

2013年度 修士論文

投球動作における Late Cocking 期の腕のしなりの  
構成因子

Contributing factors for the forearms lagging behind  
in the late cocking phase of baseball pitching

早稲田大学 大学院スポーツ科学研究科

スポーツ科学専攻 身体運動科学研究領域

5012A039-7

田村 暁大

Akihiro TAMURA

研究指導教員： 矢内 利政 教授

## <目次>

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 第1章 緒言                | p.1  |
| 1-1. 序                |      |
| 1-2. 本研究の目的           |      |
| 第2章 方法                | p.7  |
| 2-1. 対象               |      |
| 2-2. 実験設定             |      |
| 2-3. データ収集            |      |
| 2-3-1. 投球動作測定         |      |
| 2-3-2. 各セグメントの傾きの算出方法 |      |
| 2-3-3. 3次元的な肩甲骨上腕関節角度 |      |
| 第3章 結果                | p.23 |
| 3-1. 鉛直軸に対する各セグメントの傾き |      |
| 3-2. 3次元的な肩甲骨上腕関節角度   |      |
| 第4章 考察                | p.26 |
| 第5章 まとめ               | p.45 |
| 参考文献                  | p.47 |
| 謝辞                    | p.51 |

## 第1章

### 緒言

#### 1-1. 序

投球動作における Late Cocking 期には、投手は上肢を後方へ大きくしならせることにより、肩甲上腕関節外旋を増大させている印象を受ける。この Late Cocking 期の「腕のしなり」は、投手を側方から観察した際に、前腕の後方への傾きとして視覚的に捉えることが可能である(図 1)。この前腕の後方への傾きは、多くの投手において前腕長軸が水平面に対して平行に近づくほど大きな角度として観察される。

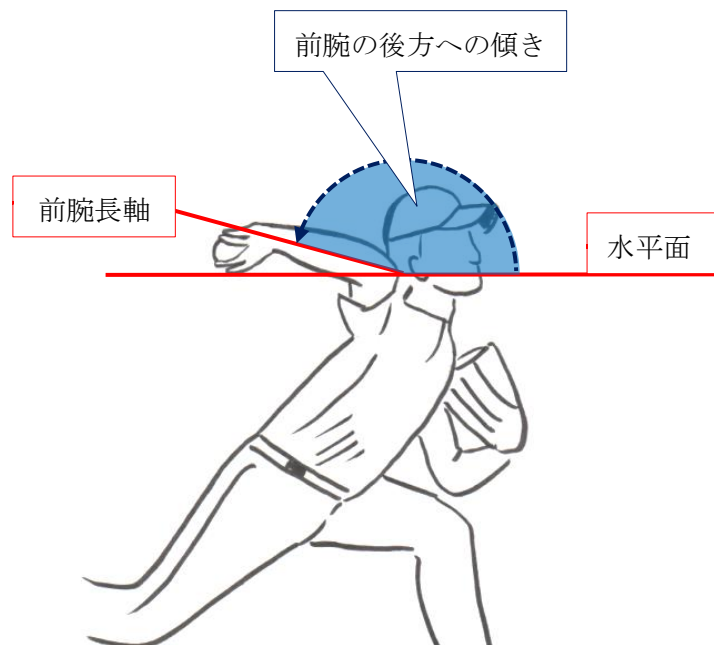


図 1. 投手を側方から観察した際にみられる前腕の後方への傾き

Late Cocking 期にみられる前腕の後方への傾きは、肩甲上腕関節の外旋方向への運動を含むものとして捉えることができる。これは、肘関節が  $90^\circ$  屈曲位にある上肢を  $90^\circ$  外転させた際にみられる前腕セグメントの矢状面での運動は、上腕骨長軸回りの運動(上腕骨回旋運動)を反映するためである。そのため、投球指導やリハビリテーションの場で視覚的に行われる評価において、前腕の後方への傾きは、極度な肩甲上腕関節外旋を意味するように捉えられることが多い。

Late Cocking 期の上肢の肢位と近似する肩関節  $90^\circ$ 側方拳上位にて測定された他動的な肩関節外旋可動域は約  $128\sim135^\circ$  <sup>(1)(2)(3)</sup>、他動的な肩甲上腕関節外旋可動域は約  $100\sim110^\circ$  <sup>(4)(5)(6)</sup>であることが報告されている。Late Cocking 期の前腕の後方への傾きが水平面に対して平行に近づくほど大きく、約  $180^\circ$ にも達する角度として観察されることを考慮すると、実際の投球動作では、明らかに他動的な肩甲上腕関節外旋可動域を超過する外旋角度に到達している印象を受ける。そのため、Late Cocking 期の前腕の後方への傾きが肩甲上腕関節外旋のみに起因していることは考えにくく、どのようにして前腕を後方へ大きく傾けることができるのかという疑問が生じる。

投球動作における Late Cocking 期には、肩複合体の協調運動により上腕が大きく外旋することが知られている<sup>(7)(8)(9)</sup>。肩複合体は、上腕骨、肩甲骨、鎖骨、胸骨とそれらを連結する肩甲上腕関節、肩鎖関節、胸鎖関節の 3 つの解剖学的

な関節から成る。上腕骨の外旋は、これらの関節が協調することによって生じる胸郭に対する上腕骨の位置の変化として捉えることができる。Miyashita ら(2008)は、胸郭に定義した平面と、肩関節、肘関節、手関節の 3 点を含む平面とのなす角度を肩関節外旋角度と定義した上で、Late Cocking 期の 3 次元的な肩関節外旋角度を算出した。その結果、Late Cocking 期の肩関節外旋角度は約  $167^{\circ}$ であったことを報告した<sup>(10)</sup>。多くの研究においても、Late Cocking 期の 3 次元的な肩関節外旋角度は測定されており、その大きさは約  $160\sim 175^{\circ}$ に到達することが報告されている<sup>(11)(12)</sup>。また、Late Cocking 期には、肩複合体の協調運動により胸郭に対して上腕が大きく外旋する<sup>(7)(8)(9)</sup>。上腕を側方に約  $90^{\circ}$  拳上させた肢位における肩関節外旋は、肩甲骨を介することで可能となり、胸郭に対する肩甲骨の後傾、肩甲骨に対する上腕骨の外旋が協調することにより構成されている。Miyashita ら(2010)、矢内(2007)は、投球動作における Late Cocking 期の肩関節外旋は、肩甲上腕関節外旋のみに起因するものではなく、肩甲骨後傾が複合的に運動することにより構成されていることを報告した<sup>(13)(14)</sup>。そのため、Late Cocking 期の肩関節の動きを詳細に分析する際には、肩甲上腕関節外旋と肩甲骨後傾を分離して考える必要がある。

他動的に肩甲上腕関節外旋角度を増大させることは、肩甲骨関節窩に対する上腕骨頭の前方突出を誘発し、肩関節前下方関節包を弛緩させる要因となるこ

とが報告されている<sup>(1)(15)</sup>。三森ら(1996)は、屍体肩を用いて他動的に肩甲上腕関節外旋を強制した際に肩関節前方関節包に生じる張力を測定した。その結果、肩甲上腕関節側方拳上位において肩甲上腕関節を徒手的に外旋させると、肩関節前下方関節包が伸長されることを明らかにした<sup>(16)</sup>。肩関節前下方関節包は、肩甲骨前縁から上腕骨解剖頸下縁へ付着することにより、肩甲骨に対する上腕骨の外旋を制御し、上腕骨頭の前方突出や肩関節前方不安定性を防ぐ役割を担っている。そのため、一般的に肩関節前下方関節包の弛緩は、肩甲上腕関節における前方不安定性を生じさせる要因になると考えられている。更に、肩関節前方関節包の弛緩に伴う肩甲上腕関節における前方不安定性は、インターナルインピンジメント、肩関節回旋筋腱板損傷などの 2 次的な肩関節障害の原因となりうることが知られている<sup>(1)(15)(17)</sup>。これらのことから、Late Cocking 期に到達する大きな肩甲上腕関節外旋角度は、肩関節前下方関節包を弛緩させ、肩関節前方不安定性に伴う慢性的な肩関節障害を発症させるリスク因子と考えられている。しかし、過度の肩甲上腕関節外旋が肩関節前下方関節包を弛緩させるリスク因子と考えられているにも拘らず、多くの投手は肩関節前下方関節包の弛緩に伴う肩関節障害を発症させることなく投球動作を行うことを可能としている。投球動作における肩関節障害の発症率に関して、信原ら(2000)は、野球において肩関節障害を発症した症例の中で、Late Cocking 期に疼痛を発症してい

る症例は 26.7%にすぎないと述べている<sup>(18)</sup>。これらより、Late Cocking 期に、肩関節前下方関節包を弛緩させるほどの大きな肩甲上腕関節外旋角度に到達していることは考えにくい。

Late Cocking 期に、どのようにして前腕を後方へ大きく傾けることができるのかを明らかにするためには、骨盤、胸郭、肩甲骨、前腕の矢状面における連動運動に着目し、前腕の後方への傾きとして観察される「腕のしなり」の構成因子を明らかにする必要がある。前腕の後方への傾きは、肩甲上腕関節の外旋、肩甲骨の後傾だけではなく、骨盤、胸郭セグメントに前後方向の傾きを持たせることにより増大することができる。このことから、前腕の後方への傾きは、骨盤、胸郭、肩甲骨、前腕の傾きの和として生成されていると考えられる。しかし、投手を側方から観察した際に視覚的に観察される前腕の後方への傾きを構成する各セグメントの貢献は明らかではない。Miyashita ら(2010)は、Late Cocking 期の胸郭に対する肩甲骨の傾き、肩甲骨に対する前腕の傾きを測定し、肩関節外旋角度は胸郭に対する肩甲骨の後傾、および肩甲上腕関節外旋の複合運動により構成されていることを報告した<sup>(13)</sup>。矢内(2011)は、Late Cocking 期には、上腕骨の動きに協調して肩甲骨が向きを変えること、および胸郭が骨盤に対して向きを変えることにより、過度の肩関節外旋を防いでいることを報告した<sup>(9)</sup>。しかし、これらの報告は、肩関節外旋角度を構成する要因を肩甲骨、体

幹部を含めて分析したものであり、「腕のしなり」の構成因子の全てを明らかにしたものではなかった。そこで、Late Cocking 期の骨盤，胸郭，肩甲骨，前腕セグメントの矢状面上の運動を分析し，前腕の後方への傾きに貢献する要因を明確にすることで，どのようにして大きな前腕の傾きに到達し得るのかを明らかにすることができると考えられる。

## 1-2. 本研究の目的

本研究では，投球動作における Late Cocking 期に，大きな前腕の後方への傾きに到達し得る要因を検討し，「腕のしなり」の構成因子を明らかにすることを目的とした。これにより，Late Cocking 期に投手はどのようにして大きな前腕の傾きに到達させることができるのかを明確にすることができると考えられる。



## 第 2 章

### 方法

#### 2-1. 対象

対象は現役大学野球投手 19 名(年齢  $19.6 \pm 1.3$  歳, 身長  $176.4 \pm 5.0$ cm, 身体質量  $78.4 \pm 6.1$ kg)とした. 全ての対象者に実験の内容を説明し, 実験参加の同意を得た. 対象者には, 測定時に肩関節に疼痛が生じていないことを確認して行った.

#### 2-2. 実験設定

骨盤, 胸郭, 肩甲骨, 上腕骨, 前腕の 3 次元的な方位を, コントロールユニット, 磁場を発生させるためのトランスミッタ, 位置と方位を測定するためのセンサ, デジタイズを行うためのスタイラスにより構成されている電磁ゴニオメータ(LIBERTY, POLHEMUS 社製)を用いて測定した(図 2). サンプルング周波数は 240Hz とした.

