

原 著

投球動作の後期コッキング期から 加速期における肩甲骨の三次元運動解析

Three-dimensional dynamics of the scapula during the late cocking and acceleration phase of the throwing motion

宮下浩二*^{1,2}, 小山太郎*³, 太田憲一郎*²
谷 祐輔*², 岡棟亮二*^{2,3}

キー・ワード：throwing motion, scapula, three-dimensional analysis
投球動作, 肩甲骨, 三次元動作解析

〔要旨〕 投球時の肩甲骨の三次元の動態を明らかにすることを目的とした。対象は大学硬式野球部投手 12 名とし、投球動作を三次元動作解析した。ステップ脚の足底接地時からボールリリースまでを 100% に規格化し、肩甲骨の後傾角度、上方回旋角度、外旋角度（内転を含む）を算出した。肩甲骨後傾角度は足底接地以降増加し、位相の 61% で最大値 42 ± 8 度となり、以降減少した。上方回旋角度は足底接地から緩やかに増加し、約 40% から急増して位相の 86% で最大値 46 ± 11 度となり、以降減少した。外旋角度は足底接地から位相の 15% まで増加して 26 ± 10 度に達し、その後減少した。肩甲骨は後期コッキング期において前額面で後傾しつつ、徐々に内旋（外転）により方向を変え、上方回旋に切り替わるという動態を示した。

はじめに

肩関節は肩甲上腕関節と肩甲胸郭関節および胸椎などからなる複合体である¹⁾。肩関節外転位での外旋運動は運動学的には、肩甲上腕関節外旋運動、肩甲骨後傾運動、胸椎伸展運動などの運動により構成されている¹⁾。そのため、臨床やスポーツ現場での野球選手のコンディショニングや投球障害に対するリハビリテーションにおいて、肩甲上腕関節へのストレスを軽減させるために、肩甲骨や胸椎の可動性を獲得する重要性は様々な形で報告されてきた²⁻⁴⁾。このような肩甲骨や胸椎の運動の重要性を明確にするために、我々は第 18 回本学会で投球動作における肩複合体の運動を肩甲上腕関節外旋運動、肩甲骨後傾運動、胸椎伸展運動に分け

て分析した⁵⁾。また、肩複合体の各関節の加速運動の主体を分析し、肩甲骨運動が主体となる選手が多数いることを提示した⁶⁾。

しかし一方で、個別に選手の特徴を分析すると、肩甲骨の前傾・後傾運動がほとんど生じていない選手がいることも明らかになった（図 1）。この対象は某独立リーグで活躍した選手であり、決して技術的な問題ではないと推察される。つまり、投球の加速運動は肩甲骨前傾運動のみでなく、他の方向への運動も関与している可能性がある。そのため、投球動作中の肩外旋運動における肩甲骨運動を前傾・後傾という一方向の運動のみならず、上方回旋・下方回旋、外旋・内旋も含めた三方向の運動を分析する必要があると考える。そこで、今回はより詳細に肩甲骨の三次元の動態を明らかにすることを目的とした。

