

# 博士学位論文

題 目

成長期における投球肘障害の予防に関する研究

担当指導教員名 小柳磨毅 印

申請年月日 平成30年1月30日

申請者専攻名 医療福祉工学専攻

学 生 番 号 DL17A003

氏 名 田中正栄 印

大阪電気通信大学大学院

# 成長期における投球肘障害の予防に関する研究

## 目次

第1章	序論	
1.1	社会的背景	1
1.2	成長期における投球障害の発生要因と実態	2
1.3	疾病予防の階層と投球肘障害の対策	5
1.4	新潟県における野球肘検診の成果と課題	6
1.5	論文の目的	10
1.6	論文の構成	10
第2章	肘関節の解剖と機能	
2.1	はじめに	14
2.2	肘関節の構造	14
2.3	肘関節の靭帯と強度	16
2.4	肘関節の運動学	19
2.5	肘関節の骨化過程	19
2.6	靭帯付着部の構造	20
2.7	肘内側筋群の機能	21
第3章	成長期における投球肘障害	
3.1	はじめに	24
3.2	投球動作の位相分類	24
3.3	成長期における投球肘障害の概念	25
3.4	成長期における投球肘障害の疫学	27
3.5	成長期における投球肘障害の発生機序	28
3.6	肘外反ストレスに影響を与える投球動作	29
3.7	臨床診断	30
3.8	画像診断	31
3.9	治療とリハビリテーション	32
第4章	投球動作の計測方法	
4.1	はじめに	37
4.2	投球動作の計測方法	37
4.3	対象者と計測条件	40

4.4	計測プロトコル	40
4.5	投球動作の運動学・動力的解析	40
4.5.1	体節座標系の設定	40
4.5.2	関節角度の算出	43
4.5.3	関節間力と関節モーメントの算出	44
第5章	成長期野球選手の3次元投球動作解析による動力学・運動学的検討	
5.1	はじめに	50
5.2	対象	51
5.3	方法	52
5.3.1	投球動作の3次元測定	52
5.3.2	投球動作の分析	53
5.3.3	統計学的データ分析	56
5.4	結果	57
5.4.1	肘関節外反モーメントの3群間比較	57
5.4.2	肘関節外反モーメントの指標と年齢との相関	57
5.4.3	ストライドと骨盤・胸部・体幹回旋角度について	59
5.4.4	骨盤・胸部の推進速度と回旋角速度及び最高値の出現時期について	60
5.4.5	標準化肘外反モーメント球速比と運動学的評価項目との重回帰分析について	62
5.5	考察	62
5.6	結語	64
第6章	予防用肘装具の開発と生体力学的効果の検証	
6.1	はじめに	67
6.2	予防用肘装具の構造	67
6.2.1	肘外反の制動機構	67
6.2.2	装具の可動性と軽量化	68
6.3	肘外反制動効果の検証実験	69
6.3.1	外反制動力の計測試験機	69
6.3.2	投球肘モデルの作成	69
6.3.3	肘外反制動試験の計測条件	70
6.3.4	統計学的データ分析	71
6.4	結果	71
6.4.1	3条件下でのヒステリシス曲線	71
6.4.2	肘外反制動力の比較	72

6.5	考察	73
6.6	結語	73
第7章 予防用肘装具による投球時肘外反ストレス低減効果の検証		
7.1	はじめに	75
7.2	対象	75
7.3	方法	76
7.3.1	投球動作の3次元動作測定	76
7.3.2	投球動作の分析	76
7.3.3	予防用肘装具の効果判定	77
7.4	結果	77
7.4.1	球速及び肘・肩関節角度の変化	77
7.4.2	肘・肩関節モーメントの変化	78
7.4.3	投球時の装具装着感と投球前後の理学所見の変化	79
7.5	考察	79
7.6	結語	80
第8章 総括		
8.1	総括	82
8.2	今後の展望	84
謝辞		86