センサは, 各被験者の仙骨平坦部, 胸骨柄, 肩甲骨肩峰, 上腕骨遠位部, 前腕遠位部の皮膚上に貼付した(図 3). 上腕骨遠位部への貼付は, センサが固定されたプラスチック製のカフを上腕骨遠位部に装着することにより行った. また,

皮膚の動きによるセンサの位置の変化を最小限とするために、各部位のセンサをテーピングテープ(ニトリート, OMNIDYNAMIC, 日東メディカル社製)を用いて固定した。

投球動作を行う際、身体と測定機器の接触が無いように、マウンド上の被験者の非投球腕側にコントロールユニット、非投球腕側の前側方にトランスミッタおよびパーソナルコンピュータを設置した。トランスミッタは、地面に対して平行となるように設置した。また、有線であるセンサが、投球動作中に身体へ接触し、試技の妨げにならないことを確認したうえで、投球動作を実施した。

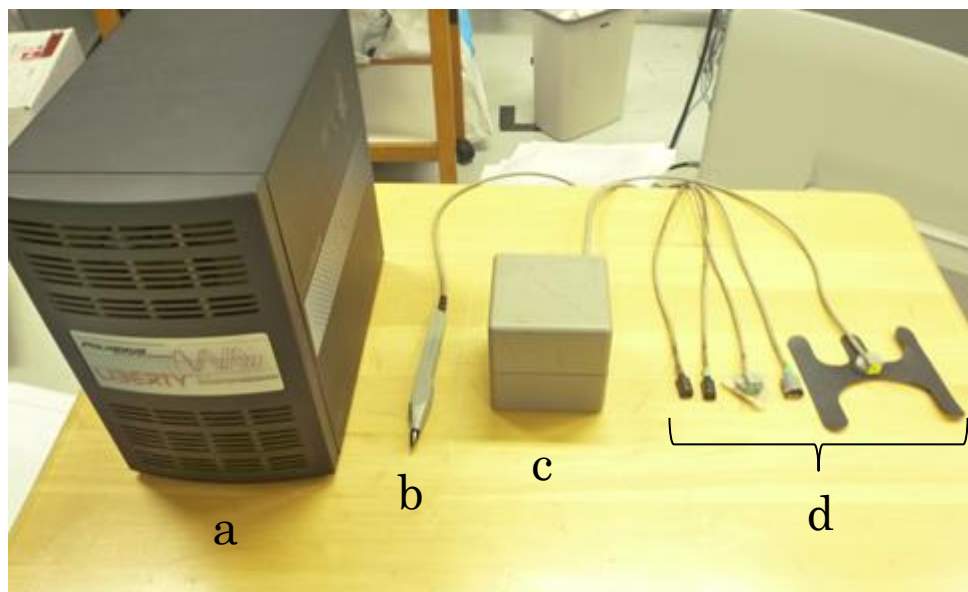
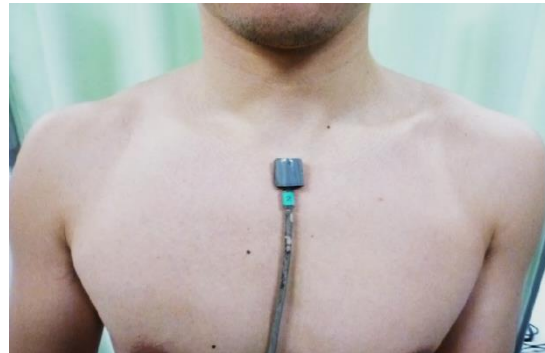


図 2. 電磁ゴニオメータ

a. コントロールユニット b. スタイルラス c. トランスミッタ d. センサ



骨盤センサ



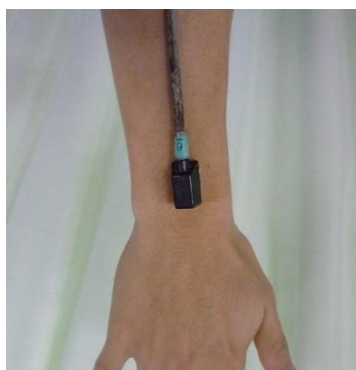
胸郭センサ



肩甲骨センサ



上腕センサ



上腕センサ

図 3. 各センサの身体貼付部位

### 2-3. データ収集

基準座標系は水平に置かれたトランスミッタに定義し，投球方向へ向かうベクトルを  $Y_G$  軸，水平面から鉛直方向へ向かうベクトルを  $Z_G$  軸， $Y_G Z_G$  平面から垂直方向へ向かうベクトルを  $X_G$  軸とした．各セグメントの解剖学的座標系を定義するため，各セグメントの解剖学的ランドマークを触診することで同定し，スタイラスを用いてデジタイズすることにより，各セグメントに貼付したセンサに対する解剖学的ランドマークの位置を測定した(図 4)．各セグメントのデジタイズを行った解剖学的ランドマークは，骨盤セグメントは右上前腸骨棘(Rt anterior superior iliac spine: RA)，左上前腸骨棘(Lt anterior superior iliac spine: LA)，恥骨結合(symphysis pubis: SP)の 3 点とした．胸郭セグメントは胸骨柄(manubrium of sternum: MS)，剣状突起(xiphoid process: XP)，C7 棘突起(C7 spinous process: C7)，T8 棘突起(T8 spinous process: T8)の 4 点とした．肩甲骨セグメントは肩峰(acromion: AC)，肩甲骨内側縁(medial border of spine of scapula: SP)，肩甲骨下角(inferior angle: IA)の 3 点とした．上腕骨セグメントは内側上顆(medial epicondyle: ME)，外側上顆(lateral epicondyle: LE)の 2 点とした．前腕セグメントは肘頭(olecranon: OL)，尺骨茎状突起(styloid process of ulna: US)，橈骨茎状突起(styloid process of radius: RS)の 3 点とした．また，肩甲上腕関節の中心(center of gleno-humeral joint: GH)は，上肢下垂位にて上

肢で弧を描くよう運動を行わせた際の瞬時らせん軸を 60Hz で繰り返し算出し、  
それらの Pivot Point として推定した。

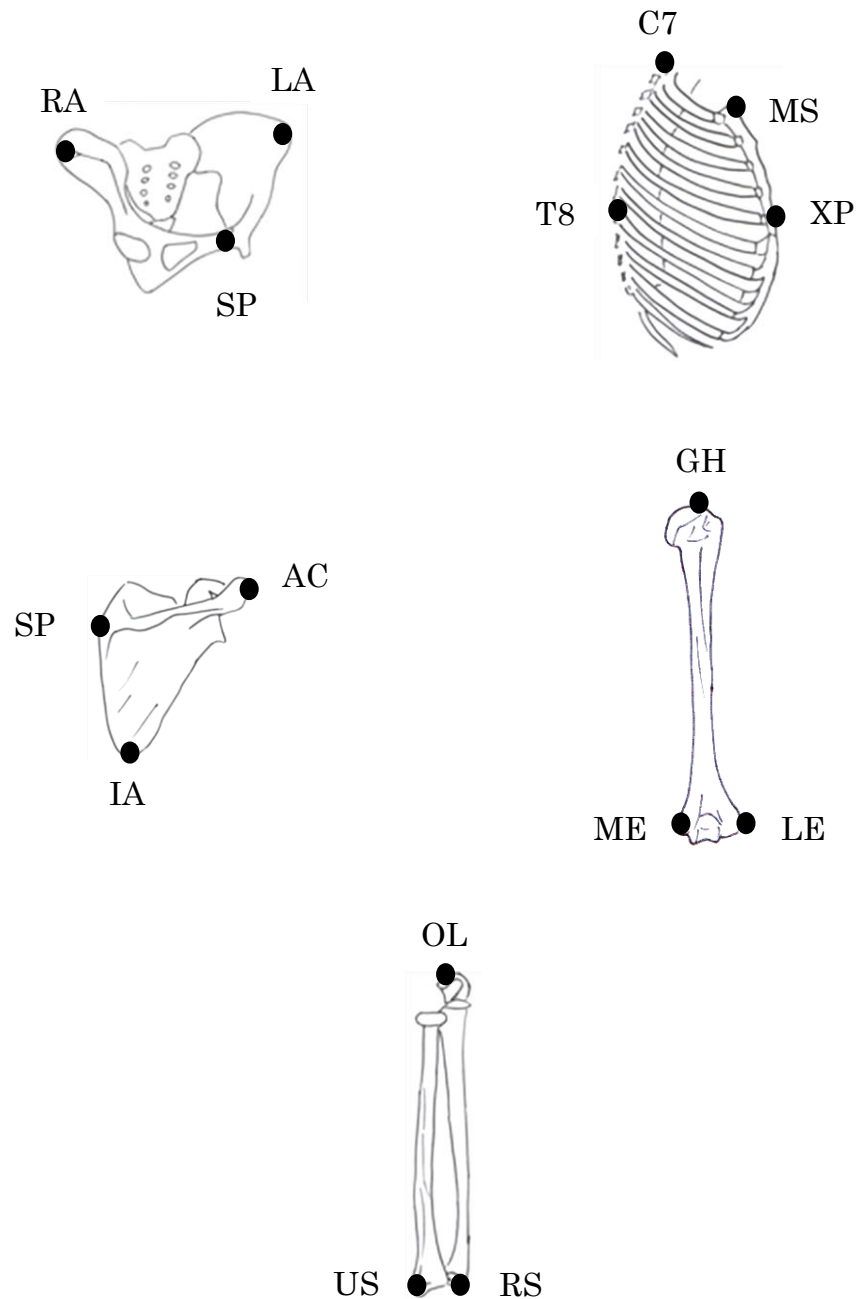


図 4. 骨盤，胸郭，肩甲骨，上腕骨，前腕セグメントにおけるデジタルポイント

### 2-3-1. 投球動作測定

対象者は、十分なウォーミングアップを行った上で、マウンド上に設置されたピッチャーズプレートからホームベースの後方に位置する捕手に向かって10球の全力投球を試行した。ピッチャーズプレートからホームベースまでの距離は、18.44mとした。10球のうち3球投じられた直球におけるLate Cocking期の鉛直軸に対して前腕が最も後方へ傾いた瞬間の値を算出し、分析にはその平均値を用いた。

### 2-3-2. 各セグメントの傾きの算出方法

Late Cocking 期の鉛直軸に対して前腕の後方への傾きが最大となった瞬間の骨盤、胸郭、肩甲骨、前腕セグメントの Z 軸を静止座標系の YZ 平面へ投影することで、各セグメントの前後方向への傾きを算出した(図 5)。

#### 2-3-2-1. 骨盤セグメントの傾き

基準座標系に対する骨盤センサ座標系の方位を表す行列( $\mathbf{A}_{\text{PEsensor/GSC}}$ )、位置を表すベクトル( $\mathbf{r}_{\text{PEsensor/GCS}}$ )、およびデジタイズによって取得した骨盤センサ座標系に対する骨盤ランドマーク(RA, LA, SP)の位置を表すベクトル( $\mathbf{r}'_{\text{RA/PEsensor}}$ ,  $\mathbf{r}'_{\text{LA/PEsensor}}$ ,  $\mathbf{r}'_{\text{SP/PEsensor}}$ )より、基準座標系に対する骨盤ランドマークの位置

( $\mathbf{r}_{RA/GCS}$ ,  $\mathbf{r}_{LA/GCS}$ ,  $\mathbf{r}_{SP/GCS}$ )を求めた. (式 1.1)

$$\mathbf{r}_{PE/GCS} = \mathbf{A}_{PEsensor/GSC} \mathbf{r}'_{PE/PEsensor} + \mathbf{r}_{PEsensor/GCS} \quad (\text{式 1.1})$$

基準座標系における骨盤ランドマークの位置( $\mathbf{r}_{RA/GCS}$ ,  $\mathbf{r}_{LA/GCS}$ ,  $\mathbf{r}_{SP/GCS}$ )より, 基準座標系における骨盤  $Z_{PE}$  軸=( $PE_x$ ,  $PE_y$ ,  $PE_z$ )を定義した. すなわち, 骨盤座標系は, LA から RA へ向かうベクトルを  $X_{PE}$  軸とし, SA から LA と RA の中点へ向かうベクトルと  $X_{PE}$  軸との外積によって得られるベクトルを  $Y_{PE}$  軸,  $X_{PE}$  軸と  $Y_{PE}$  軸の外積によって得られるベクトルを  $Z_{PE}$  軸とした(図 6, 左上). 最後に, 基準座標系における骨盤  $Z_{PE}$  軸を基準座標系の  $Z_G Y_G$  平面上に投影することにより, 基準座標系の  $Z_G Y_G$  平面上に投影した骨盤  $Z_{PE}$  軸と基準座標系  $Z_G$  軸との成す角度  $\theta_{PE/G}$  を求めた. (式 1.2)

$$\theta_{PE/G} = \tan^{-1}(PE_y/PE_z) \quad (\text{式 1.2})$$

算出した  $\theta_{PE/G}$  は, 鉛直軸に対する骨盤の傾きと定義した(図 5, ①). 鉛直軸に対する骨盤  $Z_{PE}$  軸の反時計回り方向への傾きをプラス, 時計回り方向への傾きをマイナス方向とした.

