

## ストレートとカーブの投球動作の運動学・動力学解析

中村 康雄<sup>1</sup>, 林 豊彦<sup>2</sup>

### Comparison of kinetic parameters of upper extremity between fastball and curveball pitches

Yasuo Nakamura<sup>1</sup>, Toyohiko Hayashi<sup>2</sup>

This study aimed to compare fastball and curveball pitches according to the resultant forces and moments of the shoulder and the elbow joints. We obtained kinematic data with regard to the whole body movement involved in the two styles of pitching: fastball and curveball, through the use of a motion capture system. We then recorded the 3-dimensional positions of the markers attached whole body, at 500Hz. We used four rigid body models in a kinetic analysis of the upper-body, and estimated the resultant joint forces and moments of the wrist, elbow and shoulder, using the inverse dynamics technique. The 14 subjects were given a warm-up period, before the collection of data began. Fastball speeds were significantly faster than curveballs, for all subjects. The movement of the hand and forearm between fastball and curveball are almost similar without the movement of hand and forearm. The force and moment of the shoulder during fastball pitch are larger than the curveball pitch slightly. The share forces of the elbow during curveball pitch are larger than the fastball pitch slightly.

**[Keywords]** Baseball pitching, kinetics, kinematics, fastball, curveball

本論文は、投球動作中の野球投手の肩関節と肘関節について関節間力と関節モーメントを算出し、ストレートとカーブの投球動作を比較することを目的とした。我々は、野球投手の骨特徴点上に貼付したマーカの三次元位置を、モーションキャプチャ・システムを用いてサンプリングレート 500Hz で計測した。計測した投球動作から、上肢の関節角度を算出した。肩関節と肘関節の関節間力と関節モーメントは、4リンクの剛体モデルを用いて逆動力学解析した。データ計測の開始前に、14名の被験者は、十分なウォーミングアップを行った。ストレートの球速は、カーブの球速より有意に速かった。それぞれの被験者のカーブの投球姿勢は、手関節と前腕の動作を除き、ほぼストレートの投球姿勢と同等であった。肩関節の関節間力と関節モーメントは、ストレートが僅かに大きく、肘関節の関節間力は、カーブが僅かに大きかった。

**[キーワード]** 投球動作, 運動学, 動力学, ストレート, カーブ

### I. 緒言

野球投手は、試合に勝つことを目的として、さまざまな球種を投げる必要がある。さらに投手は、練習や試合において投球動作を何度も繰り返す。そのため投手の肩や肘は、通常では考えられないほど酷使される。関節周囲の筋肉、靭帯、腱などの組織は、酷使により疲労し、機能が低下する。その結果、関節の機能に不均衡が生じ、肩や肘に障害が発生する可能性が高くなる。投球障害の発生は、ほとんどの場合、酷使が関与していると言われている (Meister, 2000)。障害の発

生を予防する、もしくは、できるだけ早い段階に障害を発見するためにも、個々の投手の投球動作を正確に記録し評価することが重要である。

これまでに数多くの研究者が、投球における投球腕の動作を動力学的に解析してきた (Feltner and Dapena, 1986; Feltner and Dapena, 1989; Fleisig, et al., 1995; Fleisig, et al., 1996; Fleisig, et al., 1999; Stodden, et al., 2005; Werner, et al., 1993; Werner, et al., 2001)。これらの研究は、ストレート (直球) を投球したときに、肩や肘に加わる力とモーメントを動力学解析したものである。Fleisig et al. (1995) は、肘の内反モー

1 同志社大学スポーツ健康科学部 (Faculty of Health and Sports Science, Doshisha University)

2 新潟大学工学部福祉人間工学科 (Department of Biocybernetics, Faculty of Engineering, Niigata University)

メント, 肩関節間力の前方・後方成分, 肩の水平内転モーメントといった動力学パラメータと投球障害の関係について報告した. 投球動作の運動学解析については, これまでに幾人かの研究者らが, 異なる球種における投球動作を運動学的に解析している (Barrentine, et al., 1998; Elliott, et al., 1986; Escamilla, et al., 1998; Sakurai, et al., 1993). Elliott et al. (1986) は, 6名のオーストラリア人投手のストレートとカーブの投球動作を記録し, 手関節, 肘関節, 肩関節の関節角度, ストライド長, ボール速度を解析した. Sakurai et al. (1993) は, 6名の日本人大学生投手の投球動作を計測し, ストレートとカーブにおける投球腕の関節角度を評価した. Barrentine et al. (1998) は, 8名の大学生投手のストレート, カーブ, チェンジアップを解析して, 手関節と肩関節の運動学パラメータと時間パラメータを評価した. Escamilla et al. (1998) は, 16名の大学生野球投手のストレート, カーブ, チェンジアップ, スライダーを, 全身の26個の運動学パラメータを用いて解析した.

しかしながら, ストレートとカーブといった異なる球種間における, 投球腕の動力学的な解析は十分に報告されていない. 異なる球種間における動力学データを蓄積することは, 投球動作メカニズムの理解を助けるものと考えられる. そこで, この論文では, ストレートとカーブの投球動作の動力学パラメータを定量評価し, 動力学データを蓄積することを目的とする.

## II. 方法

### 1. 対象

被験者は, 14名の日本人投手(大学生, 社会人, プロ野球選手を含む)とした. 投球動作は, 信原病院バイオメカニクス研究所(兵庫県たつの市)にて, 2001年~2005年に測定した. 実験に際し, 被験者に実験の趣旨を説明し, 実験参加の同意を得た. 対象は, 測定時点で負傷していない, 負傷から回復している, 少なくとも12ヶ月間の間に外科手術がない場合に正常と見なした (Dillman, et al., 1993). 投球スタイルは, オーバーハンドとスリークオータのみとした. また, 各投手は, 練習や試合環境で, ストレート (FB) とカーブ (CB) の投球経験が少なくとも3年以上のものとした (Escamilla et al., 1998). 被験者の年齢は  $24.3 \pm 5.09$  歳, 身長は  $1.79 \pm 0.062$  [m], 体重は  $73.4 \pm 8.149$  [kg] であった.