対象および方法

1. 対象

本研究の対象は、本大学硬式野球部投手 12 名と

*1 中部大学生命健康科学部理学療法学科

*2 中部大学大学院生命健康科学研究科リハビリテーション学専攻

*3 まつした整形外科

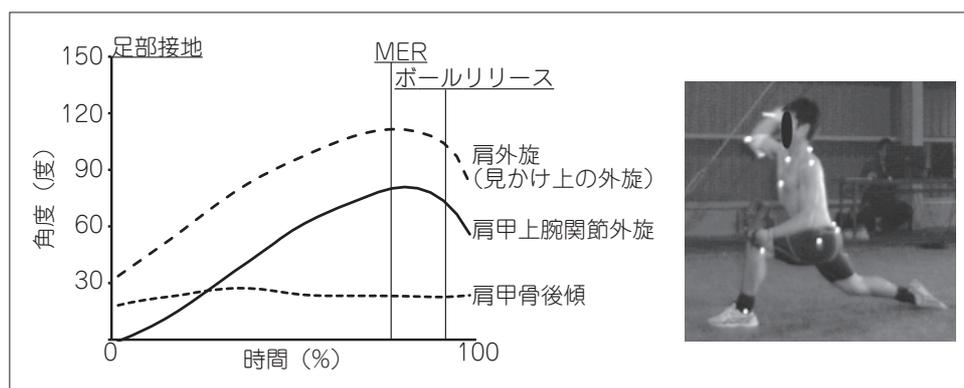


図1 投球動作における肩の各関節角度の一例

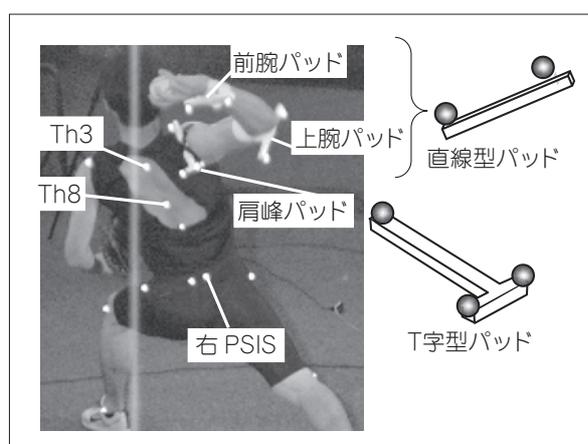


図2 反射マーカおよびパッドの貼付位置

した。平均年齢 (±標準偏差) は 21.2 ± 0.8 歳、身長は 177.3 ± 6.2 cm、体重は 75.6 ± 1.0 kg、野球歴は 11.7 ± 1.3 年であった。右投げ 11 名、左投げ 1 名であった。対象の条件として、試合出場候補メンバーであること、および測定時に肩関節や肘関節に疼痛がないこととした。全員、本研究の趣旨に同意した。本研究は中部大学倫理審査委員会の承認を得た (承認番号 270008)。

2. 撮影環境および測定方法

投球動作の撮影は大学野球部の室内練習場で行った。対象の周囲に 4 台のハイスピードカメラ (フォーアシスト社製 IEEE1394b 高速カメラ FKN-HC200C) を設置した。コマスピードは 1/200 秒とし、4 台のカメラを同期して撮影した。対象から 15m 離れた位置に防球ネットを設置した。

対象にはスパッツとソックスおよび人工芝用スパイクシューズ、グラブを装着させ、上半身は反射マーカが隠れないように裁断したノースリーブシャツを着用させた。直径 1cm の反射マーカ

を第 3 胸椎棘突起、第 8 胸椎棘突起、胸骨上切痕、両側の上後腸骨棘に貼付した (図 2)。また投球側肩峰には我々の先行研究で用いたウレタン素材のテーピング用パッド (日東電工社ニトリートテーピングパッド) で作成した棒状パッドに改良を加え、肩甲骨の上方回旋および外旋角度も測定できるように T 字に形成し、3 点に反射マーカを添付した。このパッドを図 2 のように投球側肩峰に貼付した。投球側の上腕遠位端背側面、前腕遠位端背側面には先行研究と同様に両端に反射マーカを添付したテーピング用パッドを貼付した。上腕と前腕には各長軸と直交するようにパッドを位置させた。

各対象の投球動作を電氣的に同期した 4 台のハイスピードカメラで撮影した。その画像をパーソナルコンピュータ (PC) に動画ファイルとして保存し、分析した。PC 画像に対して、1/200 秒毎に各反射マーカをプロットした。DKH 社製 3 次元ビデオ動作解析システム Frame-DIASII を用いて Direct Linear Transformation method (DLT 法)⁷⁾ により各反射マーカの三次元座標値を得た。

3. 角度算出方法および位相の決定方法

分析した位相は、ワインドアップ期以降のステップ脚 (右投げの左脚) の足底全面接地からボールリリースまでとし、この期間を 100% に規格化した。得られた座標値から肩複合体の外旋角度 (肩外旋角度) を算出した⁸⁾。この角度は、体幹に対して前腕がなす角度で、肩関節全体の外旋角度である。臨床などで定性的な動作分析をする際に観察される、見かけ上の肩関節外旋角度となる (図 3 左図・中図)。算出方法は次の通りとした。まず、投球側の手関節 (前腕に貼付したパッドの両マー

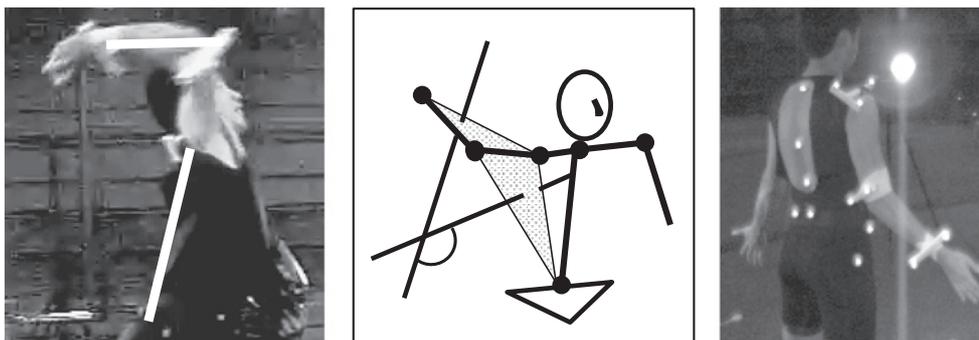


図3 「見かけ上の肩外旋角度」の算出方法
見かけ上の肩外旋角度は左図のように前腕と体幹のなす角度とした。算出方法は中図の通りであり、詳細は本文中に示す。右図は基本肢位を示す。