### 2-3-2-2. 胸郭セグメントの傾き

基準座標系に対する胸郭センサ座標系の方位を表す行列( $\mathbf{A}_{\text{THsensor/GCS}}$ ), 位置を表すベクトル( $\mathbf{r}_{\text{THsensor/GCS}}$ ), およびデジタイズによって取得した胸郭センサ座標系における胸郭ランドマーク(MS, XP, C7, T8)の位置を表すベクトル

( $\mathbf{r}'_{\text{MS/THsensor}}$ ,  $\mathbf{r}'_{\text{XP/THsensor}}$ ,  $\mathbf{r}'_{\text{C7/THsensor}}$ ,  $\mathbf{r}'_{\text{T8/THsensor}}$ )より, 基準座標系における胸郭ランドマークの位置( $\mathbf{r}_{\text{MS/GCS}}$ ,  $\mathbf{r}_{\text{XP/GCS}}$ ,  $\mathbf{r}_{\text{C7/GCS}}$ ,  $\mathbf{r}_{\text{T8/GCS}}$ )を求めた. (式

2.1)

$$\mathbf{r}_{\text{TH/GCS}} = \mathbf{A}_{\text{THsensor/GCS}} \mathbf{r}'_{\text{TH/THsensor}} + \mathbf{r}_{\text{THsensor/GCS}}$$

(式 2.1)

基準座標系における胸郭ランドマークの位置( $\mathbf{r}_{\text{MS/THsensor}}$ ,  $\mathbf{r}_{\text{XP/THsensor}}$ ,  $\mathbf{r}_{\text{C7/THsensor}}$ ,  $\mathbf{r}_{\text{T8/THsensor}}$ )より, 基準座標系における胸郭  $Z_{\text{TH}}$  軸( $\text{TH}_x$ ,  $\text{TH}_y$ ,  $\text{TH}_z$ )を定義した. すなわち, 胸郭座標系は, XP と T8 の中点から MS と C7 の中点へ向かうベクトルを  $Z_{\text{TH}}$  軸とし, T8 から XP へ向かうベクトルと  $Z_{\text{TH}}$  軸の外積によって得られるベクトルを  $X_{\text{TH}}$  軸,  $Z_{\text{TH}}$  軸と  $X_{\text{TH}}$  軸の外積によって得られるベクトルを  $Y_{\text{TH}}$  軸とした(図 6, 左上).

最後に, 基準座標系における胸郭  $Z_{\text{TH}}$  軸を基準座標系の  $Z_{\text{G}}Y_{\text{G}}$  平面上に投影することにより, 基準座標系の  $Z_{\text{G}}Y_{\text{G}}$  平面上に投影した胸郭  $Z_{\text{TH}}$  軸と基準座標系  $Z_{\text{G}}$  軸との成す角度  $\theta_{\text{TH/G}}$  を求めた. (式 2.2)



$$\theta_{TH/G} = \tan^{-1}(TH_y/TH_z)$$

(式 2.2)

$\theta_{PE/G}$  と  $\theta_{TH/G}$  より，基準座標系  $Z_G Y_G$  平面上に投影した骨盤  $Z_{PE}$  軸と，基準座標系  $Z_G Y_G$  平面上に投影した胸郭  $Z_{TH}$  軸の角度  $\theta_{TH/PE}$  を求めた．(式 2.3)

$$\theta_{TH/PE} = \theta_{TH/H} - \theta_{PE/H}$$

(式 2.3)

算出した  $\theta_{TH/PE}$  は，骨盤に対する胸郭の傾きと定義した(図 5，②)．骨盤  $Z_{PE}$  軸に対する胸郭  $Z_{TH}$  軸の反時計回り方向への傾きをプラス，時計回り方向への傾きをマイナス方向とした．

### 2-3-2-3. 肩甲骨セグメントの傾き

基準座標系に対する肩甲骨センサ座標系の方位を表す行列( $\mathbf{A}_{SCsensor/GCS}$ )，位置を表すベクトル( $\mathbf{r}_{SCsensor/GCS}$ )，およびデジタイズによって取得した肩甲骨センサ座標系における肩甲骨ランドマーク (AC, SP, IA) の位置を表すベクトル ( $\mathbf{r}'_{AC/SCsensor}$ ,  $\mathbf{r}'_{SP/SCsensor}$ ,  $\mathbf{r}'_{IA/SCsensor}$ ) より，基準座標系における肩甲骨ランドマークの位置( $\mathbf{r}_{AC/GCS}$ ,  $\mathbf{r}_{SP/GCS}$ ,  $\mathbf{r}_{IA/GCS}$ ) を求めた．(式 3.1)

$$\mathbf{r}_{SC/GCS} = \mathbf{A}_{SCsensor/GCS} \mathbf{r}'_{SC/SCsensor} + \mathbf{r}_{SCsensor/GCS}$$

(式 3.1)

基準座標系における骨盤ランドマークの位置( $\mathbf{r}_{AC/SCsensor}$  ,  $\mathbf{r}_{SP/SCsensor}$  ,  $\mathbf{r}_{IA/SCsensor}$ )より, 基準座標系における肩甲骨  $Z_{SC}$  軸= $(SC_x, SC_y, SC_z)$ を定義した. すなわち, 肩甲骨座標系は,  $SP$  から  $AC$  へ向かうベクトルを  $X_{SC}$  軸とし,  $IA$  から  $AC$  へ向かうベクトルと  $X_{SC}$  軸の外積によって得られるベクトルを  $Y_{SC}$  軸,  $X_{SC}$  軸と  $Y_{SC}$  軸の外積によって得られるベクトルを  $Z_{SC}$  軸とした(図 6, 右上).

最後に, 基準座標系における肩甲骨  $Z_{SC}$  軸を基準座標系の  $Z_G Y_G$  平面上に投影することにより, 基準座標系の  $Z_G Y_G$  平面上に投影した肩甲骨  $Z_{SC}$  軸と基準座標系  $Z_G$  軸との成す角度  $\theta_{SC/G}$  を求めた. (式 3.2)

$$\theta_{SC/G} = \tan^{-1}(SC_y/SC_z)$$

(式 3.2)

$\theta_{TH/G}$  と  $\theta_{SC/G}$  より, 基準座標系  $Z_G Y_G$  平面上に投影した胸郭  $Z_{TH}$  軸に対する肩甲骨  $Z_{SC}$  軸の角度  $\theta_{SC/TH}$  を求めた. (式 3.3)

$$\theta_{SC/TH} = \theta_{SC/H} - \theta_{TH/H}$$

(式 3.3)

算出した  $\theta_{SC/TH}$  は, 胸郭に対する肩甲骨の傾きと定義した(図 5, ③). 胸郭  $Z_{TH}$  軸に対する肩甲骨  $Z_{SC}$  軸の反時計回り方向への傾きをプラス, 時計回り方向への傾きをマイナス方向とした.

#### 2-3-2-4. 前腕セグメントの傾き

基準座標系に対する前腕センサ座標系の方位を表す行列( $\mathbf{A}_{\text{FOsensor/GCS}}$ ), 位置を表すベクトル( $\mathbf{r}_{\text{FOsensor/GCS}}$ ), およびデジタイズによって取得した前腕センサ座標系における前腕ランドマーク (OL, US, RS) の位置を表すベクトル ( $\mathbf{r}'_{\text{OL/FOsensor}}$ ,  $\mathbf{r}'_{\text{US/FOsensor}}$ ,  $\mathbf{r}'_{\text{RS/FOsensor}}$ ) より, 基準座標系における前腕ランドマーク (OL, US, RS) の位置 ( $\mathbf{r}_{\text{OL/GCS}}$ ,  $\mathbf{r}_{\text{US/GCS}}$ ,  $\mathbf{r}_{\text{RS/GCS}}$ ) を求めた. (式 4.1)

$$\mathbf{r}_{\text{FO/GCS}} = \mathbf{A}_{\text{FOsensor/GCS}} \mathbf{r}'_{\text{FO/FOsensor}} + \mathbf{r}_{\text{FOsensor/GCS}} \quad (\text{式 4.1})$$

基準座標系における前腕ランドマークの位置 ( $\mathbf{r}_{\text{OL/FOsensor}}$ ,  $\mathbf{r}_{\text{US/FOsensor}}$ ,  $\mathbf{r}_{\text{RS/FOsensor}}$ ) より, 基準座標系における前腕  $Z_{\text{FO}}$  軸 = ( $\text{FO}_x$ ,  $\text{FO}_y$ ,  $\text{FO}_z$ ) を定義した. すなわち, 前腕座標系は, OL から US と RS の中点へ向かうベクトルを  $Z_{\text{FO}}$  軸とし,  $Z_{\text{FO}}$  軸と US から RS へ向かうベクトルの外積によって得られるベクトルを  $Y_{\text{FO}}$  軸,  $Y_{\text{FO}}$  軸と  $Z_{\text{FO}}$  軸の外積によって得られるベクトルを  $X_{\text{FO}}$  軸とした (図 6, 下).

最後に, 基準座標系における前腕  $Z_{\text{FO}}$  軸を基準座標系の  $Z_{\text{G}}Y_{\text{G}}$  平面上に投影することにより, 基準座標系の  $Z_{\text{G}}Y_{\text{G}}$  平面上に投影した前腕  $Z_{\text{FO}}$  軸と基準座標系  $Z_{\text{G}}$  軸との成す角度  $\theta_{\text{FO/G}}$  を求めた. (式 4.2)

$$\theta_{FO/H} = \tan^{-1}(FO_y/FO_z)$$

(式 4.2)

$\theta_{SC/H}$  と  $\theta_{FO/H}$  より, 基準座標系  $Z_G Y_G$  平面上に投影した肩甲骨  $Z_{SC}$  軸に対する前腕  $Z_{FO}$  軸の角度  $\theta_{FO/SC}$  を求めた. (式 4.3)

$$\theta_{FO/SC} = \theta_{FO/H} - \theta_{SC/H}$$

(式 4.3)

算出した  $\theta_{FO/SC}$  は, 肩甲骨に対する前腕の傾きと定義した(図 5, ④). 肩甲骨  $Z_{SC}$  軸に対する前腕  $Z_{FO}$  軸の反時計回り方向への傾きをプラス, 時計回り方向への傾きをマイナス方向とした.

