の計測開始時から、肩甲骨の回転量が 0.1 radian (約 5.7°) になるごとに、回転軸の単位ベクトルを算出した。その後、回転軸のベクトルの向きを pitch 角と yaw 角として、肩甲骨の座標系を用いた球面座標で記述した。この pitch 角と yaw 角をスプライン補完することによって、瞬間の回転軸の向きを求めた。

また、肩甲骨の回転中心の位置は、ヘリカルアクシスを用いて求めた。ヘリカルアクシスはあらゆる 3 次元運動を、一つの軸周りの回転と、その軸に沿った水平移動によって記述する方法である。

筋骨格系の力学的機能

・肩甲骨回旋筋のモーメントアーム

本研究では僧帽筋(肩甲骨部)、菱形筋、小胸筋、前鋸筋を肩甲骨回旋筋とした。van der Helm の筋骨格モデルでは僧帽筋(肩甲骨部)は 11 本、菱形筋は 5 本、小胸筋は 4 本、前鋸筋は 12 本の筋束でそれぞれモデル化されている。このモデルから各筋束の起始、停止の座標を得て、前述の肩甲骨の重心と同様に各被験者毎に筋の位置を推定した。起始、停止の最短距離を以て、筋の走行と筋長とした。

一般的な 3 次元のモーメントアーム **MA** の定義は、力の作用線と回転軸の最短距離を  $l$  とし、力の作用線と回転軸のなす角を  $\alpha$  とすると、次の式のように示される。

$$MA = l \sin \alpha$$

この定義ではモーメントアーム **MA** は常に正の値になる。そのため、モーメントを求めなければ、回転に対する力の貢献は示されない。そこで本研究では、このモーメントアームに符号を付加することにより、モーメントが瞬間の回転方向に貢献する成分を持つか否かを示すこととした。ここで、各筋束において、停止から起始へ向かうベクトルを筋の走向ベクトル(単位ベクトル)  $F$ 、肩甲骨上の回転中心から筋束の停止へ向かうベクトルを  $r$ 、肩甲骨の回転軸ベクトル(単位ベクトル)を

$RA$  とし、本研究におけるモーメントアーム **MA** は次の式のように定義した。なお、肩甲骨回転軸ベクトル  $RA$  の向きは肩甲骨の角速度ベクトルと同じ向きである。

$$MA = \frac{(F \times RA) \cdot r}{|F \times RA|}$$

この定義では、肩甲骨回転軸(角速度ベクトル)の向きに対し、 $F$  が肩甲骨を右ねじの方向に回転させるモーメントを発揮する場合、**MA** の符号は正となる。また、反対方向への回転のモーメントを発揮する場合、**MA** の符号は負になる。なお、**MA** の大きさ(絶対値)は従来の定義、本研究の定義とも同じである。

4. 研究成果

上肢挙上時の、IJ を原点とした胸郭座標系からみた肩甲骨の重心位置を図 1 に示した。Xt 軸(前)方向の位置に顕著な変化はみられず、解析対象の上腕挙上角を通して平均すると -9.6 cm だった。Yt 軸(上)方向の位置は、上腕挙上角 20° では -2.2 ± 1.1 cm だったが上腕挙上角 120° では -0.4 ± 1.0 cm になり、1.8 ± 1.2 cm 上方に変位した。Zt 軸(外側 or 右)方向の位置は、上腕挙上角 20° では 12.6 ± 3.8 cm だったが上腕挙上角 120° では 10.8 ± 3.2 cm になり、1.8 ± 1.1 cm 内側(左)方向に変位した。上肢挙上時の肩甲骨の重心位置は、上方および内側(左)方に同程度変位した。上方へは、上腕挙上角 40° 以上ではほぼ一定の割合で変化したが、内側(左)方へは上腕挙上角が増大するほど移動の大きさが増大した。

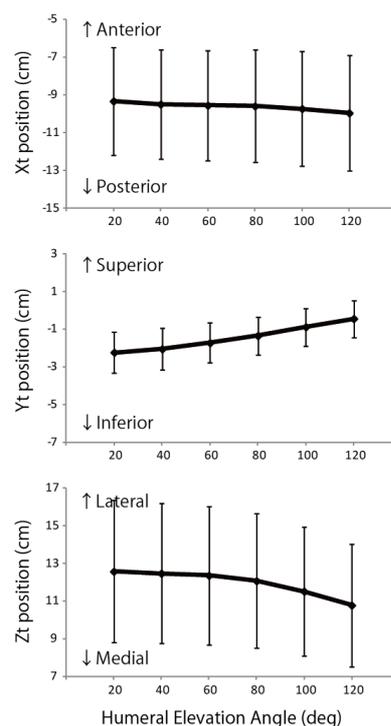


図 1 胸郭に対する肩甲骨重心位置

上腕挙上時の肩甲骨の回転軸の向きは、yaw角は挙上角20°と40°の間で有意な差がみられた。pitch角には有意な変化がみられず、上腕挙上を通して平均すると-1.4°であった。肩甲骨の回転軸は、肩甲骨の面に対してほぼ垂直よりやや外側(右)方を向いていることが示された。

上腕挙上時の、AAを原点にした肩甲骨座標系からみた回転中心の位置を図2に示した。Ys軸(上)方向の位置は上腕挙上によって変位せず、挙上を通して平均すると-4.6cmの位置にあった。Zs軸(外側or右)方向の位置は上腕挙上に伴い内側(左)方に変位し、上腕挙上角20°での-6.8 ± 2.8cmから上腕挙上角120°での-11.9 ± 5.2cmまで5.1 ± 4.4cmの変位がみられた。これにより、回転中心の位置は、肩甲棘の下方から肩甲骨の内側方へと変位することが示された。

