

原 著

投球動作における肩関節の回旋角度評価

—三次元動作解析—

昭和大学医学部整形外科講座

岡田 智彰* 渡邊 幹彦 西本 雄飛

木村 岳 稲垣 克記

抄録：スポーツ障害の中でも投球障害肩は患者数も多く、これまで多くの研究がなされてきた。投球動作は全身の複合動作であり、特に加速期において障害が多く生じることが示され、関節への負荷などは先行研究で報告されている。しかし多くの動作が複合しているため一つのパラメータを評価することが困難であり、SLAP 損傷などの原因も未だに解明されていないのが現状と言える。その中でも肩関節回旋は肘や前腕の肢位に影響を受け、投球動作における肩関節回旋角度の評価は今まで困難であった。本研究では、独自に開発した装置と三次元動作解析で上腕骨を指標に肩関節の回旋角度を算出した。実験は上肢に既往歴のない右投げの野球経験者6名を対象とし、一人当たり5投で検証した。独自に開発したマーカーベースとアンカーを装着し、モーションキャプチャーシステムで記録、三次元動作解析ソフトで得られた空間座標からベクトルと行列と三角関数を用いて上腕骨長軸回旋角度の変化量を算出し、経時的に評価することで加速期における肩関節回旋角度を求めた。6名30投の肩関節回旋角度の平均値は $113.13 \pm 52.47^\circ$ であった。選手のうち最大は $190.29 \pm 1.36^\circ$ ($p < 0.05$)、最小は $34.82 \pm 2.09^\circ$ ($p < 0.05$) を示した。また5名はボールリリース直前で肩関節回旋角度が 20° 前後に減少していたが、1名は $129.37 \pm 5.53^\circ$ ($p < 0.05$) を示し有意差を認めた ($p = 0.00033$)。本研究において加速期の特にボールリリース直前の肩関節回旋角度を評価できたこと、また上腕骨を直接指標として投球動作を撮影し数学的な解析ができたことは、先行研究と比し選手個人の投球フォームを反映している点でより臨床的な評価方法だと考える。更に精度を高め障害群における追加実験を行うことで、投球障害肩の予防や治療、今後の研究に寄与できると考えられる。

キーワード：投球障害肩、肩関節、回旋角度、ボールリリース、投球動作解析

緒 言

投球動作は開始から終了までが2秒に満たない素早い全身の複合動作である。若年の肩関節障害は投球障害肩が圧倒的に多く、先行研究でその発生原因や病態、予防法・治療法・疫学などが長年にかけて報告されている。投球動作はwind-up期 (wind-up)、cocking前期 (early-cocking)、cocking後期 (late-cocking)、加速期 (acceleration)、フォロースルー期 (follow-through) の5つの相に大別される¹⁾。SLAP (Superior Labrum Anterior Posterior) 損傷や肩腱板関節面不全断裂などを代表とする投球障害肩は、肩関節に対して長期に微小な外傷が蓄積し overuse injury として発生すると考えられており²⁾、

選手が肩関節に疼痛を自覚するのは、着地 (Foot Plant; FP) から肩関節 2nd ポジション (肩関節 90° 外転位、肘関節 90° 屈曲位) での最大外旋 (Maximum External Rotation; MER) を経てボールリリース (BR) にかけての相、late-cocking から acceleration の間で最も多いことが知られている³⁻⁵⁾。SLAP 損傷の原因は肩甲上腕関節での捻れや牽引が原因とされ^{6,7)}、また肩関節最大外旋から最大内旋までの変化量より、肩関節の回旋動作が投球動作において最も大きな運動であるとの報告⁸⁾ や、肩関節内旋時の捻転力や加速度も報告されている^{2,9-11)}。しかしこれらの方法は前腕と上腕がなす平面が両肩を結ぶ線との角を stick-figure を用いて計算したもので、実際の肩関節の回旋角度を評価したのではなく、また