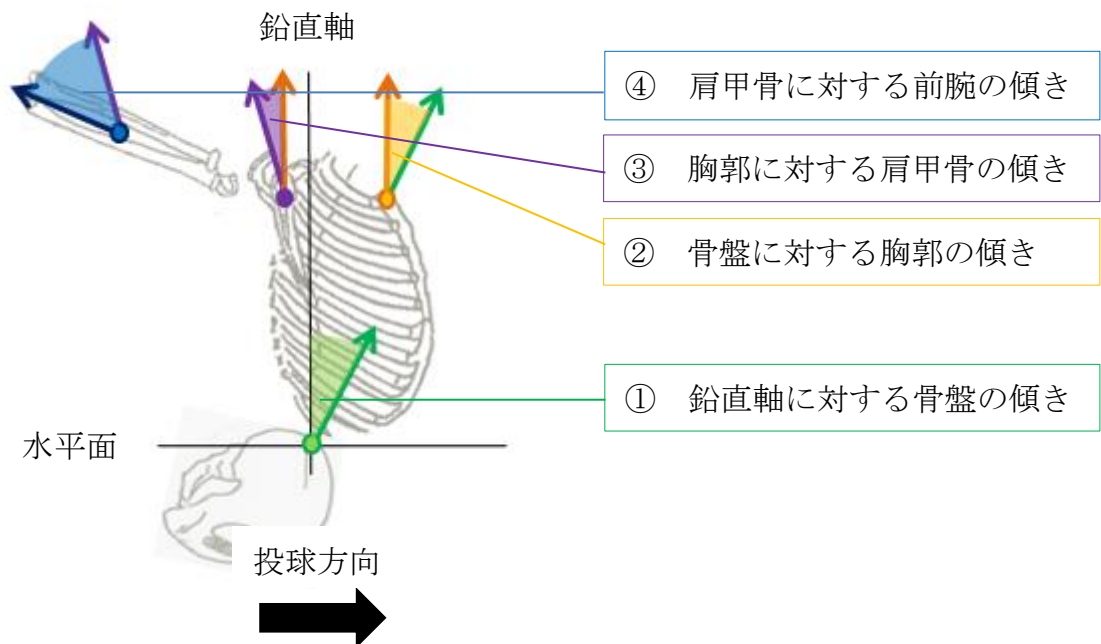


図 5. 近位セグメントに対する各セグメントの傾き

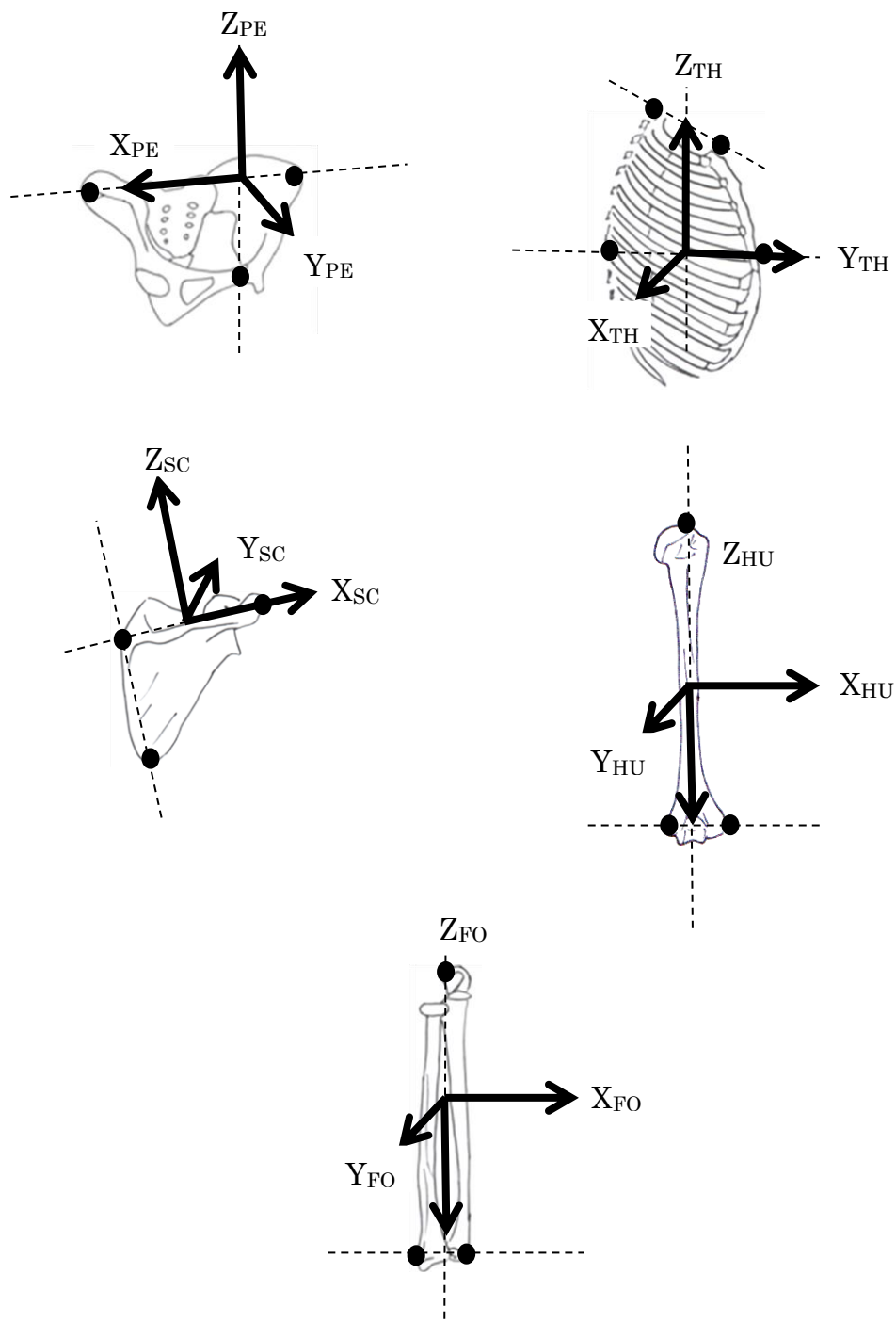


図 6. 骨盤，胸郭，肩甲骨，上腕骨，前腕セグメントにおける解剖学的座標系

### 2-3-3. 3 次元的な肩甲上腕関節角度

前腕の後方への傾きが最大となった瞬間の肩甲上腕関節角度は，肩甲骨座標系に対する上腕骨座標系より算出したオイラー角(外旋角，水平外転角，拳上角)とした．オイラー角は，初めに肩甲骨座標系と一致する移動座標系  $R_{H0}(x_{H0}, y_{H0}, z_{H0})$  を  $z_{H0}$  軸回りに  $\theta$  回転させ，次に 1 回目の回転で得られた座標系  $R_{H1}(x_{H1}, y_{H1}, z_{H1})$  を  $y_{H1}$  軸回りに  $\phi$  回転させ，最後に 2 回目の回転で得られた  $R_{H2}(x_{H2}, y_{H2}, z_{H2})$  を  $z_{H2}$  回りに  $\psi$  回転させることによって得られる  $R_{H3}(x_{H3}, y_{H3}, z_{H3})$  が上腕骨座標系と一致する場合の 3 つの回転の角度( $\theta, \phi, \psi$ )として定義した．算出された 3 つの回転の角度( $\theta, \phi, \psi$ )をそれぞれ肩甲上腕関節水平内転，下制，内旋角度とした．1 回目の回転の方向と大きさを表す回転行列を  $A_{(RH1/RH0)}$ ，2 回目の回転の方向を大きさ表す回転行列を  $A_{(RH2/RH1)}$ ，3 回目の回転の方向を大きさ表す回転行列を  $A_{(RH3/RH2)}$ とした．

以上の回転行列を用いて，座標系  $R_{H0}$  に対する  $R_{H3}$  の回転行列  $A_{(RH3/RH0)}$  を求めた． $A_{(RH1/RH0)}$  は  $R_{H0}$  に対する  $R_{H1}$  の方位を表す回転行列， $A_{(RH2/RH1)}$  は  $R_{H1}$  に対する  $R_{H2}$  の方位を表す回転行列， $A_{(RH3/RH2)}$  は  $R_{H2}$  に対する  $R_{H3}$  の方位を表す回転行列である．

$$\begin{aligned}
A_{(RH1/RH0)} &= \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
A_{(RH2/RH1)} &= \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \\
A_{(RH3/RH2)} &= \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

$$A_{(RH3/RH0)} = A_{(RH1/RH0)} A_{(RH2/RH1)} A_{(RH3/RH2)}$$

$$A_{(RH3/RH2)} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\sin \theta \cos \varphi \sin \psi & \cos \theta \sin \psi + \sin \theta \cos \varphi \cos \psi & \sin \theta \sin \varphi \\ -\sin \theta \cos \psi & -\cos \theta \cos \varphi \sin \psi & -\sin \theta \sin \psi + \cos \theta \cos \varphi \cos \psi & \cos \theta \sin \varphi \\ \sin \varphi \sin \psi & -\sin \varphi \cos \psi & \cos \varphi & \end{bmatrix}$$

(式 5.1)

肩甲骨座標系に対する上腕骨座標系の方位と  $\mathbf{R}_{H0}$  に対する  $\mathbf{R}_{t3}$  の方位が一致することから、肩甲骨座標系に対する上腕骨座標系の方位は次のようにも表せる。  
 なお、 $\mathbf{A}_{(Rt/Rg)}$  は基準座標系  $\mathbf{R}_g$  に対する肩甲骨座標系  $\mathbf{R}_t$  の方位を表す回転行列を示し、 $\mathbf{A}_{(Rs/Rg)}$  は基準座標系  $\mathbf{R}_g$  に対する上腕骨座標系  $\mathbf{R}_s$  の方位を表す回転座標系を示す。

$$\mathbf{A}_{(Rs3/Rs0)} = \mathbf{A}_{(Rs/Rt)} = \mathbf{A}_{(Rt/Rg)}^{-1} \cdot \mathbf{A}_{(Rs/Rg)} = \mathbf{A}_{(Rt/Rg)}^T \cdot \mathbf{A}_{(Rs/Rg)}$$

$$\mathbf{A}_{(Rs3/Rs0)} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix}$$

(式 5.2)

式 5.1 と式 5.2 から、以下のように  $\theta$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$  を算出した。

$$\theta = \tan^{-1}(-\alpha_{23}/\alpha_{33})$$

$$\varphi = \tan^{-1}(\alpha_{13}/\sqrt{\alpha_{22}^2 + \alpha_{33}^2})$$

$$\psi = \tan^{-1}(-\alpha_{23}/\alpha_{33})$$



## 第3章

### 結果

#### 3-1. 鉛直軸に対する各セグメントの傾き

前腕の後方への傾きが最大となった瞬間には，前腕は鉛直軸に対して平均で  $90.3 \pm 20.6^\circ$  後方へ傾斜していた(表 1, 図 7). 骨盤は鉛直軸に対して  $11.6 \pm 12.1^\circ$  前方へ傾斜していた. 胸郭, 肩甲骨, 前腕はそれぞれ隣接する近位セグメントに対して  $13.5 \pm 16.6^\circ$ ,  $20.0 \pm 15.7^\circ$ ,  $67.7 \pm 25.0^\circ$  後方に傾斜していた(表 1, 図 8).

表 1. 鉛直軸を基準とした各セグメントの傾き

| 各セグメント       | 角度( $^\circ$ )   |
|--------------|------------------|
| 矢状面に対する骨盤の傾き | $-11.7 \pm 12.1$ |
| 骨盤に対する胸郭の傾き  | $13.6 \pm 16.6$  |
| 胸郭に対する肩甲骨の傾き | $20.0 \pm 15.1$  |
| 肩甲骨に対する前腕の傾き | $67.7 \pm 25.0$  |
| 鉛直軸に対する前腕の傾き | $90.3 \pm 20.6$  |

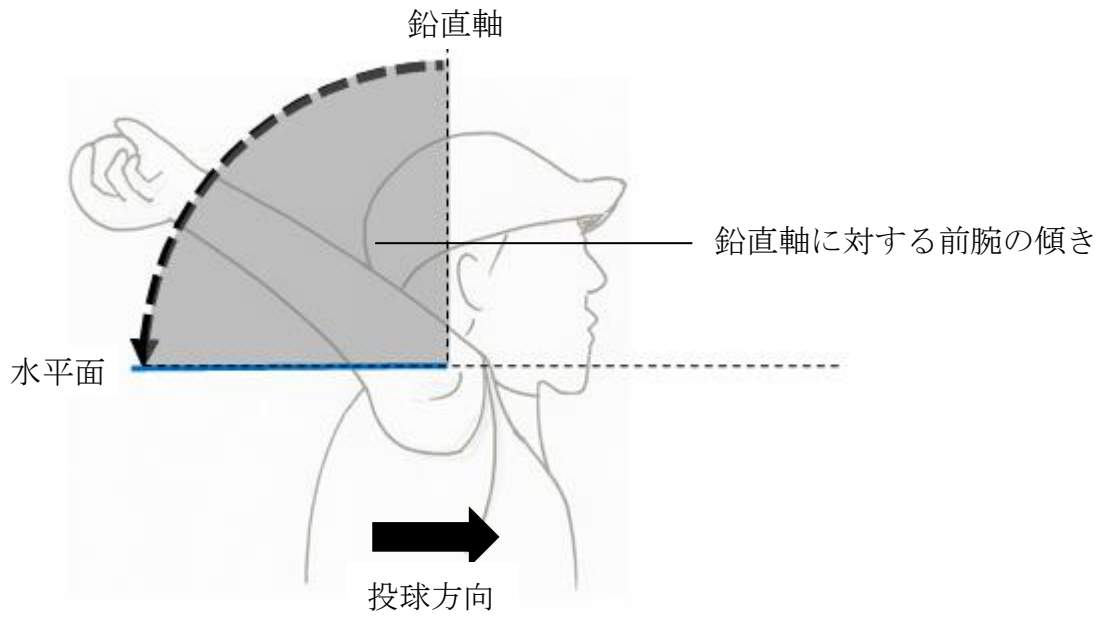


図 7. 鉛直軸に対する前腕の傾き

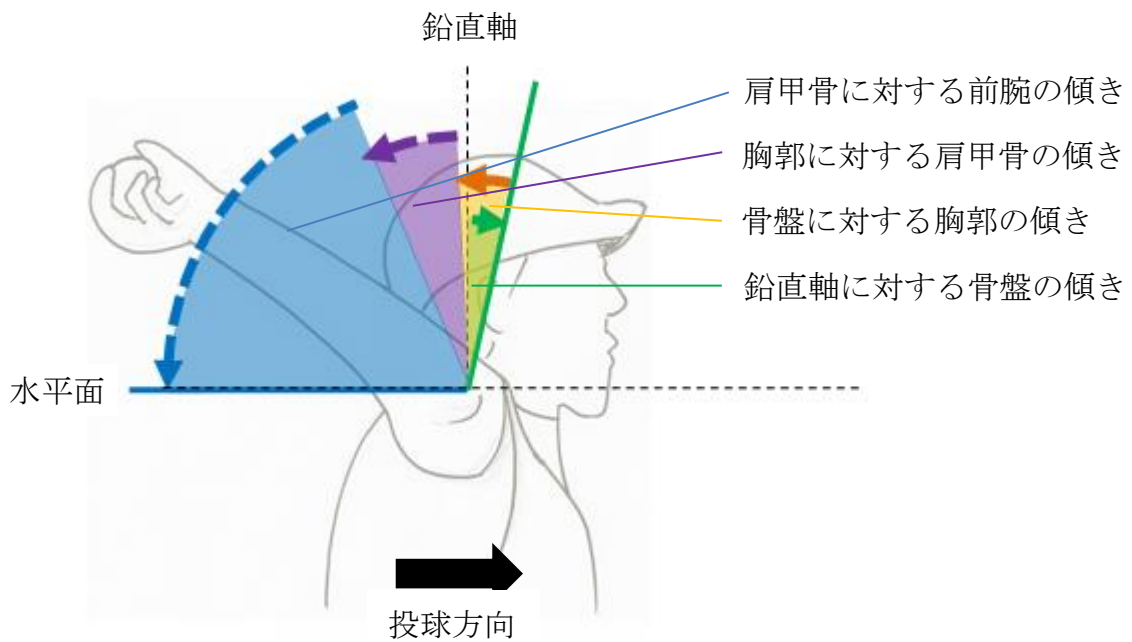


図 8. 隣接する近位セグメントに対する各セグメントの傾き

### 3-2. 3次元的な肩甲上腕関節角度

前腕の後方への傾きが最大となった瞬間には、肩甲上腕関節角度は、外旋角  $97.5 \pm 25.3^\circ$ ，水平外転角  $14.2 \pm 9.7^\circ$ ，拳上角  $84.6 \pm 23.8^\circ$ であった(表 2).