### 2. 測定方法

投球動作の測定時, 投手は, 上半身裸で体にフィットするスパッツと各自の野球シューズを着用した. 投手は, 十分にウォーミングアップした後, 室内に設置

された公式サイズのピッチングマウンドからキャッチャーに向かって投球した.

投球動作を測定するために, 我々は, 両面テープを用いて被験者の骨特徴点上の体表に34個の球形の反射マーカ(直径14mm)を貼付した(図1). 左右の腕それぞれに, 次の6個の骨特徴点を選択した: 肩峰 (AC), 上腕骨外上顆 (EL), 上腕骨内上顆 (EM), 橈骨茎状突起 (RS), 尺骨茎状突起 (US), 第三中手骨遠位端背側 (MC3). 左右の足にも次の6個の骨特徴点を選択した: 大転子 (GT), 大腿骨外顆 (FL), 大腿骨内顆 (FM), 足関節外側 (ML), 足関節内側 (MM), 第三中足骨遠位端背側 (MT3). 頭部には, 3つの特徴点を選択した: 頭頂部 (PA) と左右側頭部 (ST\_R, ST\_L). 体幹には, 4つの骨特徴点を選択した: 胸骨上切痕 (IJ), 剣状突起 (PX), 第7頸椎棘突起 (C7), 第7胸椎棘突起 (T7). 骨盤には, 3個の骨特徴点を選択した: 左右上前腸骨棘 (AS\_R, AS\_L), 左右後上腸骨棘の中点 (PS).

投球動作は, モーションキャプチャ・システム (ProReflex™ MCU-500+, Qualisys, Sweden) を用いて計測した. このカメラシステムは, 7台の同期した CCD カメラにより 500Hz で反射マーカの3次元位置を計測できる. これらのカメラは, 被験者を360度取り囲むように, 投球マウンドの上方に設置した. また, 2台のハイスピードカメラ (HSV-500C<sup>3</sup>, NAC, Japan) を用いて投球動作時の画像も記録した. 2台のハイスピードカメラは, モーションキャプチャ・システムと同期して, 500Hz で記録できる. ボールの速度は, スピードガンを用いて計測した.

ストレートとカーブの配球の組み合わせは, 試合時のように, キャッチャーと投手が決定した. キャッチャーは, 投手の投げたボールがストライクゾーンに入ったかを判定した. 二つの球種に対して, 投手がそれぞれ三つのストライクを投げるまで測定を繰り返した (Barrentine, et al., 1998). 測定ノイズを軽減するため, 各成分 (XYZ 軸) 独立にスプライン関数を用いて平滑化した (Woltring, 1986).

### 3. 座標系の設定

図2は, グローバル座標系 ( $\Sigma_G$ ) と5つのローカル座標系 ( $\Sigma_P, \Sigma_T, \Sigma_U, \Sigma_F, \Sigma_H$ ) の関係を示している (Wu, et al., 2005).

グローバル座標系 ( $\Sigma_G \equiv O_G - X_G Y_G Z_G$ ) の原点  $O_G$  は, ピッチングプレートの中心とした.  $X_G$  軸は,  $O_G$  からホームプレートの中心に向かうベクトルとした.  $Y_G$  軸は, 鉛直上方を向くベクトルとした.  $Z_G$  軸は,  $X_G$  軸と  $Y_G$  軸の外積とし,  $O_G$  から三塁ベースに向く.

胸部座標系 ( $\Sigma_T \equiv O_T - X_T Y_T Z_T$ ) の原点  $O_T$  は, IJ とした.  $Y_T$  軸は, PX と T7 の中点から IJ と C7 の中