カーの中心点), 肘関節(上腕に貼付したパッドの両マーカーの中心点), 肩関節(肩峰に貼付したパッドの3マーカーの中心点)の3点からなる平面の法線ベクトルと, 肘関節, 肩関節, 投球側の上後腸骨棘の3点からなる平面の法線ベクトルを算出した。次にこの2つの法線ベクトルの内積を求め, その余弦から2つの平面のなす角度を算出した。外旋方向への運動をプラス, 内旋方向への運動をマイナスとした。なお, 本角度および下記に示す肩甲骨の各角度表記については図3右図の肢位を基本肢位とし, この時の角度を0°とした。

この値をもとに肩最大外旋位(maximum external rotation: MER)を算出し, 足底接地から肩最大外旋位までを後期コッキング期, 肩最大外旋位からボールリリースまでを加速期として位相を決定した。

4. 肩甲骨の角度算出方法

肩甲骨の角度算出方法は我々の先行研究^{8,9)}をもとに, さらに改良を加えて行った。詳細を下記に示した。

1) 肩甲骨後傾角度(図4左図)

肩峰に貼付したパッドの後端2つのマーカーの中心点と同パッドの中心点および第3胸椎棘突起の3点からなる平面の法線ベクトルと, 第3胸椎棘突起と肩峰のパッドの中心点および第8胸椎棘突起の3点からなる平面の法線ベクトルを算出し, 肩外旋角度と同様に算出した。後傾方向への運動をプラス, 前傾方向への運動をマイナスとした。

2) 肩甲骨上方回旋角度(図4中図)

肩峰に貼付したパッドの後端2つのマーカーの結線および第3胸椎棘突起と第8胸椎棘突起の結線のなす角度を算出した。上方回旋をプラス, 下

方回旋をマイナスとした。

3) 肩甲骨外旋角度(図4右図)

肩峰に貼付したパッドの後端2つのマーカーの結線および, 第3胸椎棘突起と胸骨状切痕の結線のなす角度を算出した。外旋をプラス, 内旋をマイナスとした。

なお, 本研究の方法は我々の先行研究¹⁰⁾をもとに実施した。本方法の妥当性, 特に肩甲骨後傾角度の算出については, 先行研究で確認してきた¹⁰⁾。今回, 上方回旋角度と外旋運動を算出したが, この方法も基礎的な運動学的研究¹¹⁾によって他の詳細な先行研究¹²⁻¹⁷⁾とほぼ同様の値を得ている。肩峰にマーカーを貼付する筒井らの報告¹⁸⁾に示されるように, 肩峰は皮膚のずれもほとんどなく, 先行研究でもこの部位を採用してセンサーをおいている。そのため今回の方法も肩甲骨の運動を反映していると考えられる。ただし, 外転角度が120度を上回ると上腕などがパッドに衝突することもあり, 投球動作がこの条件に適合する選手は除外対象となるが, 今回, 該当者はいなかった。

■ 結 果

肩最大外旋位は位相の74%であり, この時点までを後期コッキング期, それ以降を加速期とした(図5)。肩甲骨の各角度変化の詳細を図6に示す。また, 図7に4つの角度をまとめた結果を示す。