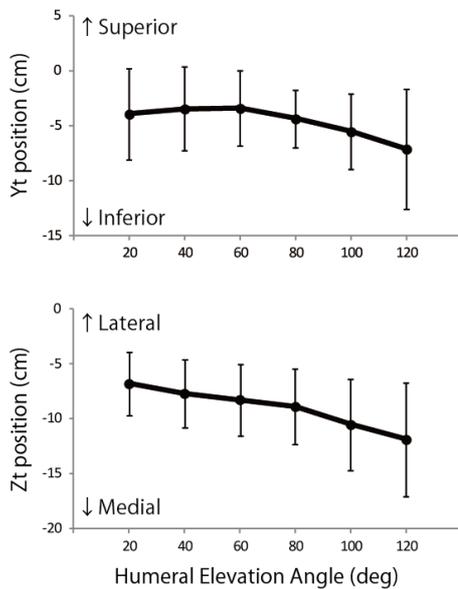


図2 肩甲骨座標系に対する肩甲骨回転中心位置

肩甲骨回旋筋のモーメントアームを図3に示した。図中の数字は各筋束を上から数えた番号である。僧帽筋では、すべての筋束が回転軸に対して肩甲骨を右ねじの方向に回転させるよう作用していた。また、上方に起始を持ち肩峰の方に停止する筋束ほど、上肢挙上に伴ってモーメントアームが延長された。小胸筋と菱形筋では共に全ての筋束のモーメントアームの値が負であったことから、肩甲骨の回転とは反対向きの回転をさせるよう作用していた。モーメントアームの長さは、上肢挙上に伴い、小胸筋で延長、菱形筋で短縮されていた。前鋸筋においては他の筋と異なり、上方と下方の筋束でモーメントアームの符号が逆転していた。上方の筋束は負の値を示し、肩甲骨の回転とは反対向きの回転をさせるよう作用しており、上肢挙上に伴いモーメントアームが延長された。一方、下方の

筋束は正の値を示し、肩甲骨の回転と同方向に作用しており、上肢挙上に伴い、モーメントアームは短縮された。また、すべての筋において、上肢挙上に伴って同一の筋束のモーメントアームの符号が変化することはなかった。

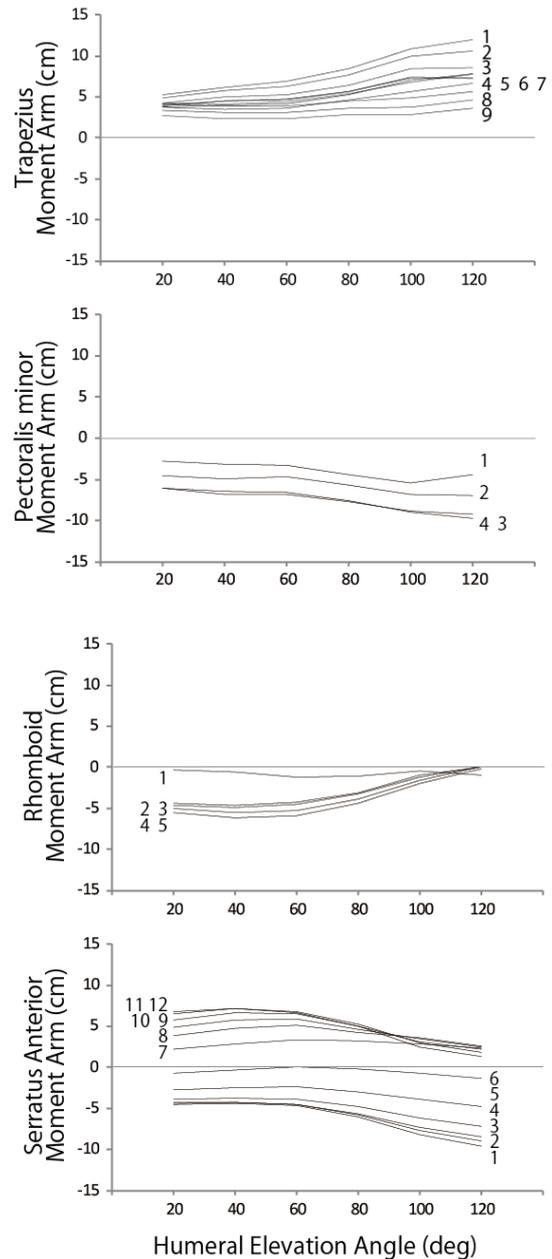


図3 肩甲骨回旋筋のモーメントアーム

肩甲骨の回転に作用する力をもたらす肩甲骨格系は、本研究で挙げた肩甲骨回旋筋の他に、上腕骨、鎖骨および胸郭(肋骨)からの関節間力がある。それらのモーメントアームを本研究で行われた上肢挙上動作から推察すると、上腕骨と鎖骨からの反力は肩甲骨の回転を妨げる向きに作用したと考えられる。これに肩甲骨回旋筋の働きを加味しても、上肢挙上に伴う肩甲骨の回転を引き起こすように機能するのは僧帽筋と前鋸筋下部しか存在しない。本研究結果のように重心移動が

比較的少ない回転をするには、この二つの部位が同時に機能することが必要不可欠である。これらのうちどちらかが機能不全に陥ると、例えば前鋸筋下部が機能しなくなると、翼状肩甲骨のように肩甲骨を回転させることができなくなり、その結果として上肢挙上が行えなくなることが考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1件)

井上 恒，鈴木 秀次，矢内 利政，上肢挙上時の肩甲骨回旋筋モーメントアーム，シンポジウム：スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2014 講演論文集，査読無 2014，B-21 (10 頁)

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

井上 恒 (INOUE, Koh)  
香川大学・工学部・助教  
研究者番号：90624205