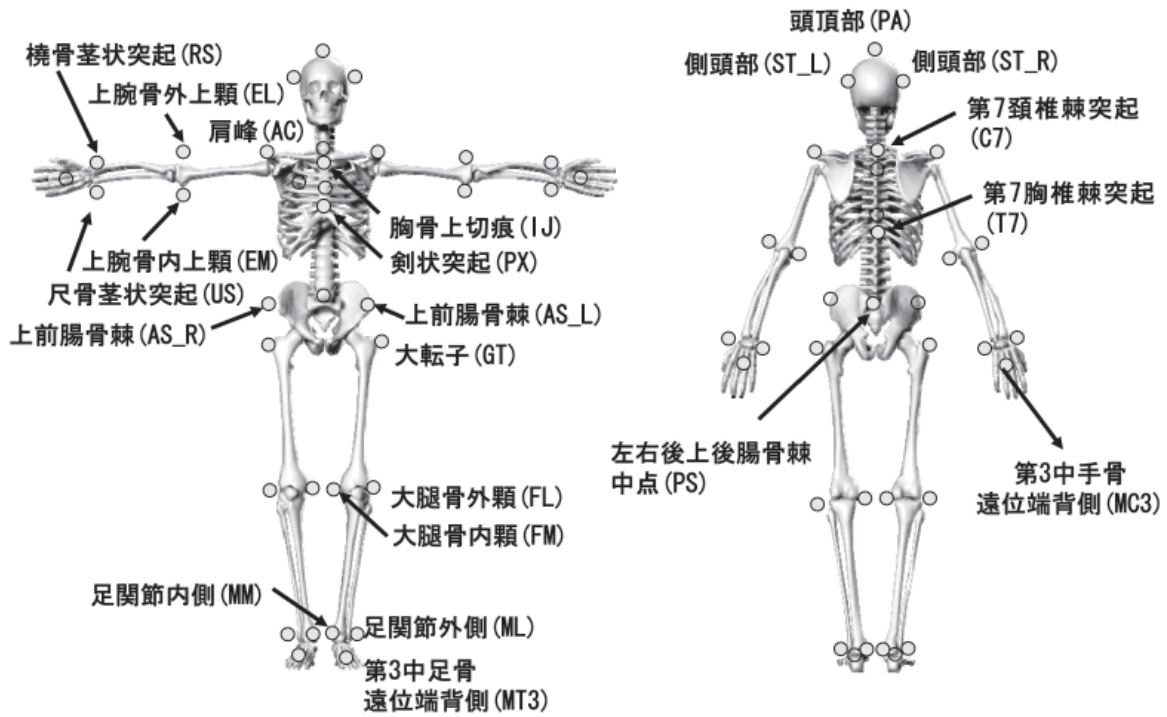


図1 マーカの貼付位置

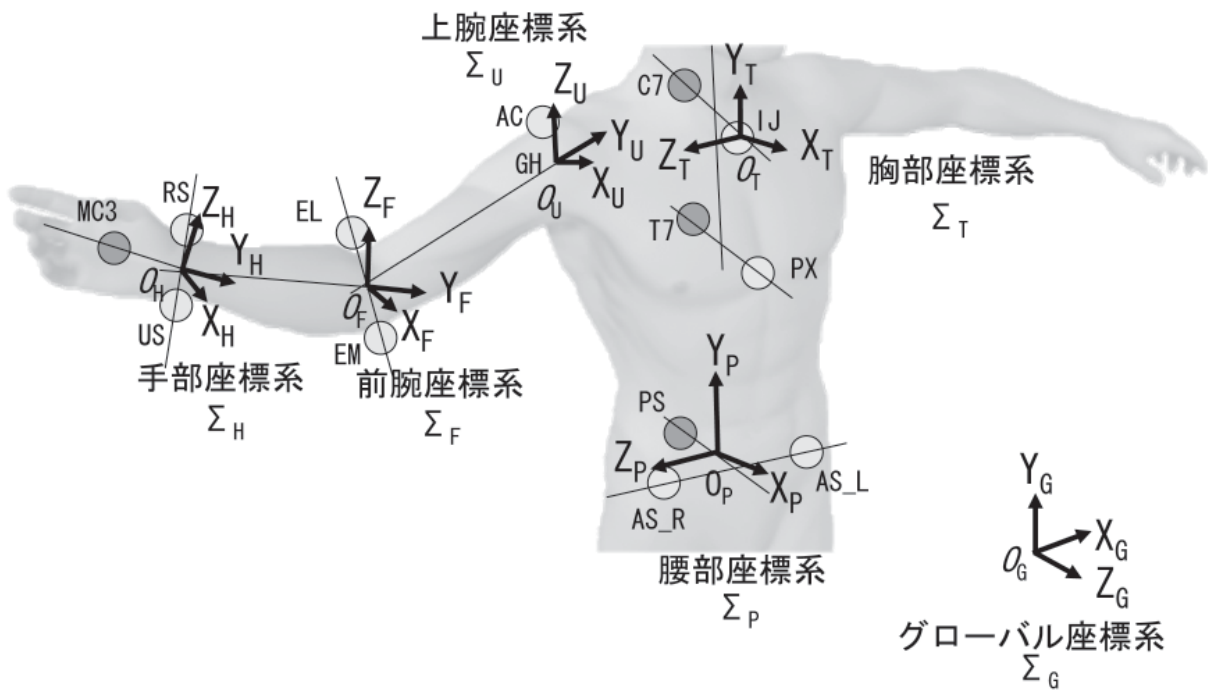


図2 ローカル座標系の設定

点に向かう単位ベクトルとし、上方を向く。Z<sub>T</sub>軸は、C7からIJに向かう単位ベクトルとY<sub>T</sub>の外積とし、右側を向く。X<sub>T</sub>軸は、Y<sub>T</sub>とZ<sub>T</sub>の外積とし、前方を向く。

骨盤座標系 ( $\Sigma_p \equiv O_p - X_p Y_p Z_p$ ) の原点O<sub>p</sub>は、AS\_RとAS\_L、PSの midpointとした。Z<sub>p</sub>軸は、AS\_LからAS\_Rへの単位ベクトルとし、右側を向く。Y<sub>p</sub>軸は、Z<sub>p</sub>とPSからAS\_LとAS\_Rの midpointへ向かう単位ベクトルとの外積とし、上方を向く。X<sub>p</sub>軸は、Y<sub>p</sub>とZ<sub>p</sub>の外積とし、前方を向く。

上腕座標系 ( $\Sigma_u \equiv O_u - X_u Y_u Z_u$ ) の原点は、肩峰(AC)から推定される肩関節中心(GH)とした(Fleisig et al., 1996)。Y<sub>u</sub>軸は、EMとELの midpointからGHへ向かう単位ベクトルとした。X<sub>u</sub>軸は、EMからELへ向かう単位ベクトルとY<sub>u</sub>の外積とし、前方を向く。Z<sub>u</sub>軸は、X<sub>u</sub>とY<sub>u</sub>の外積とした。

前腕座標系 ( $\Sigma_f \equiv O_f - X_f Y_f Z_f$ ) の原点O<sub>f</sub>は、EMとELの midpointから推定できる肘関節中心(EC)とした。Y<sub>f</sub>軸は、USとRSの midpointからECへ向かう単位ベクトルとし、近位方向を向く。X<sub>f</sub>軸は、Y<sub>f</sub>とUSからRSへ向かう単位ベクトルの外積とし、前方を向く。Z<sub>f</sub>軸は、X<sub>f</sub>とY<sub>f</sub>の外積とした。