表 2. 3次元的な肩甲上腕関節角度( $^\circ$ )

|          | 外旋角             | 水平外転角          | 拳上角             |
|----------|-----------------|----------------|-----------------|
| 肩甲上腕関節角度 | $97.5 \pm 25.3$ | $14.2 \pm 9.7$ | $84.6 \pm 23.8$ |

## 第4章

### 考察

#### 4-1. 前腕の後方への傾きを構成する因子

投球動作における **Late Cocking** 期の前腕の後方への傾きが最大となった瞬間には、鉛直軸に対して前腕は後方へ  $90.3^\circ$  傾くことが示された。前腕の後方への傾きを構成する因子について、その詳細を以下に説明する。骨盤は、鉛直軸に対して前方へ  $11.7^\circ$  傾き、前腕の後方への傾きを減少させていた。これは被験者全員から観察された結果であり、投手は **Late Cocking** 期に骨盤が前傾位にあることを示すものである。また、骨盤が鉛直軸に対して前方に傾くという結果は、前腕の後方への傾きに対して骨盤が負の貢献をしていたことを示すものである。胸郭は、骨盤に対して後方へ  $13.5^\circ$  傾き、前腕の後方への傾きを増加させていた。これは、胸郭は前腕の後方への傾きに対して正の貢献をしていたことを示す。胸郭が骨盤に対して後方へ傾くことは、**Late Cocking** 期に体幹が伸展位あることを意味している。骨盤の前方への傾きと体幹の伸展により、骨盤の前方への傾きがもたらした前腕の後方傾斜への負の貢献を胸郭の後方へ傾斜による正の貢献が相殺し、その結果として胸郭は地面に対して鉛直に近い肢位を取っていたことが示された。肩甲骨は、胸郭に対して後方へ  $15.3^\circ$  傾き、前腕の後方への

傾きを増加させていた。肩甲骨が胸郭に対して後方へ傾くことは、Late Cocking 期に肩甲骨が後傾位であることを意味している。肩甲骨の後方傾斜は、前腕の後方への傾きに対して正の貢献をもたらす。さらに、前腕は肩甲骨に対して後方へ 67.7°傾いていた。前腕の肩甲骨に対する傾きは、主に肩甲骨に対する上腕骨の長軸回りの運動(肩甲上腕関節内旋—外旋運動)によって生じるものと捉えることができる。このことから、Late Cocking 期の前腕の後方への傾きが最大となった瞬間には、主に肩甲上腕関節が外旋位に位置することにより、前腕の後方への傾きに対して正の貢献をもたらすことが示された。

これらの結果から、Late Cocking 期の前腕の後方への傾きが最大となった瞬間には、胸郭が伸展位、肩甲骨が後傾位、肩甲上腕関節が外旋位であることが明らかとなった。また、前腕の後方への最大の傾きは、胸郭の伸展方向への傾き、肩甲骨の後傾方向への傾き、前腕の後方への傾きの和として生成されていることが明らかとなった。これらの結果は、Miyashita ら(2010)、矢内(2007, 2011)の報告<sup>(8)(13)(14)</sup>による Late Cocking 期には肩甲骨後傾および肩甲上腕関節外旋が生じるという知見を支持するものであった。更に、本研究において骨盤に対して胸郭が伸展位にあることが明らかとなり、矢内(2011)による、Late Cocking 期には胸郭が骨盤に対して向きを変える(体幹が伸展する)という報告<sup>(9)</sup>を支持するものであった。これらから、前腕の後方への傾きが最大となった瞬

間には、胸郭を伸展させること、すなわち「胸を張る」ことにより前腕の後方への傾きを増大させることができることが示された。

前腕の後方への傾きに対する各セグメントによる貢献の度合いを明らかにするために、鉛直軸に対する前腕の傾きに対する各セグメントの傾きの割合を表 3 に示した。これは、鉛直軸に対する前腕の後方への傾きを 100%とし、各セグメントの後方への傾きを正として割合を算出したものである。

表 3. 鉛直軸に対する前腕の後方への傾きに対する各セグメントの貢献の割合

| 各セグメント       | 貢献度(%)       |
|--------------|--------------|
| 鉛直軸に対する骨盤の傾き | -12.9 ± 13.7 |
| 骨盤に対する胸郭の傾き  | 15.4 ± 18.5  |
| 胸郭に対する肩甲骨の傾き | 22.6 ± 18.1  |
| 肩甲骨に対する前腕の傾き | 74.1 ± 17.9  |
| 鉛直軸に対する前腕の傾き | 100          |

この結果から、骨盤に対して胸郭が伸展方向へ傾くことにより 15.4%、胸郭に対して肩甲骨が後傾方向へ傾くことにより 22.6%、肩甲骨に対して前腕が後方へ傾くことにより 74.1%の貢献を行っていることが示された。このことから、鉛直軸に対する前腕の後方への傾きは、約 74%が肩甲骨に対する前腕の後方へ

の傾きにより構成されており，肩甲骨に対して前腕を後方へ大きく傾けることが「腕のしなり」を生成する最も重要な要因であることが示唆された．また，胸郭の伸展方向への傾き，肩甲骨の後傾方向への傾きがそれぞれ 15.4%, 22.6% の割合を占め，鉛直軸に対する前腕の後方への傾きの約 38% が肩甲骨に対する前腕が後方へ傾くこと以外の要因により生じていた．このことから，胸郭の伸展方向の運動および肩甲骨の後傾方向の運動は，投球動作における「腕のしなり」を生成する重要な要素の 1 つであることが示された．

#### 4-2. 各被験者間における各セグメントの運動パターン

本研究の結果から，鉛直軸に対する前腕の後方への傾きを構成する各セグメントの貢献の大きさの割合には，被験者間にて複数の運動パターンが存在することが示唆された(図 9)．一つ目のパターンは，骨盤に対して胸郭が大きく傾くことによる貢献の大きな「胸郭型」，二つ目のパターンは，胸郭に対して肩甲骨が大きく傾くことによる貢献の大きな「肩甲骨型」，三つ目のパターンは，胸郭，肩甲骨の傾きが共に小さく，肩甲骨に対する前腕の傾きによる貢献の大きな「前腕型」である．

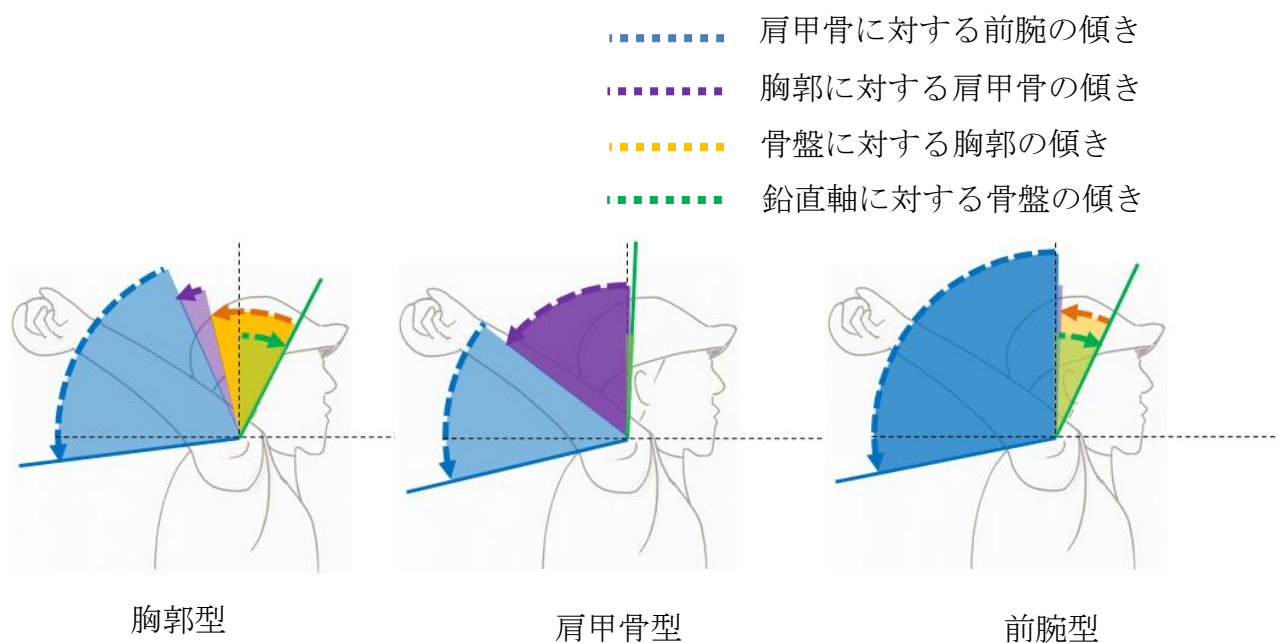


図 9. 被験者間における特徴的なパターン

表 4. 鉛直軸を基準とした各セグメントの貢献(%)

|              | 胸郭型<br>(n=3)    | 肩甲骨型<br>(n=3)   | 前腕型<br>(n=3)    | 平均<br>(n=19)     |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| 鉛直軸に対する骨盤の傾き | $-28.2 \pm 3.9$ | $-1.8 \pm 15.1$ | $-24.8 \pm 7.4$ | $-12.9 \pm 13.7$ |
| 骨盤に対する胸郭の傾き  | $40.5 \pm 6.0$  | $-0.8 \pm 19.7$ | $21.8 \pm 14.9$ | $15.4 \pm 18.5$  |
| 胸郭に対する肩甲骨の傾き | $10.0 \pm 5.2$  | $51.9 \pm 10.6$ | $0.8 \pm 9.7$   | $22.6 \pm 18.1$  |
| 肩甲骨に対する前腕の傾き | $72.9 \pm 3.4$  | $49.6 \pm 9.9$  | $100.9 \pm 1.7$ | $74.1 \pm 17.9$  |
| 鉛直軸に対する前腕の傾き | 100             | 100             | 100             | 100              |



「胸郭型」、「肩甲骨型」、「前腕型」における各セグメントによる貢献の度合いを詳細に分析するために、各運動パターンにおける鉛直軸に対する前腕の後方への傾きに対する各セグメントの傾きの割合を算出した。各セグメントの貢献が最も大きかった被験者を各セグメントにつき 3 名抽出し、その平均を表 4 に示した。更に、表 3 に示した全被験者における鉛直軸に対する前腕の後方への傾きに対する各セグメントの傾きの割合と比較した。

その結果、「胸郭型」では、骨盤に対する胸郭の傾きが 40.5%を占め、平均(15.4%)と比較すると、鉛直軸に対する前腕の後方への傾きに対して胸郭の後方への傾きが顕著に大きな貢献をすることが数値の上でも確認された。また、胸郭に対する肩甲骨の傾きが 10.0%, 肩甲骨に対する前腕の傾きが 72.9%を占め、平均(肩甲骨：22.6%, 前腕：74.1%)と比較すると、鉛直軸に対する前腕の後方への傾きに対して肩甲骨、および前腕の後方への傾きの貢献は小さいことが示された。この結果は、「胸郭型」は骨盤に対して胸郭を伸展方向へ大きく傾きを持たせることにより、鉛直軸に対する前腕の後方への傾きを増大させていることを示すものであった。

「肩甲骨型」では、胸郭に対する肩甲骨の傾きが 51.9%を占め、平均(22.6%)と比較すると、鉛直軸に対する前腕の後方への傾きに対して肩甲骨の後方への傾きが顕著に大きな貢献をすることが数値の上でも確認された。また、骨盤に

対する胸郭の傾きが-0.8%, 肩甲骨に対する前腕の傾きが 49.6%を占め, 平均(胸郭: 15.4%, 前腕 74.1%)と比較すると, 鉛直軸に対する前腕の後方への傾きに対して胸郭, および前腕の後方への傾きは小さな貢献であることが示された.

このことより, 「肩甲骨型」は胸郭に対して肩甲骨を後傾方向へ大きく傾きを持たせることにより, 鉛直軸に対する前腕の後方への傾きを増大させていることを示すものであった.