*責任著者

われわれが渉猟し得た中では障害が多い acceleration における肩関節回旋角度を報告している文献はない。それは投球時の肩関節は、外転、水平内転、回旋が同時に生じ、その他にも肘関節伸展、前腕回内外、体幹回旋、上半身の前屈、前方への重心移動、が複合的に生じているため一つのパラメーターを算出するのが困難だからだと考える。投球障害肩の研究の一助とすべく独自に開発した装置と三次元動作解析を用いて上腕骨の長軸回旋角度を直接算出することで、投球動作の acceleration における肩関節回旋角度を評価した。

研究方法

本研究は当施設の倫理委員会の承認（1859号）のもとに行われた。

1. 対象と実験

反射マーカースを取り付けるマーカースベースと体に装着するアンカーを3Dプリンターで独自に作製した。マーカースベースは角度と長さが異なる4本のアンテナ構造を有し、全てが互いに異なる構造であるため、カメラが2つ以上の異なる反射マーカースを同一のものだと誤認識することを減らすことができる。

肩関節と肘関節に既往歴のない野球経験者6名（選手A～F、大学野球レベル）を対象とした。平均年齢28歳（24～34歳）、平均身長169.5cm（157～184cm）、平均体重70.8kg（58～83kg）、平均野球歴は11.7年（6～18年）、全員が上手投げ（overhand delivery）であった（Table 1）。アンカーを右手関節、右上腕中間部、骨盤、左足関節に装着（Fig. 1）、ボールにも反射マーカースシールを貼付した。同位置

でセットポジションを取れるよう床にマーキングし、マウンドからホームベースまでの距離18.4mとの比より9m先の壁の地面から約1mの高さにターゲットを設定した。十分な準備運動と数回の投球の後一人当たり7投を計測し、評価可能なデータとして一人当たり5投を採用した。各選手の肩関節回旋角度の分布を評価し、選手間で比較検討した。

2. 動作解析

Wind-up から follow-through までを120 Hz ハイスピード Optitrack カメラ[®]（Optitrack Japan 社製）9台で撮影した。反射マーカースの軌跡は動作解析ソフト VENUS3D[®]（Nobbytech 社製）の三次元空間



Fig. 1 shows our original devices fixed on right wrist, right upper limb, pelvis and left ankle. The device on left ankle is intended to know “FP”.

Table 1 Personal data of subjects

| | age (y.o.) | height (cm) | weight (kg) | career (y) | posotion |
|------|------------|-------------|-------------|------------|------------|
| A | 24 | 169 | 68 | 8 | outfielder |
| B | 30 | 163 | 58 | 6 | outfielder |
| C | 29 | 170 | 68 | 18 | infielder |
| D | 26 | 174 | 83 | 11 | pitcher |
| E | 34 | 184 | 74 | 12 | pitcher |
| F | 25 | 157 | 74 | 15 | infielder |
| mean | 28 | 169.5 | 70.8 | 11.7 | |

6 players without trouble of their shoulder and elbow.
2 pitchers, 2 infielders and 2 outfielders.

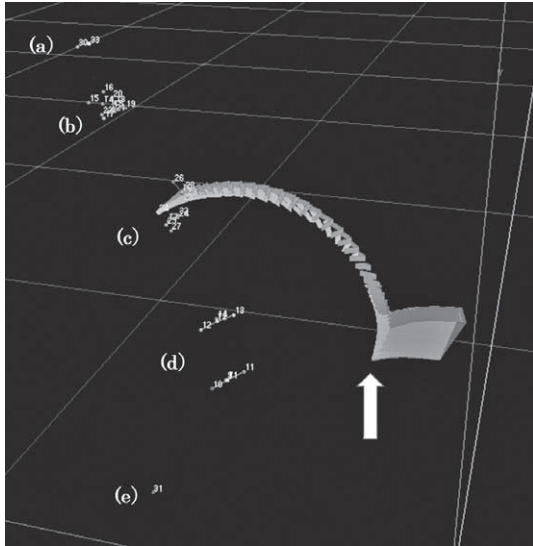


Fig. 2 shows the trace of triangle T from “FP” to “BR”. (a); ball (b); right wrist (c); right upper limb (d); pelvis (e); left ankle ↑; MER. Right wrist, right upper limb and pelvis are arranged in a straight line with ball.