手座標系 ( $\Sigma_h \equiv O_h - X_h Y_h Z_h$ ) の原点O<sub>h</sub>は、USとRSの center点から推定される手関節中心(WC)とした。Y<sub>h</sub>軸は、MC3からWCへ向かう単位ベクトルとし、近位方向を向く。X<sub>h</sub>軸は、Y<sub>h</sub>とZ<sub>f</sub>軸の外積とし、掌側を向く。Z<sub>h</sub>軸は、X<sub>h</sub>とY<sub>h</sub>の外積とした。

た(Barrentine et al, 1998)。

#### 4. 運動学パラメータの算出

胸部、骨盤、肩関節、肘関節、手関節の角度変化は、座標変換とオイラー角を用いて算出した(Wu et al, 2005)。遠位の座標系の回転は、近位の座標系に関して記述した。胸部座標系Σ<sub>T</sub>は骨盤座標系Σ<sub>p</sub>を基準とした運動、骨盤座標系Σ<sub>p</sub>は、グローバル座標系Σ<sub>G</sub>を基準とした運動としてZ-X'-Y'の順で計算されるオイラー角を用いて評価した。Z<sub>T</sub>軸とZ<sub>p</sub>軸周りの回転は、屈曲(-) / 伸展(+)を表す。X<sub>T</sub>軸とX<sub>p</sub>軸周りの回転は、右側屈(+) / 左側屈(-)を表す。Y<sub>T</sub>軸とY<sub>p</sub>軸周りの回転は、左回旋(+) / 右回旋(-)を表す。

上腕座標系Σ<sub>u</sub>の運動は、胸部座標系Σ<sub>T</sub>に関するY-X'-Y'の順で計算されるオイラー角を用いて評価した。Y<sub>u</sub>軸は、挙上平面を決定し、水平内転(+) / 水平外転(-)を表す。X'<sub>u</sub>軸の回転は、挙上角度を表し、内転(+) / 外転(-)に相当する。Y''<sub>u</sub>軸は、内旋(+) / 外旋(-)を表す。

前腕座標系Σ<sub>f</sub>の運動は、上腕座標系Σ<sub>u</sub>に関するZ-X'-Y'の順で計算されるオイラー角で評価した。Z<sub>f</sub>軸は、屈曲(+) / 伸展(-)を表す。Y<sub>f</sub>軸の回転は、前腕の骨軸周りの回転である回内(+) / 回外(-)を表す。X<sub>f</sub>軸は、carrying angle(Chao and Morrey, 1978, Wu, et al., 2005)であるため、評価には用いなかった。

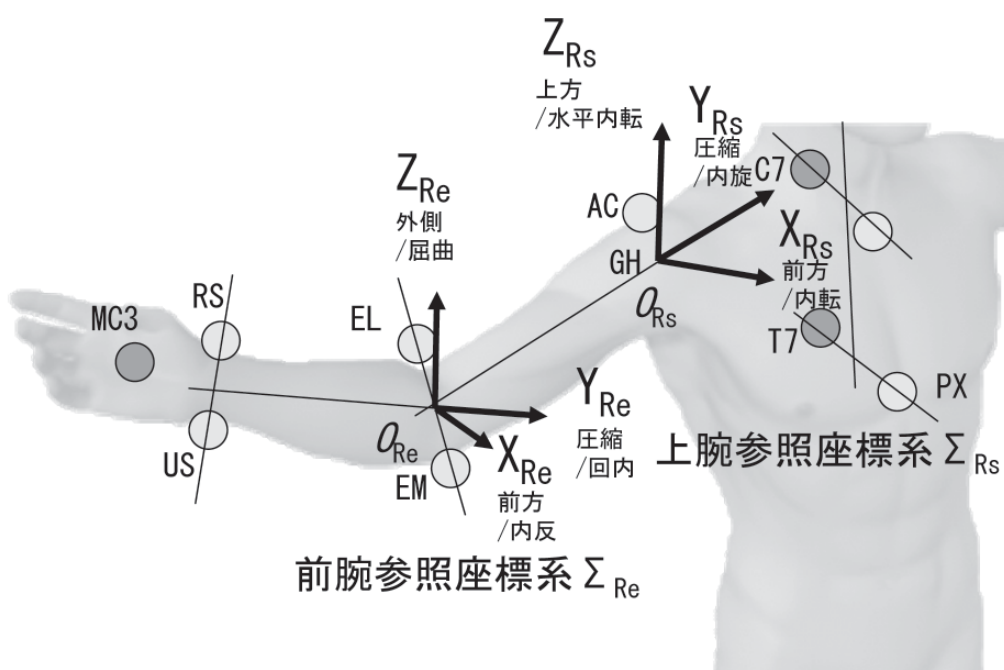


図3 参照座標系の設定



手関節座標系 $\Sigma_H$ の運動は、前腕座標系 $\Sigma_F$ に関するZ-X'-Y''の順で計算されるオイラー角を用いて評価した。Z<sub>H</sub>軸は、屈曲(+)/伸展(-)を表す。X<sub>H</sub>軸は、橈屈(-)/尺屈(+)を表す。Y<sub>H</sub>軸周りの回転は、解析モデルの制約から計算できず、この軸周りの回転は常にゼロとなる。

### 5. 動力学パラメータの算出

関節 $J_i$ に加わる関節間力 $F_i$ とモーメント $M_i$ は、遠位の体節 $S_i$ からニュートン・オイラー法(Feltner et al., 1986; Feltner et al., 1989; Fleisig et al., 1995; Fleisig et al., 1996; Fleisig et al., 1999; Stodden et al., 2005, Werner et al., 1993; Werner et al., 2001)を用いて、逆動力学解析により算出した。

$$F_i = m_i a_i - m_i g - F_{i-1} \quad (1)$$

$$M_i = (I_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times I_i \omega_i) - r_i \times F_i - r_{i-1} \times F_{i-1} - M_{i-1} \quad (2)$$