「前腕型」では, 肩甲骨に対する前腕の傾きが 100.9%を占め, 平均(74.1%)と比較して, 鉛直軸に対する前腕の後方への傾きに対して, 肩甲骨に対する前腕の後方への傾きが大きな貢献をすることが数値の上でも確認された. また, 骨盤に対する胸郭の傾きが 21.8%, 胸郭に対する肩甲骨の傾きが 0.8%を占め, 平均(胸郭: 15.4%, 肩甲骨: 22.6%)と比較すると, 鉛直軸に対する前腕の後方への傾きに対して胸郭, および肩甲骨の後方への傾きは小さな貢献であることが示された. このことより, 「前腕型」は肩甲骨に対して前腕を後方へ大きく傾きを持たせることにより, 鉛直軸に対する前腕の後方への傾きを増大させていることが示唆された.

また, 各運動パターンにおけるパフォーマンス能力の特徴を検討するために, 各運動パターンにおいて抽出した被験者 3 名の平均球速を比較した. その結果, 「胸郭型」は  $127.7 \pm 13.5$  km/h, 「肩甲骨型」は  $132 \pm 6.3$  km/h, 「前腕型」は  $130.4 \pm 6.9$

km/h であることが示された．このことから，平均球速に関して，各運動パターンの特徴的な傾向はみられず，各運動パターンとパフォーマンス能力の関連は示されなかった．

#### 4-3. 前腕の後方への傾きと 3 次元的な肩甲骨上腕関節外旋角度の比較

Late Cocking 期の肩甲骨に対する前腕の後方への傾きと，3 次元的な肩甲骨上腕関節外旋角度( $97.5^{\circ}$ )は一致しなかった．本研究により測定した Late Cocking 期の肩甲骨に対する前腕の後方への傾き( $67.7^{\circ}$ )は，肩甲骨と前腕の長軸を基準座標系における YZ 面に投影した際の角度として算出したものである．一方，3 次元的な肩甲骨上腕関節外旋角度( $97.5^{\circ}$ )は，肩甲骨に対する上腕骨の方位をオイラー角として算出したものである．したがって，両者の間では 0 度を表す基準が異なっている．そこで，肩甲骨に対する前腕の傾きを 3 次元的な肩甲骨上腕関節外旋角度と近似する基準で比較するために，肩甲骨に対する前腕の後方への傾きに  $90^{\circ}$ を足すことにより，肩甲骨の基準軸を肩甲骨座標系における Zsc 軸から Zsc 軸と垂直に交わる面に変換した．そして，肩甲骨座標系における Zsc 軸と垂直に交わる面に対する前腕の傾きを算出した(図 11)．また，基準座標系における Y 軸(水平面)を基準として，隣接する近位セグメントに対する各セグメントの傾きを図 12 に示した．

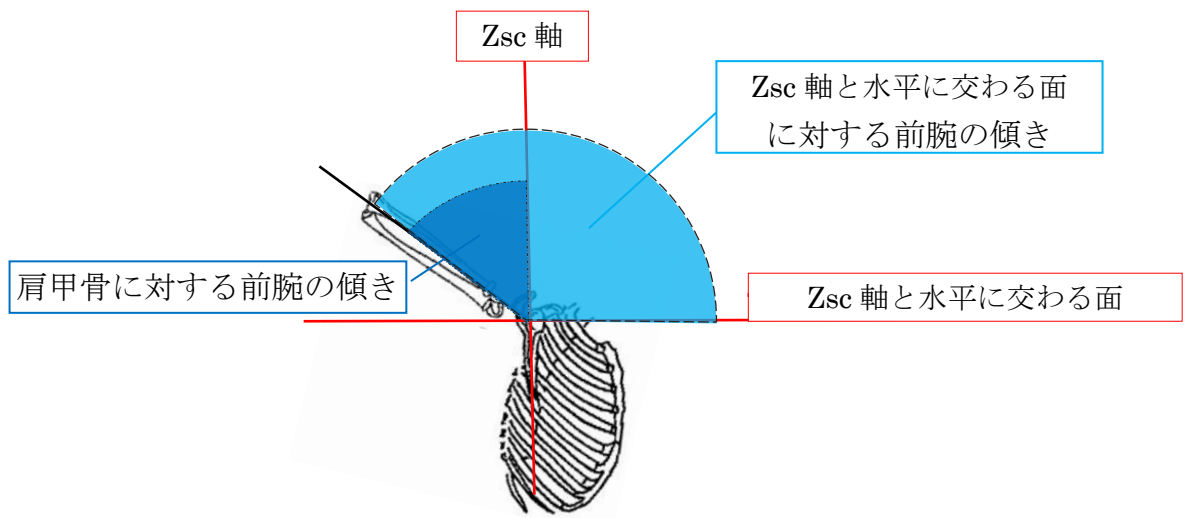


図 11. Zsc 軸と水平に交わる面に対する前腕の傾き

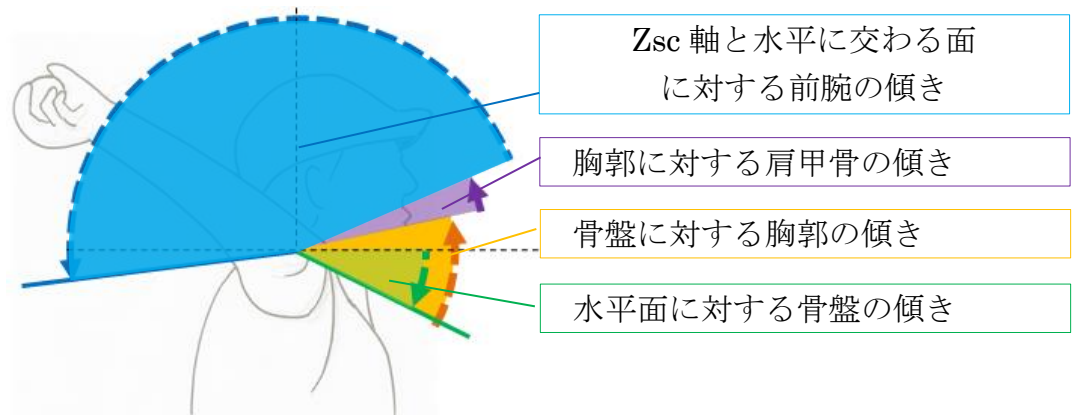


図 12. 水平面に対する前腕の後方への傾き

その結果、Zsc 軸と垂直に交わる面に対する前腕の傾きは  $157.7^\circ$  となり、3 次元的に測定した肩甲上腕関節外旋角度( $97.5^\circ$ )を大きく上回ることが示された(図 13)。このことから、前腕の後方への傾きとして視覚的に観察できる角度ほど、

実際には大きな肩甲上腕関節外旋角度は生じていないことが示された。また、Zsc 軸と垂直に交わる面に対する前腕の傾きと 3 次元的に測定した肩甲上腕関節外旋角度には約  $60^{\circ}$  の差異があり、これは前腕の後方への傾きが肩甲上腕関節外旋角度以外の要因が関与することにより増大することを示すと考えられる。

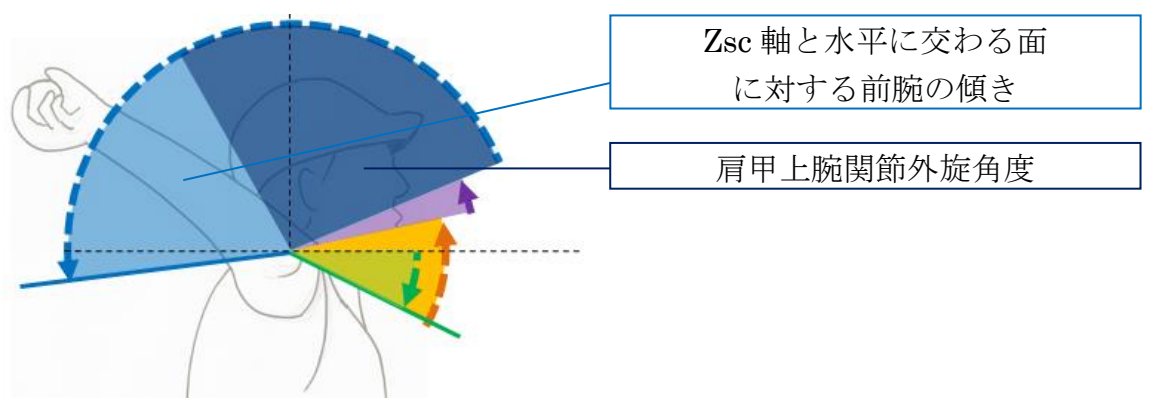


図.13 Zsc 軸と垂直に交わる面に対する前腕の傾きと肩甲上腕関節外旋角度

#### 4-4. 前腕の後方への傾きに対する肘関節屈曲角度の影響

肩甲骨座標系 Zsc 軸に垂直に交わる面に対する前腕の傾き( $157.7^{\circ}$ )と、3 次元的に計測した肩甲上腕関節外旋角度( $97.5^{\circ}$ )の不一致が生じる要因に関して検討を行った。この要因として、①上腕長軸が矢状面と直交していなかったため、上腕骨の外旋角度が同平面に投影された前腕長軸の傾きと一致しなかった可能性、および②前腕長軸が矢状面から逸脱していたため、前腕長軸が同平面に投影された際の傾きが上腕の外旋により後方に傾いた角度と一致しなかった可能性が考えられる。Late Cocking 期の前腕が後方へ最も傾いた瞬間には、投

手の肘部が肩関節よりも前方へ位置していたことから、上腕骨長軸が矢状面に直交していなかったことは明らかである。図 14 は、肩甲上腕関節側方拳上  $90^{\circ}$  かつ肘関節屈曲  $100^{\circ}$  (完全伸展を  $0^{\circ}$  と定義) で一定とし、前額面に対して上腕骨長軸を投球方向へ① $0^{\circ}$  , ②約  $30^{\circ}$  , ③約  $70^{\circ}$  傾斜させた際に、側方から観察したときにみられる前腕の後方への傾きを示したものである。ここで示したように、前額面に対して上腕長軸の投球方向への傾きが増大することにより、投手を側方から観察した際の前腕の傾きは増大する。また、同局面において肘関節の屈曲角が  $90$  度を上回っていた被験者が多かったことから、前腕長軸は矢状面と一致していなかったと考えられる。図 15 は、肩甲上腕関節側方拳上  $90^{\circ}$  かつ前額面に対して上腕長軸を投球方向へ  $30^{\circ}$  傾斜させた肢位で一定とし、肘関節屈曲① $90^{\circ}$  , ② $100^{\circ}$  とした際に、側方から観察したときにみられる前腕の後方への傾きを示したものである。この図から示されるように、前額面に対して上腕長軸が投球方向へ傾いた肢位にて  $90^{\circ}$  以上の肘関節屈曲が生じることにより、更に前腕の傾きを増大させ得る。以上のことより、Late Cocking 期の前腕が後方へ最も傾いた瞬間に実際に到達した肩甲上腕関節外旋角を大きく上回る投影角が矢状面で観察されたものと思われる。以下に、要因①と②による影響を考察する。

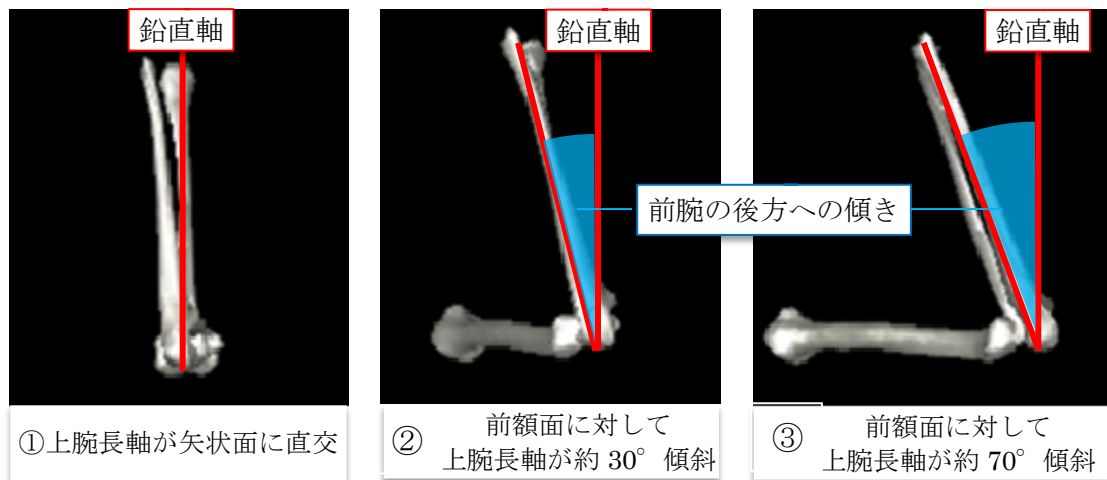


図 14. 前額面に対する上腕長軸の傾斜の影響

- ① ; 肩甲上腕関節拳上 90° かつ肘関節屈曲約 100° で、上腕長軸が、前額面に平行なる肢位
- ② ; 肩甲上腕関節拳上 90° かつ肘関節屈曲約 100° で、上腕長軸が投球方向へ約 30° 傾斜した肢位
- ③ ; 肩甲上腕関節拳上 90° かつ肘関節屈曲約 100° で、上腕長軸が投球方向へ約 70° 傾斜した肢位