に描出され、三次元座標も表示される。上腕の反射マーカーから任意の三点を選択し、上腕骨長軸にほぼ垂直を成すスティックピクチャー三角形 T を設定した (Fig. 2)。この三点は時間経過しても互いに位置を変えない存在で、三角形 = 剛体としてみなすことができる。三角形 T の 1 フレーム毎の変化量を算出し重ねていくことで上腕骨長軸回旋角度を求めることができると考えた。MER から BR までの時間を投球時間とし、またその間での上腕骨長軸回旋角度を肩関節回旋角度と定義した。

3. 回旋角度の計算

空間を移動しているため固定された一点から上腕骨長軸回旋を観察することが困難である。今回、肩関節回旋以外のパラメーターを打ち消すために xy 平面に置き換え計算する手法を選択した。

- 1) 三角形 T の一点を原点へ平行移動する。
 - 2) xyz 座標上に残る二点に回転操作を加え xy 平面へ置換する (点 A', B')。
 - 3) 線分 A' B' と x 軸の成す角 θ を算出しフレーム毎における変化量を求める。
- 点に回転操作を加えることはベクトルに回転行列を掛けることに相当するため、三次元空間の場合、任意の回転操作 R は $R_x(\alpha)$, $R_y(\beta)$, $R_z(\gamma)$ の積

で表せる。原点 O から 2 点 A, B へ向けたベクトルを a, b と表す時、 $a \times b$ は a と b の両方に垂直なベクトルであるから、OAB を含む平面 P の単位法線ベクトル n は

$$n = \frac{(a \times b)}{|a \times b|}$$

で表せる。三角形 OAB を回転操作 $R = R_y(\beta) R_x(\alpha)$ で xy 平面上の OA' B' に移すとき、n は R の作用で z 方向の単位ベクトル e_z に移される。よって e_z は逆の回転操作 $R^{-1} = R_y(-\beta) R_x(-\alpha)$ で n に移される。すなわち、

$$n = R_x(-\alpha) R_y(-\beta) e_z$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \sin \beta \\ \sin \alpha \cos \beta \\ \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}$$

と表せる。これを α , β について解き得られた回転操作を a, b に施すと点 A', 点 B' の座標が求められる。線分 A' B' と x 軸より成す $\tan \theta$ に逆三角関数を施すと

$$\theta = \text{ATAN}(\tan \theta)$$

より角 θ が求められ、角度の実数が算出できる。これらの計算は Excel 関数を使用した。この角度を経時的に追跡した値は acceleration において上腕骨が長軸回旋した変化量と一致する。

4. 統計学的解析

各選手の算出値の信頼区間は t 分布を用い推定し、肩関節回旋角度の平均値は Kruskal-Wallis 検定を用い多群間比較を行った。有意水準は $p < 0.05$ とした。

結 果

6 名 30 投における回旋角度の変化量のグラフを Fig. 3 に示す。肩関節回旋角度は BR に近づくにつれ減少する傾向が認められた。

① 全投球の肩関節回旋角度の平均値は $113.13 \pm 52.47^\circ$ (最大 191.31° , 最小 32.13°)、平均投球時間は約 0.14 sec (最大 0.325 sec, 最小 0.05 sec) であった。

② 各選手の肩関節回旋角度と平均投球時間は、A :