ここで、 $m_i$ は、体節 $S_i$ の質量、 $g$ は重力加速度、 $a_i$ は体節 $S_i$ の重心位置の加速度、 $F_{i-1}$ と $M_{i-1}$ は、体節 $S_i$ の遠位関節 $J_{i-1}$ に加わる力とモーメントを表す。 $I_i$ は、体節 $S_i$ の慣性モーメントを表す。 $\omega_i$ と $\dot{\omega}_i$ は、体節の重心を中心とした角速度と角加速を表す。 $r_i$ は、重心位置から力 $F_i$ のモーメントアームを示す。手関節、肘関節、肩関節の順で力とモーメントを算出した。手関節では、 $F_{i-1}$ と $M_{i-1}$ をゼロとした。また、ボールの質量 $m_i$ は0.145 [kg]とした。上腕、前腕、手部の重心位置、質量、慣性モーメントは、日本人アスリートの身体計測データから算出した(Ae, et al., 1992)。

上記の力とモーメントはグローバル座標系に関する値である。最終的に、肩と肘の動力学パラメータは、それぞれの参照座標系に座標変換してから評価した(図3)。

肩関節の参照座標系( $\Sigma_{Rs} \equiv O_{Rs} - X_{Rs} Y_{Rs} Z_{Rs}$ )の原点 $O_{Rs}$ は、GHとした。Y<sub>Rs</sub>軸は、ECからGHへの単位ベクトルとした。X<sub>Rs</sub>軸は、胸部座標系のY<sub>T</sub>軸とY<sub>Rs</sub>軸の外積とした。Z<sub>Rs</sub>軸は、X<sub>Rs</sub>とY<sub>Rs</sub>の外積とし

た。肩関節に加わる関節力は、3つの成分に分解される：前方(+X<sub>Rs</sub>)/後方(-X<sub>Rs</sub>)、上方(+Z<sub>Rs</sub>)/下方(-Z<sub>Rs</sub>)、伸張(-Y<sub>Rs</sub>)/圧縮(+Y<sub>Rs</sub>)。肩関節の関節モーメントは、外転(-X<sub>Rs</sub>)/内転(+X<sub>Rs</sub>)、水平外転(-Z<sub>Rs</sub>)/水平内転(+Z<sub>Rs</sub>)、内旋(-Y<sub>Rs</sub>)/外旋(+Y<sub>Rs</sub>)となる。

肘関節の参照座標系( $\Sigma_{Re} \equiv O_{Re} - X_{Re} Y_{Re} Z_{Re}$ )の原点 $O_{Re}$ は、ECとした。Y<sub>Re</sub>軸は、WCからECへの単位ベクトルとした。X<sub>Re</sub>軸は、Y<sub>Re</sub>とEMからELへ向かう単位ベクトルの外積とした。Z<sub>Re</sub>軸は、X<sub>Re</sub>とY<sub>Re</sub>の外積とした。肘に加わる力は、前方(+X<sub>Re</sub>)/後方(-X<sub>Re</sub>)、内側(-Z<sub>Re</sub>)/外側(+Z<sub>Re</sub>)、伸張(-Y<sub>Re</sub>)/圧縮(+Y<sub>Re</sub>)となる。肘関節の関節モーメントは、屈曲(+Z<sub>Re</sub>)/伸展(-Z<sub>Re</sub>)、外反(-X<sub>Re</sub>)/内反(+X<sub>Re</sub>)、回外(-Y<sub>Re</sub>)/回内(+Y<sub>Re</sub>)となる。

ただし、推定される動力学パラメータは、筋、骨、その他の組織によって体節に加わる内部の力とモーメント全てを合計した値となる。

### 6. 投球フォームの相分類と統計解析

投球動作は、アームコッキング相、加速相、減速相に分けて評価した(図4)。(Dillman et al., 1993; Fleisig et al., 1995, Barrentine et al., 1998)。アームコッキング相は、踏込足が地面に接した時点(FC)から、肩関節が最大外旋位(MER)に達した時点までとした。加速相は、MERから始まり、ボールリリースの時点(BR)までとした。減速相は、BRから始まり、肩関節が最大内旋位(MIR)に達した時点までとした。FCの時点は、ハイスピードカメラの動画像から判断した。

動力学、運動学パラメータに関して、ストレートとカーブ間の平均値の差は、対応のあるT検定で検定した。有意水準は5%とした。

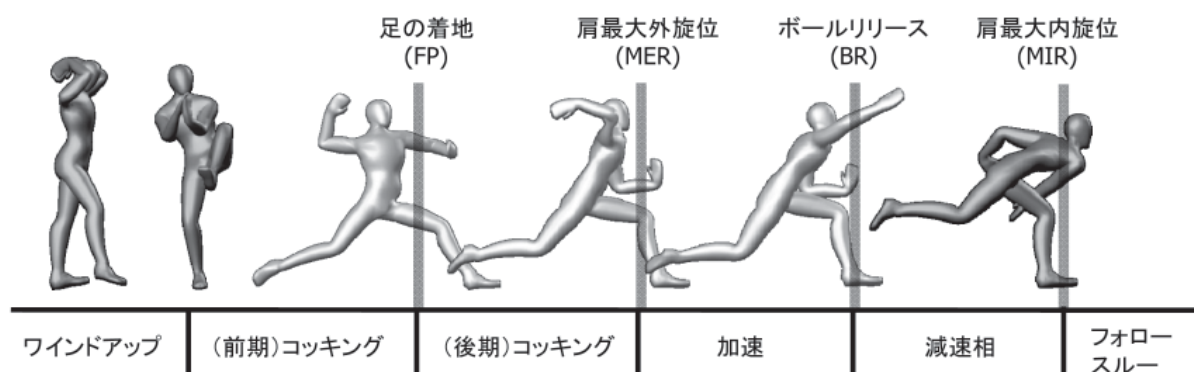


図4 相分類

### Ⅲ. 結果

#### 1. 運動学パラメータ

カーブとストレートの投球姿勢を表1に示す。まず、手関節と前腕の姿勢について述べる。踏込足接地 (FC)、最大外旋位 (ME)、ボールリリース (BR)、最大内旋位 (MIR) のいずれの時点においても、前腕の回外角度は、カーブ投球時に有意に大きい値を示した。MER、BR、MIRの時点において、手関節の伸展角度は、ストレート投球時に有意に大きい値を示した。また、BR時には、カーブ投球時に手関節の尺屈角度が有意に大きい値を示した。