肩甲骨後傾角度は足底接地以降増加し, 位相の61%で最大値 43 ± 8 度となり, 以降減少した。

上方回旋角度は足底接地から緩やかに増加し, 約40%から急増して位相の86%で最大値 46 ± 11 度となり, 以降減少した。

外旋角度は足底接地から位相の15%まで増加

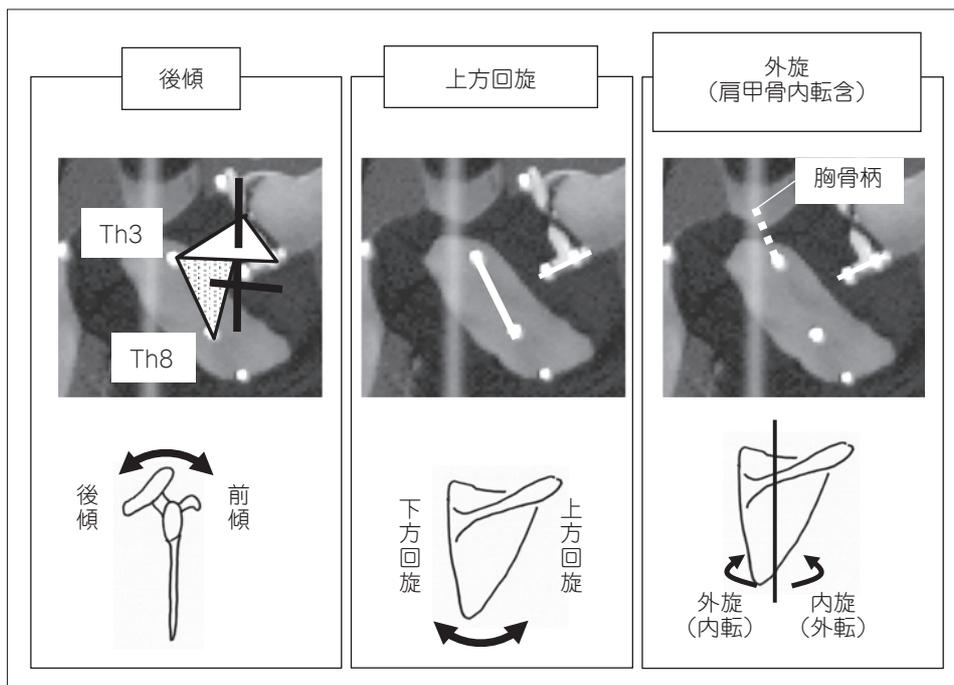


図4 肩甲骨の各角度の角度算出方法

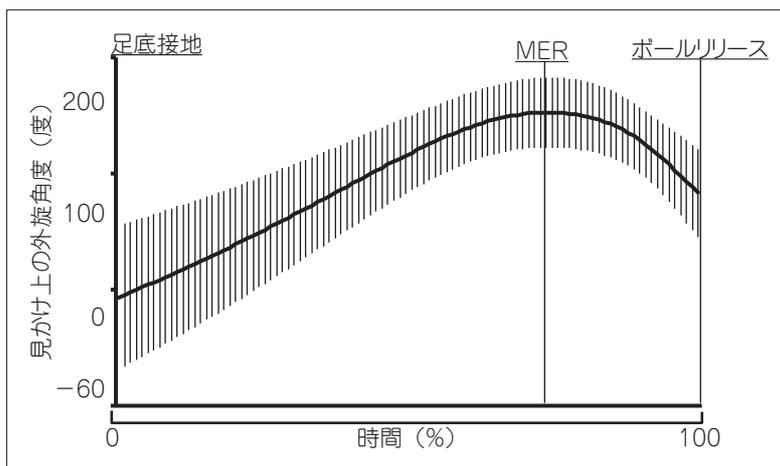


図5 見かけ上の肩外旋角度の変化

して 26 ± 10 度に達し、その後減少した。

■ 考 察

本研究の結果と写真と照合しながらまとめると図8下段のようになる。まず、肩甲骨は足底接地以降に後傾し始め、後期コッキング期の終盤で最大後傾位に至った(図8-②)。また、足底接地直後に肩甲骨は最大外旋位を呈していた。その後、肩甲骨は内旋(外転)しながら上方回旋を強めていった。肩甲骨が最大後傾位に至った後も肩甲骨は上方回旋していた。その後上方回旋は増加を続け、見かけ上の肩最大外旋位の後に最大上方回旋位が

出現した(図8-③)。そして、見かけ上の肩最大外旋位からボールリリースまでの加速期には肩甲骨は前傾運動と下方回旋運動を呈していた。

つまり、後期コッキング期において肩甲骨は、前額面での後傾運動から、徐々に内旋(外転)運動により胸郭の形状に沿って矢状面方向に向きを変えながら、上方回旋運動に切り替わるという動態を示した(図8下段)。また加速期では下方回旋運動も生じており、下方回旋運動が加速運動の一端を担っている可能性が示唆された。冒頭で示した図1に示す選手は肩甲骨後傾・前傾運動ではなく、肩甲骨内旋(外転)運動を強めた状態での