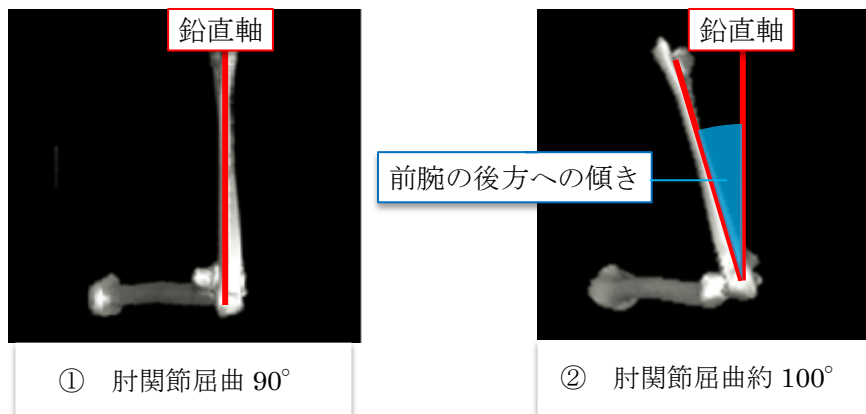


図 15. 投手を側方から観察した際の肘関節屈曲角度の影響

- ① ; 肩甲上腕関節拳上 90° かつ前額面に対して上腕長軸を投球方向へ約 30° 傾斜させた肢位において、肘関節屈曲約 90° とした肢位
- ② ; 肩甲上腕関節拳上 90° かつ前額面に対して上腕長軸を投球方向へ約 30° 傾斜させた肢位において、肘関節屈曲約 100° とした肢位

Late Cocking 期の前腕の後方への傾きに対する肘関節屈曲角度の影響を検討するためには、まず要因①について検討する必要がある。上腕長軸が矢状面と直行しているかを明らかにするために、前額面に対する上腕骨長軸の成す角度(図 16, ①)および水平面に対する上腕骨長軸の成す角度(図 16, ②)を算出した。算出した前額面に対する上腕骨長軸の成す角度、および水平面に対する上腕骨長軸の成す角度の平均値および標準偏差を表 4 に示した。

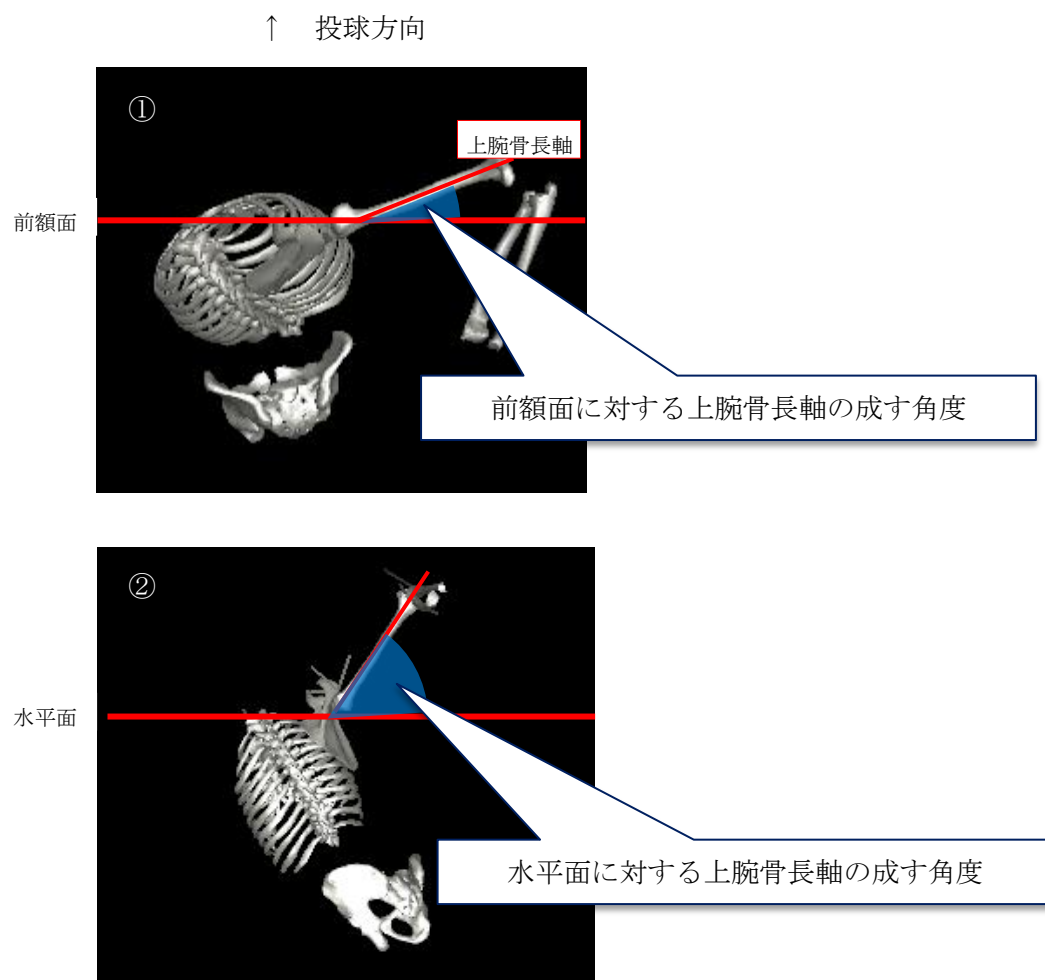


図 16. 前額面および水平面に対する上腕骨長軸の成す角度



表 4. 前額面および水平面に対する上腕骨長軸の角度

|                   | 角度(°)     |
|-------------------|-----------|
| 前額面に対する上腕骨長軸の成す角度 | 5.0±28.9  |
| 水平面に対する上腕長軸の成す角度  | 41.4±11.5 |

この結果より，Late Cocking 期には，上腕骨長軸は前額面に対して 5° 投球方向へ傾き，水平面に対して 41.4° 鉛直方向へ傾くことを示した．このことから，Late Cocking 期の上腕骨長軸は矢状面と垂直に交わらないことが明らかとなった．

次に，要因②についての検討を行うために，前腕長軸が矢状面から逸脱し，前腕長軸が同面に投影された際の傾きに反映されているかを検討した．前腕の後方への傾きに対する肘関節屈曲角度の影響は，上腕長軸が前額面に対して前方へ傾斜していること，および上腕腕長軸が水平面に対して鉛直方向へ傾斜していることから，肘関節屈曲 90°を超えることにより前腕の後方への傾きは増加し，肘関節屈曲 90°を下回ることにより前腕の後方への傾きは減少すると考えられる．本研究による測定データから算出した平均値をみると，上腕長軸は前額面に対して前方へ 5° 傾斜，かつ水平面に対して鉛直方向へ 41° 傾斜していた．この肢位において，Late Cocking 期の前腕長軸が矢状面と一致すると仮定した

際には、肩甲骨  $Z_{sc}$  に直行する軸に対する前腕の後方への傾きは約  $103^\circ$  であった(表 5)。また、実際に Late Cocking 期には、肘関節屈曲角度が  $98.8^\circ$  であったことが本研究のデータから示されている。そこで、上腕長軸が前額面に対して前方へ  $5^\circ$  傾斜、かつ水平面に対して鉛直方向へ  $41^\circ$  傾斜している肢位において、肘関節を約  $99^\circ$  屈曲させた時の前腕長軸を矢状面上に投影すると、前腕は肩甲骨  $Z_{sc}$  に直行する軸に対して  $136^\circ$  後方へ傾くことが示された(表 5, 図 17)。

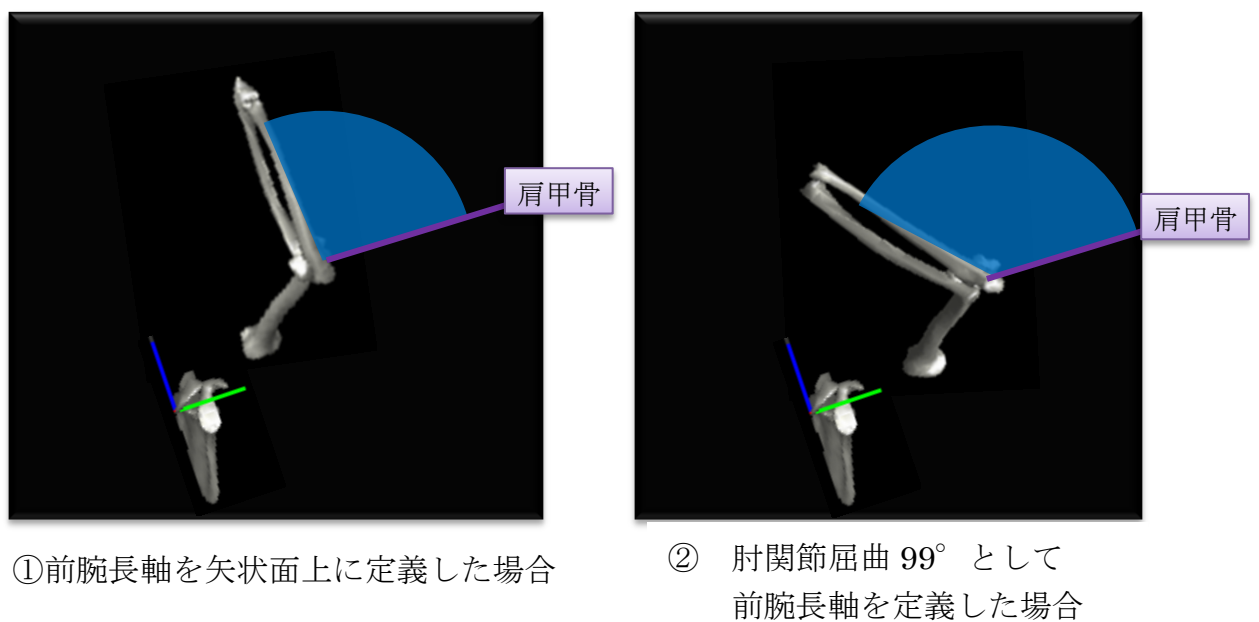


図 17. 前腕の後方への傾きに対する肘関節屈曲角度による影響

表 5. 前腕の後方への傾きに対する肘関節屈曲角度による影響

|                            | 肩甲骨 Zsc に直行する軸<br>に対する前腕の傾き(°) |
|----------------------------|--------------------------------|
| ①前腕長軸を矢状面上に定義した場合          | 103°                           |
| ②肘関節屈曲約 99° として前腕長軸を定義した場合 | 136°                           |

肘関節屈曲約 99° として仮定した時の前腕の傾き(136°)のうち、肩甲上腕関節外旋により 97.5° を占めることを考慮すると、上腕長軸の向きおよび肘関節屈曲角度により前腕の後方への傾きに対して約 40° の貢献をしていることを示した。このことから、上腕長軸が前額面に対して前方、かつ水平面に対して鉛直方向へ傾くことにより、肘関節屈曲角度を増すことで実際の肩甲上腕関節外旋角度を超過するほどの大きな前腕の後方への傾きに到達させることができることが示された。

#### 4-5. Late Cocking 期の 3 次元的な肩甲上腕関節の肢位

Late Cocking 期の前腕の後方への傾きが最大となった瞬間の 3 次元的な肩甲上腕関節角度は、肩甲上腕関節外旋角 97.5°、水平外転角 14.2°、拳上角 84.6° であった。従来の研究において、Late Cocking 期の上肢の肢位と近似する肩関節 90°側方拳上位にて測定された他動的な肩甲上腕関節外旋可動域は約 100～

110°であることが報告されている<sup>(4)(5)(6)</sup>。またアプリーヘンションテスト時の肩甲上腕関節外旋可動域が 100° に達することも報告されている<sup>(14)</sup>。このことから、前腕の後方への傾きが最大となった瞬間の肩甲上腕関節外旋角度は、一般的な関節可動域を超過するほど大きな角度ではない可能性が示された。

しかし、本研究において分析対象とした瞬間である前腕の後方への傾きが最大となった瞬間は、Late Cocking 期の肩甲上腕関節外旋角度が最大となる瞬間とは一致していなかった。これは、投球動作はムチ運動として力学的に説明されることが多く、遠位から近位にかけて角速度が増加する遠位遅延が生じるためである<sup>(19)</sup>。Late Cocking 期では、骨盤・胸郭から肩関節に至る運動連鎖によって肩甲上腕関節外旋が生じ、近位部に対して遠位部の運動が遅延することが知られている<sup>(9)</sup>。また、前腕の後方への傾きが最大となった瞬間は、肩甲上腕関節より近位に位置する胸郭、肩甲骨セグメントが矢状面上で後方への傾きを持たせることにより増大することが本研究から明らかとなり、これは矢内(2011)による報告<sup>(9)</sup>の Late Cocking 期には骨盤、胸郭、肩甲骨の順に回転運動を生じるという知見を支持する結果であった。これらのことから、Late Cocking 期には、前腕の後方への傾きが最大となった瞬間から遅延して肩甲上腕関節外旋角度が最大となることが示されている。