次に肘関節と肩関節について述べる。FC、BR、MIRの時点において、肘関節の伸展角度は、カーブ投球時に有意に大きい値を示したが、その差は非常に小さかった。肩関節は、BRの時点において、水平内転角度がカーブ投球時に有意に大きい値を示したが、その差も非常に小さかった。それ以外のおもな運動学パラメータには、有意差が認められなかった。ボール速度に関して、ストレートはカーブよりも有意に球速が速かった。

#### 2. 動力学パラメータ

アームコッキング相、加速相、減速相における各パラメータのピーク値 (極大値、極小値) を表2に示す。

表1 運動学パラメータ

	ストレート	カーブ	
ボール速度(m/s)	33.1±1.73	27.4±2.08	*
<u>踏込足接地(FC)</u>			
手関節 伸展角度(deg.)	31.8±14.86	25.2±16.73	
手関節 尺屈角度(deg.)	0.5±10.36	-3.1±6.05	
前腕 回外角度(deg.)	-3.0±22.82	13.3±23.92	**
肘関節 伸展角度(deg.)	115.7±9.56	117.4±10.50	*
肩関節 水平内転角度(deg.)	-26.8±13.43	-25.7±13.87	
<u>肩関節最大外旋位(MER)</u>			
手関節 伸展角度(deg.)	47.9±10.78	35.1±15.11	**
手関節 尺屈角度(deg.)	0.3±7.23	-3.2±7.53	
前腕 回外角度(deg.)	-10.7±8.00	12.1±18.35	**
肘関節 伸展角度(deg.)	94.0±9.25	95.1±9.31	
肩関節 水平内転角度(deg.)	13.6±10.02	15.5±9.44	
<u>アームコッキング相</u>			
肘関節 最大屈曲角度(deg.)	124.2±7.92	125.5±7.61	
肩関節 最大外旋角度(deg.)	161.9±11.96	161.1±12.73	
胸部 最大回旋角速度(deg./s)	582.5±110.93	567.8±137.09	
骨盤 最大回旋角速度(deg./s)	637.0±117.62	624.6±104.30	
<u>加速相</u>			
肘関節 最大伸展角速度(deg./s)	2762.4±337.8	2717.31±326.5	
肘関節 平均外転角度(deg.)	98.1±7.86	98.3±7.72	
<u>ボールリリース(BR)</u>			
手関節 伸展角度(deg.)	21.7±6.53	14.9±8.36	**
手関節 尺屈角度(deg.)	7.6±4.08	12.3±6.17	**
前腕 回外角度(deg.)	-7.3±11.16	10.6±19.31	**
肘関節 伸展角度(deg.)	26.5±7.81	28.3±7.77	*
肩関節 水平内転角度(deg.)	5.2±10.44	7.9±10.43	**
体幹 側方傾斜角度(deg.)	-37.1±11.09	-36.3±10.85	
<u>肩関節最大内旋位(MIR)</u>			
手関節 伸展角度(deg.)	22.1±14.18	12.9±15.40	**
手関節 尺屈角度(deg.)	6.2±6.43	3.7±7.68	
前腕 回外角度(deg.)	-33.4±17.13	-16.4±24.08	**
肘関節 伸展角度(deg.)	42.5±7.83	46.4±9.38	**
肩関節 水平内転角度(deg.)	17.1±12.75	19.3±12.29	

表2 動力学パラメータのピーク値

		ストレート	カーブ	
アームコッキング相				
肘関節	関節間力の内側成分(N)	226.8±47.03	225.2±48.15	
	内反モーメント(Nm)	60.2±10.15	59.0±10.22	
肩関節	関節間力の前方成分(N)	332.3±48.72	314.9±45.06	
	関節間力の圧縮力成分(N)	454.1±104.03	418.3±111.06	**
	水平内転モーメント(Nm)	76.5±13.19	77.0±13.92	
	内旋モーメント(Nm)	59.7±9.42	56.5±8.67	*
加速相				
肘関節	関節間力の前方成分(N)	232.7±51.87	267.3±65.03	**
	屈曲モーメント(Nm)	49.9±7.74	43.8±9.99	**
減速相				
肘関節	関節間力の圧縮力成分(N)	758.6±107.26	738.6±112.44	
	関節間力の前方成分(N)	292.9±42.91	293.9±49.87	
	関節間力の内側成分(N)	159.3±44.06	181.8±41.73	*
肩関節	関節間力の圧縮力成分(N)	758.0±134.49	739.7±138.15	
	関節間力の後方成分(N)	292.8±116.06	287.7±126.22	
	関節間力の下方成分(N)	415.6±112.51	434.7±114.14	
	内転モーメント(Nm)	115.0±30.25	125.1±30.52	
	水平外転モーメント(Nm)	80.5±35.53	87.0±40.62	

アームコッキング相について述べる。カーブ投球時において、肩関節の圧縮力成分のピーク値は、ストレートより有意に小さかった(表2)。また、カーブ投球時において、肩の内旋モーメントは、ストレートよりも有意に小さかった。

加速相について述べる。カーブ投球時における肘関節間力の前方成分のピーク値は、ストレートよりも有意に大きかった。また、肘関節の屈曲モーメントは、カーブはストレートよりも有意に小さかった。