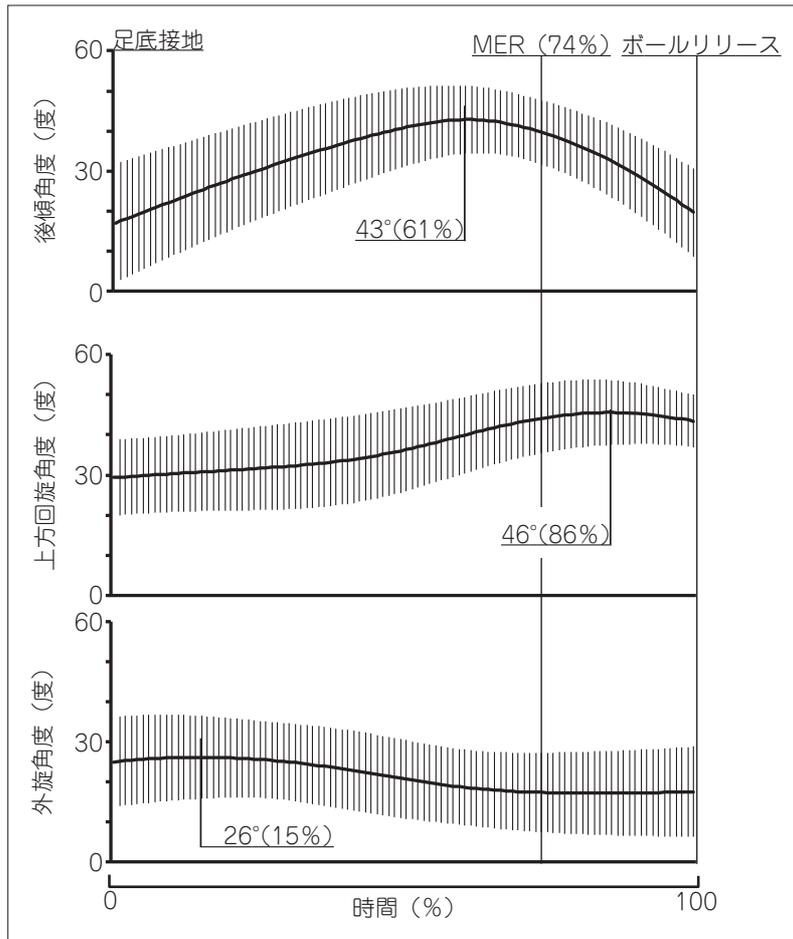


図6 肩甲骨の各角度の変化

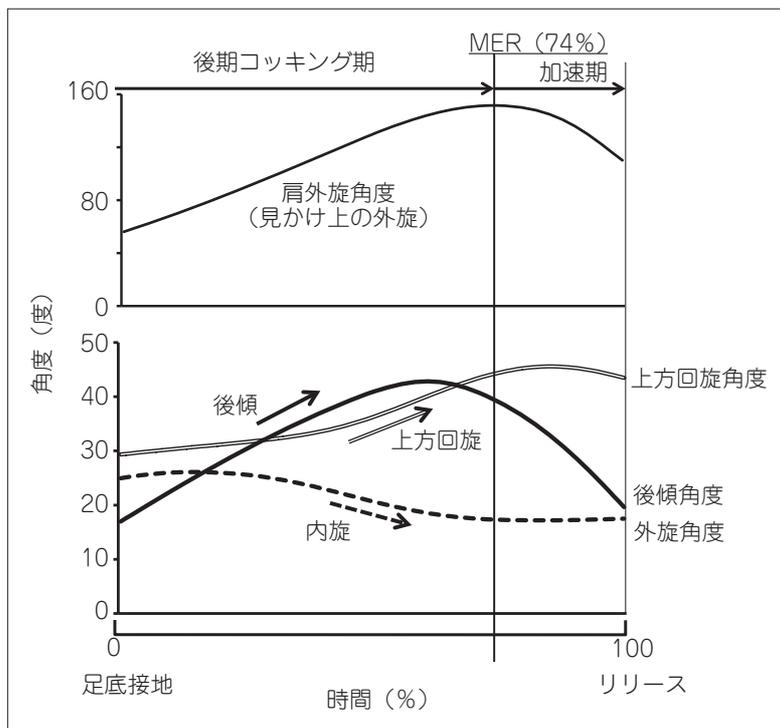


図7 投球動作における各角度の変化と運動方向

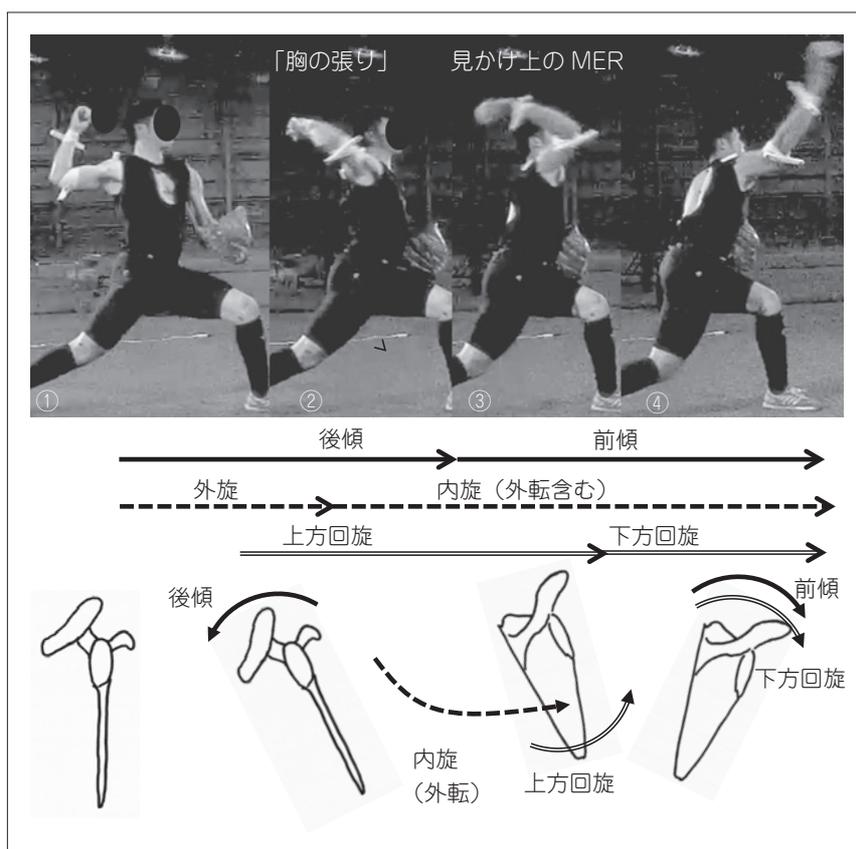


図8 投球動作における肩甲骨運動のシェーマ

肩甲骨下方回旋運動を行うことによって加速運動をまかなっていた可能性がある。本選手に限らず、投球動作において肩甲骨の前傾運動に加えて下方回旋運動も加速運動には重要な要素となっていると考える。

各位相と各角度の関係を分析したところ、肩甲骨後傾角度の最大値は後期コッキング期の中盤で生じており、肩最大外旋角度とは一致しないことが確認された。最大後傾位は図8-②に示すように、肩甲骨外旋位と相俟って、いわゆる「胸を張った」位相に近い可能性がある。一方、肩最大外旋角度はむしろ上方回旋角度が主に関与していると考えられる。上方回旋運動は基本的には前額面の運動であり、後期コッキング期から加速期に生じる肩外転運動^{19,20)}の構成要素として生じている。しかし同時に、肩甲骨が胸郭の弯曲に沿って外転することで内旋運動も伴い¹⁾、前額面から矢状面に向けて肩甲骨の面も図8下段のように変化する。