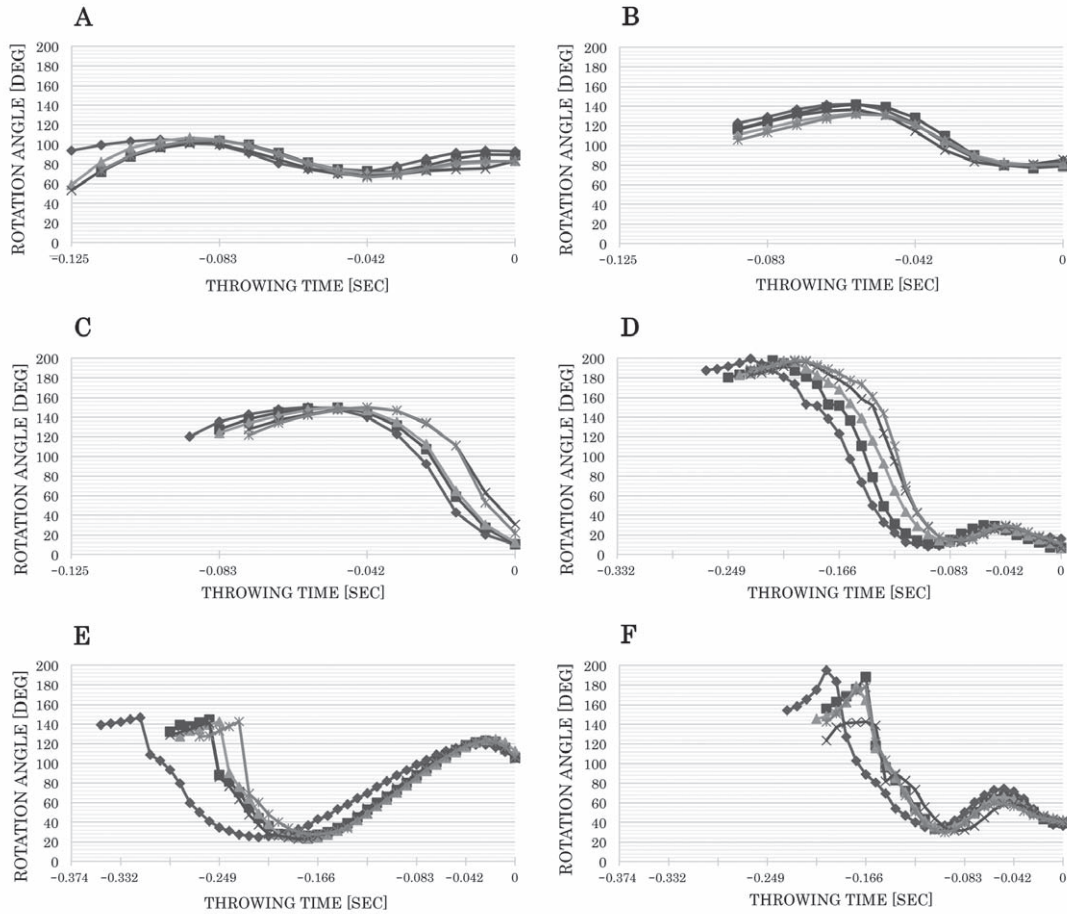


Fig. 3 Shows the change of shoulder rotation angle
 These graphs are adjusted to become the ball release at last scale. The vertical axis expresses rotation angle, positive direction shows external rotation, negative direction shows internal rotation. The horizontal axis expresses throwing time. MER is the point of 5 scales from the top of each graphs.

34.82 ± 2.09° (0.098sec), B ; 57.89 ± 4.91° (0.067 sec),
 C ; 132.93 ± 7.98° (0.057 sec), D ; 190.29 ± 1.36°
 (0.22 sec), E ; 118.70 ± 1.99° (0.27 sec), F ; 144.13
 ± 17.08° (0.19 sec) であった (Table 2).

③ BR 直前 0.042 sec (5 フレーム) における肩関節回旋角度は、A ; 16.5 ± 2.86°, B ; 21.2 ± 6.96°, C ; 129.37 ± 5.53°, D ; 17.8 ± 4.8°, E ; 15.12 ± 2.8°, F ; 22.68 ± 6.75° であった (Table 3). Kruskal-Wallis 検定を用い算出値を検定した結果、選手 C を除く 5 名と選手 C には有意差を認めた (p = 0.00033).