減速相について述べる。カーブ投球時における肘関節間力の内側成分は、ストレートよりも有意に大きかった。

すべての相に関して、肩関節と肘関節の運動学パラメータには、上記以外に有意差が認められなかった。

#### IV. 考察

投手は、野球の試合において、打者の予測を妨げるために、変化球を投げる。それを成功させるためには、ストレートやカーブといった異なる球種において、打者から見た投球動作の外見上の違いを軽減する必要がある。測定結果から得られた投球動作には、ストレートとカーブにおいて手首と前腕の運動に顕著な違いが見られた。カーブ投球時には、FCからMIRにかけて前腕がより回外し、ストレート投球時にはMERからMIRにかけて手関節がより伸展していた。この結果は、Barrentine et al. (1998) と Sakurai et al. (1993)

の報告と同様の傾向を示している。これらに加えて本結果から、BRにおいて、カーブ投球時の手関節は、ストレート投球時よりも尺屈位にあることが認められた。カーブ投球時の手関節の尺屈は、加速相(MER-BR)で大きくなり、減速相(BR-MIR)にて小さくなっていた(表1)。

次に、肘関節、肩関節、胸部の姿勢について述べる。肩関節には、BR時点の水平内転角度にのみストレートとカーブ間に有意差が認められた。さらに有意差は認められるが、その差は非常に小さい(表1)。それ以外の運動学パラメータ(関節角度)には、FC、MER、BR、MIRの時点において有意差が認められなかった。

肘関節に関しては、FC、BR、MIRの時点にて、ストレートよりカーブ投球時の伸展角度が有意に大きかった。しかし、その差も非常に小さい値であった(表1)。それ以外の運動学パラメータには、FC、MER、BR、MIRの時点において有意差が認められなかった。体幹に関しては、BRにおける側方傾斜角度に有意差が認められなかった。さらに、アームコッキング相における肘関節の最大屈曲角度と肩関節の最大外旋角度、地面に対する骨盤の最大回旋角速度、骨盤に対する胸部の最大回旋角速度、加速相における肘関節の最大伸展角速度、肩関節の平均外転角度にも、ストレートとカーブの間に有意差は認められなかった。

House (1994) は、カーブの投球は足の接地時(FC)前に手関節と前腕の姿勢を決定しその後ストレートと

同様の投球メカニズムになると述べている。本論文では、肩関節と肘関節の運動学パラメータについて有意差が認められた。しかし、肩と肘に認められた運動学パラメータの差は、非常に小さい値であった。したがって本研究で対象とした投手は、カーブの投球において、House (1994) が述べるように手関節と前腕の姿勢を決定し、肩関節と肘関節の動作がストレートとほぼ等しかったといえる。外見上ほぼ同じ投球姿勢にて、ストレートの球速は  $33.1 \pm 1.73$  [m/s]、カーブの球速は  $27.4 \pm 2.08$  [m/s] と、ストレートはカーブより有意に球速が速かった。

ストレート投球時とカーブ投球時の肩関節と肘関節に加わる関節間力と関節モーメントについて述べる。アームコッキング相において、肩関節には、関節間力の圧縮力成分と内旋モーメントに有意差が見られた(表2)。アームコッキング相における肩関節への負担は、カーブよりストレートの方が大きいといえる。肘関節に関しては、肘関節障害の原因となる肘内反モーメント (Atwater (1979), Fleisig, et al. (1995), Sabick, et al. (2004)) には有意差が認められなかった。そのため、ストレートとカーブにおいて、肘関節には同程度の内反モーメントによる負担が加わっていると考えられる。

次に加速相において、肘関節には、関節間力の前方成分と屈曲モーメントに有意差が見られた。肘関節の前方成分はカーブがストレートより大きく、加速相において肘関節への剪断力となる負担は、ストレートよりカーブの方が大きいといえる。屈曲モーメントに関しては、カーブよりストレートの方が大きかった。Stodden, et al. (2005) は、球速と投球動作の関係を調査し、関節の屈曲モーメントと肩関節の圧縮力は球速の増加とともに増加することを示した。本研究の結果も球速の速いストレートに関して肘関節の屈曲モーメントが大きくなっていった。減速相における肩関節の圧縮力も、有意差は認められないものの、球速の速いストレートの方が大きい傾向を示した。したがってカーブは、球速が遅いものの、ストレート投球時と同程度の圧縮力による負担を肩関節に与えていると考えられる。さらに、肘関節の内側成分に関して、カーブはストレートよりも大きい値を示した。このことから、減速相における肘関節への剪断力となる負担は、ストレートよりカーブの方が大きいといえる。アームコッキング相、加速相、減速相において、多くの動力学パラメータには有意差が認められず、ストレートとカーブの投球には同程度の負荷が加わっていると考えられる。以上から、肩関節に関してカーブ投球時の負担は、ストレート投球時より少ないか、ほぼ同等と考えられる。肘関節に関して、剪断力となる負担はカーブ投球

時の方がストレート投球時より大きい、内反モーメントによる負担はカーブとストレートで同等と考えられる。

運動学解析結果からは、カーブの投球による肩関節への障害発生のリスクは、ストレートの投球より少ないかほぼ同程度のポテンシャルを持つと考えられる。肘関節に関して、カーブ投球によるリスクは、ストレートより大きいかほぼ同等と考えられる。

しかし、カーブ投球時には、前腕の姿勢が異なるため、腱、靭帯、その他の状態がストレート投球時と異なっている。とくに、肘関節の内反モーメントは、内側側副靭帯の緊張と腕橈関節の圧縮に関わる。本論文の逆動力学解析による内反モーメントの推定は、靭帯や関節形状をモデルに含まない。したがって、前腕の回内/回外姿勢が変化したことによる内側側副靭帯の緊張と腕橈関節の圧縮の変化は、推定することができない。今後は、より詳細な解析モデルを開発する必要がある。