その結果、矢状面の運動である肩外旋運動の構成要素にもなり、見かけ上の肩最大外旋位付近でも上方回旋運動を呈していると考えられる。このような後期コッキング期での肩外旋運動は、図8の①以降

のように肩外転位でのステップ脚の足底接地後、体幹・骨盤の回旋に伴って lagging back 現象²¹⁾として生じる運動であると考えられる。つまり、後期コッキング期に体幹の回旋や肩関節水平屈曲の運動が生じると上腕および前腕の近位端は投球方向に移動し、ボールを持った手部は後方に残る結果として肩関節は外旋することになる。足底接地後、テイクバックにより肩甲骨は外旋(内転)し、胸郭の後面にあり、この位置で後傾運動を開始する。しかし、後傾運動は肩甲骨下角が胸郭に押し当てられるため、胸郭の変形が伴うそれ以上の後傾の角度変化はできなくなる。それを避けるために肩甲骨が胸郭の弯曲に沿って内旋して上方回旋に移行していると考えられる。一般的に今回基本肢位(外旋0度)とした肩甲骨の位置は前額面から約30度内旋している¹⁾。そのため、今回の結果では肩最大外旋位前後の肩甲骨外旋角度は約20度であるが、前額面からは10度内旋方向に位置する。この一連の運動が図8の②から③に移行する位相であり、その後の見かけ上の肩最大外旋位に近づいていくと考えられる。