実際に、前腕の後方への傾きが最大となった瞬間の肩甲上腕関節外旋角度は

97.5°であるのに対し、Late Cocking 期の肩甲上腕関節外旋角度が最大となった瞬間には 110.7°であった(表 6, 図 18). また、前腕の後方への傾きが最大となった瞬間から、0.024 秒遅れて肩甲上腕関節外旋が最大となることが明らかになった(表 6, 図 18). これらのことから、前腕の後方への傾きが最大となる瞬間には、肩甲上腕関節は最大外旋まで到達していないことが示された。従来の研究にて測定されている他動的肩甲上腕関節外旋角度が約 100~110°<sup>(4)(5)(6)</sup>であることから、前腕の後方への傾きが最大となる瞬間の肩甲上腕関節外旋角度は、他動的肩甲上腕関節外旋角度の範囲内のものであり、肩甲上腕関節の極度な外旋を意味するものではないことが示唆された。

一方で、肩甲上腕関節外旋角度が最大となった瞬間には、従来の研究にて報告されている他動的肩甲上腕関節外旋角度とほぼ一致していた。このことから、投球動作では、他動的肩甲上腕関節外旋可動域の範囲を最大限活用していることが示唆されたが、実際に過度な肩甲上腕関節外旋に到達しているかは不明である。

表 6. 各相における肩甲上腕関節外旋角度とタイムラグ(°)

|                         | 外旋角        | タイムラグ         |
|-------------------------|------------|---------------|
| 前腕の後方への傾きが<br>最大となった瞬間  | 97.5±25.3  | —             |
| 肩甲上腕関節外旋角度が<br>最大となった瞬間 | 110.7±29.2 | 0.024±0.011 s |

\* =  $p < 0.05$

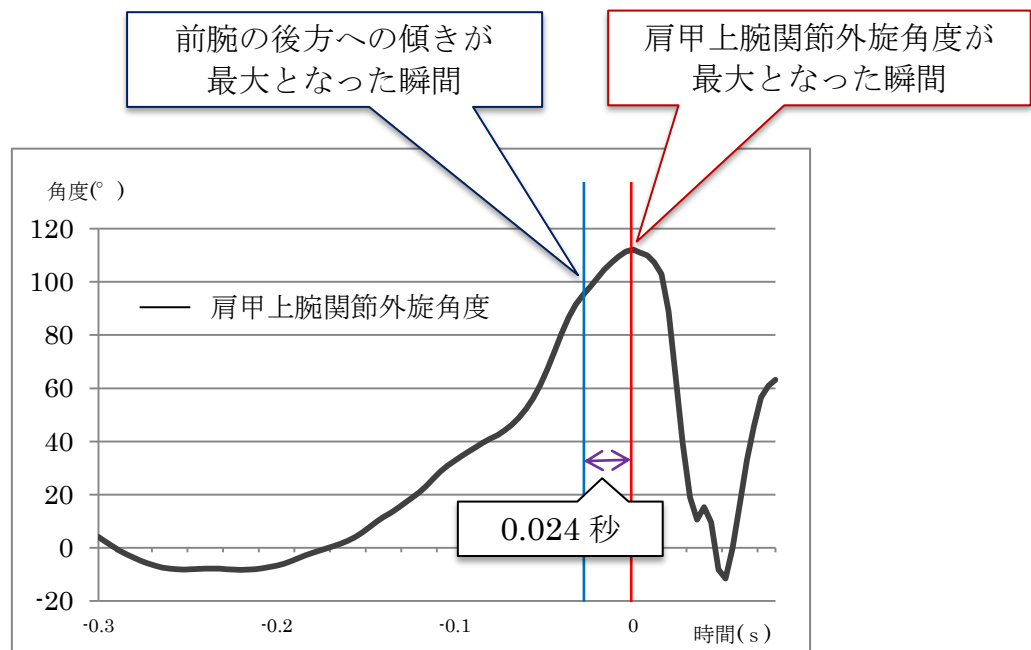


図 18. ある被験者における肩甲上腕関節外旋角度の継時的推移

## 第3章

### まとめ

本研究は、投球動作における Late Cocking 期に、大きな前腕の後方への傾きに到達し得る要因を検討し、「腕のしなり」の構成因子を明らかにすることを目的とした。Late Cocking 期の前腕の後方への傾きを構成する要因を明らかにするために、骨盤、胸郭、肩甲骨、前腕セグメントの矢状面上の運動を分析した。次に、実際に肩甲上腕関節において極度な外旋角度に到達しているのかを検討するために、3次元的な肩甲上腕関節角度を測定した。

本研究の結果から、Late Cocking 期の前腕の後方への傾きが最大となった瞬間には、前腕は鉛直軸に対して  $90.3^\circ$  後方へ傾斜していた。また、鉛直軸に対する前腕の後方への傾きの構成因子を詳細に分析すると、骨盤は鉛直軸に対し  $11.6^\circ$  前方へ傾斜し、胸郭、肩甲骨、前腕はそれぞれ隣接する近位セグメントに対して  $13.6^\circ$ 、 $20.0^\circ$ 、 $67.7^\circ$  後方へ傾斜していた。前腕の傾きが最大となった瞬間には、骨盤が前方へ傾斜し、胸郭、肩甲骨、前腕が後方へ傾斜することにより、前腕の後方への傾きを構成していることが明らかとなった。更に、前腕の後方への傾きは、胸郭による伸展方向への傾き、肩甲骨による後傾方向への傾き、肩甲上腕関節による外旋方向への傾きが貢献することにより増大している

ことが示唆された.

Late Cocking 期の前腕の傾きが最大となった瞬間における肩甲骨座標系における Zsc 軸に直行する面に対する前腕長軸の傾きは  $157.7^{\circ}$  であるにも拘らず, 3 次元的な肩甲上腕関節外旋角度は  $97.5^{\circ}$  であった. このことから, 投手を側方から観察した際の前腕の後方への傾きの大きさほど, 実際の肩甲上腕関節外旋は大きな角度に到達していないことが示された. また, 投手を側方から観察した際の前腕の傾きは, 上腕長軸を前額面に対して前方へ, 更に水平面に対して鉛直方向へ傾斜させることで, 肘関節屈曲角度を増すことにより増大しうることが示された.

これらの結果から, Late Cocking 期の前腕の後方への傾きとして視覚的に捉えられる「腕のしなり」は, 胸郭, 肩甲骨, 前腕の後方への傾き, および肘関節屈曲の貢献により構成されており, その瞬間には極度な肩甲上腕関節外旋は生じていないことが示された.



【参考文献】

- (1) Meister K: Injuries to the Shoulder in the Throwing Athlete Part Two: Evaluation/Treatment. The American Journal of Sports Medicine. 28(4), 2000, p.587-601.
- (2) 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. The American Journal of Sports Medicine, 30(1), 2002, p.20-27.
- (3) Borsa PA, Wilk KE, Jacobson JA, Scibek JS, Dover GC, Reinold MM, Andrews JR: Correlation of Range of Motion and Glenohumeral Translation in Professional Baseball Pitchers. The American Journal of Sports Medicine, 33(9), 2005, p.1392-1399.
- (4) Sethi PM, Tibone JE, Lee TQ: Quantitative Assessment of Glenohumeral Translation in Baseball Players. A Comparison of Pitchers Versus Nonpitching Athletes. The American Journal of Sports Medicine. 32(7), 2004, p.1711-1714.
- (5) Downar JM, Sauers EL: Clinical Measures of Shoulder Mobility in the

- Professional Baseball Player. *Journal of Athletic Training*. 40(1), 2005, p.23-29.
- (6) Anloague PA, Spees V, Smith J, Herbenick MA, Rubino J: Glenohumeral Range of Motion and Lower Extremity Flexibility in Collegiate Level Baseball Players. *Sports Health*. 4(1), 2012, p.25-30.
- (7) Sabic MB, Torry MR, Lawton RL, Hawkins RJ: Valgus torque in youth baseball pitchers: a biomechanical study. A Biomechanics study. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. 10, 2004, p.349-355.
- (8) 矢内利政: バイオメカニクスからみた肩関節インピンジメント症候群: 臨床スポーツ医学. 30 (5), 2013, p.417-426.
- (9) 矢内利政: 投球動作における体幹(骨盤・胸郭・肩甲骨)の3次元ムチ運動: 体育の科学, 61(7), 2011, p.484-490.
- (10) 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. *Journal of Sports Science and Medicine*. 7, 2008, p.47-53.
- (11) Fleisig GS, Barrentine SW, Zheng N, Escamilla RF, Andrews JR: Kinematic and kinetic comparison of baseball pitching among

- various levels of development. *Journal of Biomechanics*. 32, 1999, p.402-408.
- (12) Feltner ME: Three-dimensional interactions in a two-segment kinetic chain. Part II: Application to the throwing arm in baseball pitching. *Journal of Sports Biomechanics*.2, 1986, p.420-450.
- (13) K Miyashita, H Kobayashi, S Koshida, Y Urabe: Glenohumeral, scapular, and thoracic angles at maximum shoulder external rotation in throwing. *The American Journal of Sports Medicine*. 38(2), 2010, p.363-368.
- (14) 矢内利政: 三次元的にみる肩甲骨運動とインピンジメント障害のリスク: 整形外科リハビリテーション学会誌, 10, 2007
- (15) Mihata T, Lee YS, McGarry MH, Abe M, Lee TQ: Excessive humeral external rotation results in increased shoulder laxity. *The American Journal of Sports Medicine*. 32(5), 2004, p.1278-1285.
- (16) 三森甲字, 野本栄, 中川照彦, 古屋光太郎, 石田明允: 肩外旋時の前方関節包にかかる引っ張り張力の測定. *肩関節*, 20(1), 1996, p.81-86.
- (17) Jobe CM: Posterior superior glenoid impingement: expanded spectrum. *Arthroscopy*. 11(5), 1995, p.530-536.

- (18) 信原克哉: 肩 その機能と臨床 第3版: 医学書院, 2001, p.372-407.
- (19) Kreighbaum E, Barthels KM: A qualitative approach for studying human movement, Biomechanics. 4th ed. Allyn & Bacon, 1990, p.335-354.

## 謝辞

本研究は、指導教員である矢内利政先生のご指導の下、行われました。スポーツバイオメカニクス研究に関する知識の乏しい私に対して、研究をより発展させる的確なアドバイス、ご指導をしていただき、とても感謝しております。また、理学療法士である私に対して、バイオメカニクスの研究と臨床への応用に関するご意見も伺うことができ、今後の理学療法士としての臨床の場へ生かすことのできる大変貴重な知識、経験を得ることが出来ました。矢内利政先生に、心より感謝申し上げます。

川上泰雄先生、金岡恒治先生には、快く副査を引き受けていただきました。川上泰雄先生には、バイオメカニクス研究室内でのミーティング等で、研究を発展させるためのご意見をいただきました。金岡恒治先生には、本研究に対して臨床的な視点から助言をいただき、今後臨床で生かすための意見をお伺いすることができました。川上泰雄先生、金岡恒治先生に、心より感謝申し上げます。

また、本学博士課程の上坂学さんには、本論文を完成させるためにあらゆるサポートをしていただきました。本研究をより良いものにするために、多くの時間を割いて相談に乗っていただき、たくさんのご指導、アドバイスをいただくことができました。本研究は、上坂さんの協力無しには完成させること難し

かったと感じております。心より、感謝申し上げます。

バイオメカニクス研究室の皆様には、データミーティング、夏ゼミ等でご意見、アドバイスを頂き、その他たくさんの助言を頂きました。また、たくさんのバイオメカニクスの知識を得ることが出来ました。心より感謝申し上げます。

大学院同期入学の小野寺亘くん、木村康宏くん、谷茂樹くん、菱川啓太くんは、各々の研究に限らないたくさんのお話をし、楽しい大学院生活を送るために欠かせない存在であったと感じております。楽しいときは共に笑い、辛いときは共に辛い思いをしてきました。そのため、同期の絆はとても強いものであると思います。良い仲間に恵まれたと感じています。

実験を行うにあたり、協力していただいた早稲田大学硬式野球部の皆様には、心より感謝申し上げます。皆様の今後のご活躍を多いに期待すると共に、私自身も今後さらに精進し、皆様のようなスポーツ選手に何かしらの貢献ができるよう努力していきたいと思います。

最後に、安泰な社会人生活を送っていたにもかかわらず、突然の大学院進学に対して快く承諾し、応援してくれて、温かく見守ってくれた両親に感謝いたします。本当にありがとうございました。