## V. 結語

ストレートとカーブの投球動作を運動学・動力学解析した。その結果、投球姿勢に関して、カーブとストレートには、手関節の屈曲・尺屈と前腕の回外の姿勢に差が認められた。それ以外の運動学パラメータには、ストレートとカーブ間の差に有意差が認められるものもあるが、その差が非常に小さく、顕著な違いは認められなかった。そのため、カーブ投球時には、ストレート投球時とほぼ同等の投球姿勢を取っているといえる。動力学解析から、肩関節に関してカーブはストレートより負担が少ないか負担がほぼ等しい、肘関節に関してカーブはストレートより負担が大きいか負担がほぼ等しいことが明らかとなった。

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、信原病院 信原克哉院長、信原病院バイオメカニクス研究所 中村真里氏には、多大なご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- Ae, M., Tang, H., & Yokoi, T. (1992). Estimation of inertia properties of the body segments in Japanese athlete, In *Biomechanism 11* Edited by The Society of Biomechanism, 23-33 Tokyo Japan: Tokyo university press.
- Atwater, A.E. (1979). Biomechanics of overarm throwing movements and of throwing injuries, *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 7, 43-85.



- Barrentine, S.W., Matsuo, T., Escamilla, R.F., Fleisig, G.S., & Andrews, J.R. (1998). Kinematic analysis of the wrist and forearm during baseball pitching, *Journal of Applied Biomechanics*, 14, 24-39.
- Chao, E.Y., & Morry, B.F. (1978). Three-dimensional rotation of the elbow, *Journal of Biomechanics*, 11, 57-73.
- Dillman, D.J., Fleisig, G.S. & Andrews, J.R. (1993). Biomechanics of pitching with emphasis upon shoulder kinematic, *Journal of Othopaedic and Sports Physical Therapy*, 18(2), 402-408.
- Elliott, B., Grove, J.R., Gibson, B., & Thurston, B. (1986). A three-dimensional cinematographic analysis of the fastball and curveball pitches in baseball, *International Journal of Sports Biomechanics*, 2, 20-28.
- Escamilla, R.F., Fleisig, G.S., Barrentine, S.W., Zheng, N. & Andrews, J.R. (1998). Kinematic comparisons of throwing different types of baseball pitches, *Journal of Applied Biomechanics*, 14, 1-23.
- Feltner, M.E., & Dapena, J. (1986). Dynamics of the shoulder and elbow joints of the throwing arm during a baseball pitch, *International Journal of Sport Biomechanics*, 2, 235-259.
- Feltner, M.E., & Dapena, J. (1989). Three-dimensional interactions in a two-segment kinetic chain: Part I. General model, *International Journal of Sport Biomechanics*, 5(4), 403-419.
- Feltner, M.E. (1989). Three-dimensional interactions in a two-segment kinetic chain: Part II. Application to the throwing arm in baseball pitching, *International Journal of Sport Biomechanics*, 5(4), 420-450.
- Fleisig, G.S., Andrews, J.R., Dillman, C.J., & Escamilla, R.F. (1995). Kinetics of baseball pitching with implications about injury mechanisms, *American Journal of Sports Medicine*, 23(2), 233-239.
- Fleisig, G.S., Escamilla, R., Andrews, J.R. Matsuo, T., Satterwhite, Y., & Barrentine, S.W. (1996). Kinematic and kinetic comparison between baseball pitching and football passing, *Journal of Applied Biomechanics*, 12(2), 207-224.
- Fleisig, G.S., Barrentine, S.W., Zheng, N., Escamilla, R.F., & Andrews, J.R. (1999). Kinematic and kinetic comparison of baseball pitching among various levels of development, *Journal of Biomechanics*, 32, 1371-1375, (1999).
- Meister, K., (2000). Injuries to the shoulder in the throwing athlete, *The American Journal of Sports Medicine*, 28(2), 265-275.
- Sabick M.B., Torry, M.R., Lawton, R.L., & Hawkins, R.J. (2004). Valgus torque in youth baseball pitchers: A biomechanical study, *Journal of Shoulder Elbow Surgery*, 13(3), 349-355.
- Sakurai, S., Ikegami, Y., Okamoto, A., Yabe, K., & Toyoshima, S. (1993). A three-dimensional cinematographic analysis of upper limb movement during fastball and curveball pitches, *Journal of Applied Biomechanics*, 9, 47-65.
- Stodden, D.F., Fleisig, G.S., McLean, S.P. & Andrews, J.R. (2005). Relationship of biomechanical factors to baseball pitching velocity: within pitcher variation, *Journal of Applied Biomechanics*, 21(1), 44-56.
- House, T. (2000). *The pitching edge* Second Edition, Champaign, IL: Human Kinetics.
- Werner, S.L., Gill, T.J., Murray, T.A., Cook, T.D., & Hawkins, R.J. (2001). Relationship between throwing mechanics and shoulder distraction on professional baseball pitchers, *American Journal of Sports Medicine*, 29(3), 354-358.
- Werner, S.L., Fleisig, G.S., Dillman, C.J., & Andrews, J.R. (1993). Biomechanics of the elbow during baseball pitching, *Journal of Othopaedic and Sports Physical Therapy*, 17(6), 274-278.
- Woltring, H.J. (1986). A fortran package for generalized, cross-validatory spline smoothing and differentiation, *Advances in engineering software*, 8(2), 104-113.
- Wu, G., van der Helm, F.C.T., Veeger, H.E.J., Makhsous, M., Van Roy, P., Anglin, C., Nagels, J., Karduna, A.R., McQuade, K., Wang, X., Werner, F.W., & Buchholz, B. (2005). 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, *Journal of Biomechanics*, 38, 981-992.