力学的な視点から分析すると、今回示された肩

甲骨の動態は加速期に肩甲骨腕関節に加わる応力に対して適応していると考えられる。加速期において肩（体幹および肩甲骨を剛体と仮定し、この剛体と上腕のなす関節とされている）には前方への剪断力が加わると報告されている²²⁾。これは肩甲骨腕関節のみの運動で推察すると関節窩に対して上腕骨頭が後方へ変位する力と解釈できる²³⁾。そのため、肩甲骨が外転（内旋）し、関節窩が投球方向（前方）に近づくほど、関節を剪断する力に対して関節窩で受けることになる。上記のように肩甲骨は前額面から約10度内旋しており、加えて、この位相では体幹は投球側方向から反投球側方向への回旋運動を生じている²⁴⁾ため、関節窩の方向は矢状面に近く、剪断力は軽減されることが考えられる。肩甲骨のこの一連の運動が制限されると投球障害肩につながる可能性が高まることが推察される。野球選手の投球側の肩甲骨アライメントが外転（内旋）変位していることが多いことは報告されているが⁴⁾、肩甲骨が外転位に位置することは上記のことから考えると投球動作にとっては有利な側面もある。肩甲骨腕関節の外旋可動域拡大および内旋可動域の減少²⁵⁻²⁷⁾と同様に、肩甲骨外転位のアライメントも投球動作への適応²⁶⁾の結果と考えることもできる。

本研究の限界として、今回の結果はあくまでも全対象の平均値である。個別の分析をすると対象ごとのバリエーションは多いため、投球障害との関係を分析するためにはより個々の特徴について詳細な分析が必要になると考える。

まとめ

1. 大学硬式野球部投手を対象に、投球動作における肩甲骨の三次元運動を分析した。

2. 肩甲骨は後期コッキング期において前額面での後傾から、徐々に内旋（外転）により方向を変え、矢状面での上方回旋に切り替わるという動態を示した。

3. 最大外旋位前後では肩甲骨は内旋位（外転位）に位置し、下方回旋が加速運動に関与していた。

利益相反

本論文に関連し、開示すべき利益相反はなし。

文 献

- 1) Kapandji, I.A.. In: 塩田悦仁 (訳). 関節の生理学 I 上肢東京: 医歯薬出版; 2-75, 2006.
- 2) Pappas, AM, Zawacki, RM, Sullivan, T. Biomechanics of baseball pitching. *Am. J. Sports Med.* 1985; 13: 216-222.
- 3) 日本臨床スポーツ医学会整形外科学術部会. In: 野球障害予防ガイドライン. 東京: 文光堂; 177-187, 1998.
- 4) Burkhart, SS, Morgan, CD, Kibler, WB. The disabled throwing shoulder: spectrum of pathology Part III: The SICK scapula, scapular dyskinesis, the kinetic chain, and rehabilitation. *Arthroscopy.* 2003; 19: 641-661.
- 5) 宮下浩二, 浦辺幸夫, 小林寛和, 横江清司. 投球動作の肩最大外旋位における肩甲骨腕関節と肩甲胸郭関節および胸椎の角度. *日本臨床スポーツ医学会誌.* 2008; 16(3): 386-393.
- 6) 宮下浩二, 小林寛和. 投球動作における肩複合体の運動様式の種類. *日本整形外科スポーツ医学会雑誌.* 2010; 30: 113-118.
- 7) Abdel-Aziz, YI, Karara, HM. Direct linear transformation from comparator coordinates in close-range photogrammetry. In: *Proceedings American society of photogrammetry symposium on close-range photogrammetry.* Falls Church (VA). In: American Society of Photogrammetry Symposium on Close-Range Photogrammetry. 1-19, 1971.
- 8) Miyashita, K, Urabe, Y, Kobayashi, H, Yokoe, K, Koshida, S, Kawamura, M, Ida, K. Relationship between maximum shoulder external rotation angle during throwing and physical variables. *JSSM.* 2008; 7(1): 47-53.
- 9) 宮下浩二, 小林寛和, 横江清司. 投球時の肩外旋運動における肩甲骨腕関節と肩甲胸郭関節の連動. *スポーツ医・科学.* 2005; 17: 17-22.
- 10) Miyashita, K, Kobayashi, H, Koshida, S, Urabe, Y. Glenohumeral, Scapular, and Thoracic Angles at Maximum Shoulder External Rotation in Throwing. *Am J Sports Med.* 2010; 38: 363-368.
- 11) 武本有紀子. 手関節尺屈位が肩関節屈曲時の肩甲骨運動に与える影響. 広島大学大学院修士論文. 2007; .
- 12) 信原克哉. 肩 その機能と臨床. 東京: 医学書院; 372-402, 2001.
- 13) Bourne, DA, Choo, AM, Regan, WD, MacIntyre,