考 察

投球フォームはさまざまな構成要素からなり、各選手の特徴が反映される。

Roach らは座位かつ肩甲骨を固定した状態で肩関節 2nd ポジションにおける上腕骨の回旋角度を計測し、可動域の平均値は約 152.2° (外旋 100.7 ± 10.9 内旋 51.5 ± 15.5°) であると報告している¹²⁾ が、選手 D を除く 5 名はそれぞれ結果の平均値がそれよりも低い値を示し、選手 D の平均値はそれよりも高い値を示した。Codman によれば、肩関節の挙上と回旋には『挙上をしていくと回旋角度が低下する、いわゆる Pivotal Paradox』の関係があり¹³⁾、選手 D の投球動作における肩関節外転位は Roach らが測定した肢位 (肩関節 90°外転位) よりも下垂位である可能性が示唆される。

また、投球障害が生じやすい acceleration において BR 直前に肩関節回旋角度が減少するという一定

Table 2 Results of measurement of the internal rotation angle during acceleration phase

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | mean ± S.D. |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------|
| A | 35.0403 | 32.1265 | 36.0233 | 32.9805 | 37.9301 | 34.82 ± 2.09* |
| B | 61.9787 | 64.6053 | 52.8736 | 57.8788 | 52.0892 | 57.89 ± 4.91* |
| C | 139.8968 | 139.3382 | 137.802 | 119.404 | 128.2218 | 132.93 ± 7.98* |
| D | 191.3076 | 190.8779 | 191.0453 | 190.6226 | 187.6036 | 190.29 ± 1.36* |
| E | 121.6167 | 118.9056 | 119.2551 | 118.2923 | 115.4053 | 118.70 ± 1.99* |
| F | 160.9829 | 154.8687 | 144.9306 | 111.8187 | 148.0392 | 144.13 ± 17.08* |

Unit : degree
* ; p < 0.05

In each subject, all the measured values are included in the 95% confidence interval.

Table 3 Results of measurement of the rotation angle just before ball release

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | mean ± S.D. |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|--------------------|
| A | -20.949 | -17.369 | -12.154 | -15.293 | -16.74 | 16.5 ± 2.86* |
| B | 18.035 | 30.8317 | 23.847 | 9.8969 | 23.3881 | 21.2 ± 6.96* |
| C | 130.392 | 134.321 | 134.531 | 119.404 | 128.222 | 129.37 ± 5.53*(**) |
| D | 8.6098 | 18.0289 | 20.7893 | 22.2296 | 19.3506 | 17.8 ± 4.8* |
| E | 12.311 | 17.343 | 11.314 | 18.37 | 16.255 | 15.12 ± 2.8* |
| F | 34.7001 | 24.5682 | 21.232 | 16.673 | 16.229 | 22.68 ± 6.75* |

Unit : degree
* ; p < 0.05

In sub.A, the negative marks show external rotation. The mean of rotation angle are expressed in absolute value. In each subject, all the measured values are included in the 95% confidence interval.

** ; There is significant difference in sub.C and other subjects by kruskal Wallis test (p = 0.00033).

のパターンを認めた。障害予防の観点からはBR時において肩関節はゼロポジションに位置していることが望ましい¹⁴⁾。一方、不適切な投球フォームで投球障害肩を来す選手は俗にいう「手投げ」であることが多く、これは肩関節の内外旋だけで投げていると言い換えられる。BR直前0.042secにおける肩関節回旋角度は、選手Cを除く5名はそれぞれ20°前後であり肩関節の肢位はゼロポジション近傍で投げていると予想されるが、選手Cのみ130°近い値を示しており「手投げ」になっていると考えられる。

投球障害肩の発生には投球フォームだけでなくさまざまな因子があるが¹⁵⁻¹⁸⁾ 障害発生後の治療やリハビリテーションだけでなく、障害の予防に関しても医学的な観点で指導していくことが重要である。accelerationの特にBR直前の肩関節回旋角度を算出できる本法は医学的な指導に際して臨床的に有用だと考える。また、皮膚に直接マーカーを貼付して