- DL, Oxland, TR. Three-dimensional rotation of the scapula during functional movements: an in vivo study in healthy volunteers. *J shoulder elbow Surg.* 2007; 16: 150-162.
- 14) Ludewig, PM, Phadke, V, Braman, JP, Hassett, DR, Cieminski, CJ, LaPrade, RF. Motion of the shoulder complex during multiplanar humeral elevation. *J Bone Joint Surg Am.* 2009; 91: 378-389.
- 15) Ludewig, PM, Behrens, SA, Meyer, SM, Spoden, SM, Wilson, LA. Three-dimensional clavicular motion during arm elevation: reliability and descriptive data. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2004; 34: 140-149.
- 16) Talkhani, IS, Kelly, CP. Movement analysis of asymptomatic normal shoulders: a preliminary study. *J Shoulder Elbow Surg.* 2001; 10: 580-584.
- 17) Andel, C, Hutten, K, Eversdijk, M, Veeger, D, Harlaar, J. Recording scapular motion using an acromion marker cluster. *Gait Posture.* 2009; 29: 123-128.
- 18) 筒井廣明, 山口光圀. 投球動作解析のための体表計測による肩甲骨腕関節の動きの検討. *肩関節.* 2003; 27(3): 561-565.
- 19) Feltner, ME. Three-dimensional interactions in a two-segment kinetic chain. Part II: Application to the throwing arm in baseball pitching. *Int. J. Sport Biomech.* 1989; 5: 420-450.
- 20) 田中 洋, 立花 孝, 大井雄紀, 二宮裕樹, 駒井正彦, 信原克哉, 林 豊彦, 佐志隆士. 投球動作のバイオメカニクスと投球障害. *臨床スポーツ医学.* 2012; 29(1): 47-54.
- 21) Kreighbaum, E, Berthels, KM. In: *Biomechanics: A qualitative approach for studying human movement* 4th ed. Allyn & Bacon; 335-354, 1990.
- 22) 田中 洋. 投球障害予防を目的とした動作時の肩関節負荷にする運動学・動力的研究. 新潟大学院自然科学研究 平成 27 年度博士論文. 2015; .
- 23) 田中 洋, 林 豊彦, 二宮裕樹, 高木陽平, 駒井正彦, 信原克哉. 投球動作におけるステップ足接地の肘下がりは動力的パラメータに影響するか? *整形スポ会誌.* 2017; 37(1): 46-52.
- 24) 宮下浩二, 小林寛和, 横江清司. 投球動作における下肢・体幹・上肢関節の連動. *Journal of Athletic Rehabilitation.* 2003; 4: 39-49.
- 25) Crockett, HC, Gross, LB, Wilk, KE, Schwartz, ML, Reed, J, O'Mara, J, Reilly, MT, Dugas, JR, Meister, K, Lyman, S, Andrews, JR. Osseous adaptation and range of motion at the glenohumeral joint in professional baseball pitchers. *Am J Sports Med.* 2002; 30: 20-26.
- 26) Reagan, KM, Meister, K, Horodyski, MB, Werner, DW, Carruthers, C, Wilk, K. Humeral retroversion and its relationship to glenohumeral rotation in the shoulder of college baseball player. *Am J Sports Med.* 2002; 30: 354-360.
- 27) Seitz, AL, Reinold, M, Schneider, RA, Gill, TJ, Thigpen, CA. No effect of scapular position on 3-dimensional scapular motion in the throwing shoulder of healthy professional pitchers. *J Sport Rehabil.* 2012; 21(2): 186-193.

(受付：2017年2月2日, 受理：2017年5月18日)

Three-dimensional dynamics of the scapula during the late cocking and acceleration phase of the throwing motion

Miyashita, K.^{*1,2}, Koyama, T.^{*3}, Ota, K.^{*2}
Tani, Y.^{*2}, Okamune, R.^{*2,3}

^{*1} College of Life and Health Science, Department of Physical Therapy, Chubu University

^{*2} Rehabilitation Science, Graduate School of Life and Health Science, Chubu University

^{*3} Matsushita Orthopedics

Key words: throwing motion, scapula, three-dimensional analysis

[Abstract] The purpose of this study was to identify the three-dimensional (3D) angle of the scapula during throwing. The subjects were 12 male college baseball pitchers. Throwing motion data were collected by four high-speed cameras and 3D coordinates of the shoulder complex were established by the direct linear transformation method for MER (maximum external rotation) calculation. Three-dimensional analysis was also performed to obtain the posterior tilt angle, upper rotation angle, and external rotation angle (including adduction angle) of the scapula. The posterior tilt angle increased from foot plant (FP) to maximum angle ($42 \pm 8^\circ$) at 61% of the overall phase and decreased thereafter. The upper rotation angle increased from FP to the maximum angle ($46 \pm 11^\circ$) at 86% of the phase and decreased during the acceleration phase. The external rotation angle increased from FP to the maximum angle ($26 \pm 10^\circ$) at 15% of the phase and decreased during the late cocking phase. The scapula tilted posterior after FP, and the scapula motion switched to upward rotation, while internal rotation (abduction) occurred during the late cocking phase.