投球動作の撮影と解析を行った先行研究は多数あるが、これらは動作時の骨と皮膚の挙動のズレを解決できない方法であり、上腕骨を直接指標とし数学的に解析した本法はより正確なデータを得ることができると評価方法だと考える。

本研究の限界として、肩甲骨の挙動を把握できないことがある。筋肉に囲まれた肩甲骨を追従できるマーカーを設置することが非常に困難でありいまだに画期的な動作解析方法は示されていない¹⁹⁻²²⁾。正しい投球フォームを指導する上で避けて通れない研究項目である。また今回設定した三角形Tは上腕骨の長軸に対し完全な垂直ではないため、変化量より回旋角度を求めることはできたがMERの正確な角度が計測できない。アンカーやマーカーベースの設置位置や更なる開発にも熟考の余地がある。

本研究は健常な選手のみを対象としているため、「手投げ」である不適切な投球フォームを認めても

障害との関係を明らかにできない。投球障害を有する選手の肩関節回旋角度と投球フォームを照合する追加実験を行い障害発生との関連性を見出せば、今後の研究に大いに寄与できると考える。

結 語

モーションキャプチャーシステムと三次元動作解析を用いて投球動作時の acceleration における上腕骨長軸の回旋角度の計測し、回転行列の計算手法で肩関節回旋角度を算出した。本法で投球フォームや障害との関連性を探れば投球障害肩の研究に有益であると考ええる。

利益相反

本研究に関連し、開示すべき利益相反関係にある企業等はない。

文 献

- 1) Jobe FW, Moynes DR, Tibone JE, *et al.* An EMG analysis of the shoulder in pitching. A second report. *Am J Sports Med.* 1984;12:218-220.
- 2) Fleisig GS, Andrews JR, Dillman CJ, *et al.* Kinetics of baseball pitching with implications about injury mechanisms. *Am J Sports Med.* 1995;23:233-239.
- 3) Andrews JR, Carson WG Jr, McLeod WD. Glenoid labrum tears related to the long head of the biceps. *Am J Sports Med.* 1985;13:337-341.
- 4) 渡辺幹彦, 広瀬秀史, 小川剛司, ほか. 投球障害肩の関節内病変と病態について. *肩関節.* 1996;20:441-444.
- 5) 信原克哉. 肩とスポーツ. 肩. 第4版. 東京: 医学書院; 2012. pp349-415.
- 6) 渡辺幹彦. 投球障害肩の病態 関節鏡所見および動作解析による検討. *昭和医会誌.* 2000;60:258-265.
- 7) Grossman MG, Tibone JE, McGarry MH, *et al.* A cadaveric model of the throwing shoulder: a possible etiology of superior labrum anterior-to-posterior lesions. *J Bone Joint Surg Am.* 2005;87:824-831.
- 8) 田中 洋, 立花 孝, 大井雄紀, ほか. 投球動作のバイオメカニクスと運動連鎖 投球動作のバイオメカニクスと投球障害. *臨スポーツ医.* 2012;29:47-54.
- 9) Pappas AM, Zawacki RM, McCarthy CF. Rehabilitation of the pitching shoulder. *Am J Sports Med.* 1985;13:223-235.
- 10) Bigliani LU, Codd TP, Connor PM, *et al.* Shoulder motion and laxity in the professional baseball player. *Am J Sports Med.* 1997;25:609-613.
- 11) Hirashima M, Yamane K, Nakamura Y, *et al.* Kinetic chain of overarm throwing in terms of joint rotations revealed by induced acceleration analysis. *J Biomech.* 2008;41:2874-2883.
- 12) Roach NT, Lieberman DE, Gill TJ 4th, *et al.* The effect of humeral torsion on rotational range of motion in the shoulder and throwing performance. *J Anat.* 2012;220:293-301.
- 13) Codman EA. The shoulder: rupture of the supraspinatus tendon and other lesions in or about the subacromial bursa. Boston: Thomas Todd; 1934.
- 14) 二宮裕樹, 田中 洋, 信原克哉. 投球障害肩 投球動作 よいフォーム, わるいフォーム. *Orthopaedics.* 2007;20:19-27.
- 15) Meister K. Injuries to the shoulder in the throwing athlete. Part two: evaluation/treatment. *Am J Sports Med.* 2000;28:587-601.
- 16) 夏 恒治, 望月 由, 柏木健児, ほか. 投球障害肩における関節窩にかかる応力分布の解析 DMSB (distribution of mineralization of subchondral bone plate) 測定を用いて. *肩関節.* 2004;28:453-457.
- 17) Sabick MB, Kim YK, Torry MR, *et al.* Biomechanics of the shoulder in youth baseball pitchers: implications for the development of proximal humeral epiphysiolysis and humeral retrotorsion. *Am J Sports Med.* 2005;33:1716-1722.
- 18) 夏 恒治, 望月 由, 柏木健児, ほか. 投球障害肩における関節窩にかかる応力分布の解析. *関節外科.* 2009;28:1345-1351.
- 19) 菊入大輔, 桐生慎哉, 中村康雄, ほか. 肩甲骨運動測定用体表マーカーの上腕挙上による肩甲骨特徴点に対する偏位の in-vivo 計測. *電子情報通信会技研報 ME とバイオサイバネティクス.* 2003;103:17-22.
- 20) 金谷整亮, 中村真理, 建道寿教, ほか. モーションキャプチャー・システムを用いた肩複合体の3次元運動解析. *肩関節.* 2004;28:219-222.
- 21) 田中 洋, 林 豊彦, 信原克哉, ほか. 投球動作と肩関節後方の柔軟性との関係. *日整外スポーツ医会誌.* 2013;33:176-183.
- 22) Oliver G, Weimar W. Scapula kinematics of youth baseball players. *J Hum Kinet.* 2015; 49:47-54.

EVALUATION OF SHOULDER ROTATION ANGLE IN PITCHING MOTION: A 3-DIMENSIONAL ANALYSIS

Tomoaki OKADA, Mikihiro WATANABE, Yuhi NISHIMOTO,
Takeshi KIMURA and Katsunori INAGAKI

Department of Orthopedic Surgery, Showa University School of Medicine

Abstract — Pitching involves the combined motion of the entire body. Injury is common in the acceleration phase of the pitching motion. Previous studies have reported on factors like the load placed on joints during this phase. The complexity of the combined motions makes evaluating a single pattern challenging. In such a complex motion, the rotational angle of the shoulder joint is affected by the position of the elbows and forearms, rendering evaluation of the rotational angle during pitching motion difficult. In this study, we investigated the pitching motion of 6 right-handed individuals experienced in baseball, without a history of arm surgery. Five throws were analyzed per individual. Subjects wore marker bases and anchors that we developed for recording via a motion capture system. Changes in the humeral rotation angle were calculated based on spatial coordinates obtained using software that analyzes 3D motion over time. The mean rotation angle across all attempts was 113.13° ; the maximum and minimum rotational angles of the humerus were $190.29 \pm 1.36^\circ$ ($p < 0.05$) and $34.82 \pm 2.09^\circ$ ($p < 0.05$), respectively. The rotational angle of the shoulder joint of the 5 subjects immediately before ball release decreased to approximately 20° . However, this value for one individual was $129.37 \pm 5.53^\circ$ ($p < 0.05$), showing a significant difference ($p = 0.00033$). The measurement of shoulder joint rotation, immediately before ball release, reflects the individualized pitching motions. Unlike previous reports, the possibility of mathematical analysis of pitching motion images (with the humerus as an index) indicates that this method can be used for clinical evaluation. We plan to conduct additional high-precision studies on shoulder joint rotation in a group of disabled individuals to advance the prevention and treatment of shoulder disorders due to pitching.

Key words: baseball, shoulder injury, shoulder rotation, ball release, motion analysis

〔受付：12月25日，2017，受理：1月18日，2018〕