## 第1章 序論

### 1.1 社会的背景

野球は長く国民的スポーツのひとつとして愛されてきた。その一方で投球障害により野球を断念する子どもたちも多く存在し、国内では1995年に日本臨床スポーツ医学会が「青少年野球障害に対する提言<sup>1)</sup>」(表1.1)を発表するなどして、子どもたちの投球障害予防の啓発に努めてきた。1981年に徳島県で始められた野球肘検診は、2000年代に入り全国各地に広がりその有効性が示されてきた<sup>2)</sup>。また、2012年には全日本軟式野球連盟が投球制限を含めた投手の規則改正を行い、更に全日本野球協会が日本整形外科学会、運動器の10年・日本協会、日本理学療法士協会とともに野球障害の実態調査や講習会などを通じた活動が行われている<sup>3)</sup>。子どもの人口が減少していく現状においては、指導者、保護者、各野球連盟や医療関係者が連携して選手の育成、障害予防に努める必要がある。

表 1.1 青少年の野球障害に対する提言<sup>1)</sup> (日本臨床スポーツ医学会 1995)

---

スポーツを楽しむことは青少年の健全な心身の育成に必要である。野球はわが国における最もポピュラーなスポーツの一つであるが、骨や関節が成長しつつある年代における不適切な練習が重大な障害を引き起こす事もあるので、その防止のために以下の提言を行う。

- 1) 野球肘の発生は11, 12歳がピークである。従って、野球指導者はとくにこの年頃の選手の肘の痛みと動きの制限には注意を払うこと。野球肩の発生は15, 16歳がピークであり、肩の痛みと投球フォームの変化に注意を払うこと。
  - 2) 野球肘, 野球肩の発生頻度は、投手と捕手に圧倒的に高い。従って、各チームには、投手と捕手をそれぞれ2名以上育成しておくのが望ましい。
  - 3) 練習日数と時間については、小学生では、週3日以内、1日2時間をこえないこと、中学生・高校生においては、週1日以上以上の休養日をとること。個々の選手の成長、体力と技術に応じた練習量と内容が望ましい。
  - 4) 全力投球数は、小学生では1日50球以内、試合を含めて週200球をこえないこと。中学生では1日70球以内、週350球をこえないこと。高校生では1日100球以内、週500球をこえないこと。なお、1日2試合の登板は禁止すべきである。
  - 5) 練習前後には十分なウォームアップとクールダウンを行うこと。
  - 6) シーズンオフを設け、野球以外のスポーツを楽しむ機会を与えることが望ましい。
  - 7) 野球における肘・肩の障害は、将来重度の後遺症を引き起こす可能性があるため、その防止のためには、指導者との密な連携のもとでの専門医による定期的検診が望ましい。
-

## 1.2 成長期における投球障害の発生要因と実態

成長期野球選手の投球障害は、未成熟な骨形態、未発達な筋力や運動発達学的に未熟な投球動作の繰り返し、コンディション不良などの要因が複合的に影響して発生することが多い<sup>4)</sup>。米国の成長期野球選手の投球障害の実態調査では、肘関節の疼痛既往が全体の約25%程度という高い頻度であることが報告されている<sup>5)</sup>。成長期野球選手が投球肘障害を引き起こす危険因子として、1シーズンの投球数や投球イニングによるオーバーユース、変化球（カーブ、スライダー）、高身長や体重増、速い球速などが報告されている<sup>5-9)</sup>。これらの調査結果から、米国では成長期野球選手に対する投球障害予防のための投球数ガイドラインを作成し、高校生年代までの規則として採用されている<sup>10)</sup>。

一方、我が国では国内での大規模調査が、一般財団法人全日本野球協会、公益社団法人日本整形外科学会、一般財団法人運動器の10年・日本協会によって平成26年から3年間実施されている。この調査は、小学生（10,228人）、中学生（11,134人）の野球選手を対象に行われたアンケート調査である<sup>11-13)</sup>。

小学生の痛みを経験した部位では、肘関節24.8%、肩関節19.3%、足・足関節18.7%の順に多く<sup>3)</sup>、ポジション別の肘痛を経験した割合では、投手が36.1%、捕手が27.4%と全体の24.8%より高い割合であった<sup>11)</sup>（図1.1）。肘痛を経験した選手の疼痛部位は、内側68.6%、外側18.0%、後側16.1%、前側6.1%で肘内側部痛の割合が最も高く（図1.2）、平成26年、27年の経年比較でも、同様な結果であった<sup>12)</sup>（図1.3）。中学生を対象とした肘痛経験者の疼痛部位においても、内側65.6%、後側28.4%、外側19.5%、前側16.1%と肘内側部痛の割合が高い報告であった<sup>13)</sup>（図1.4）。

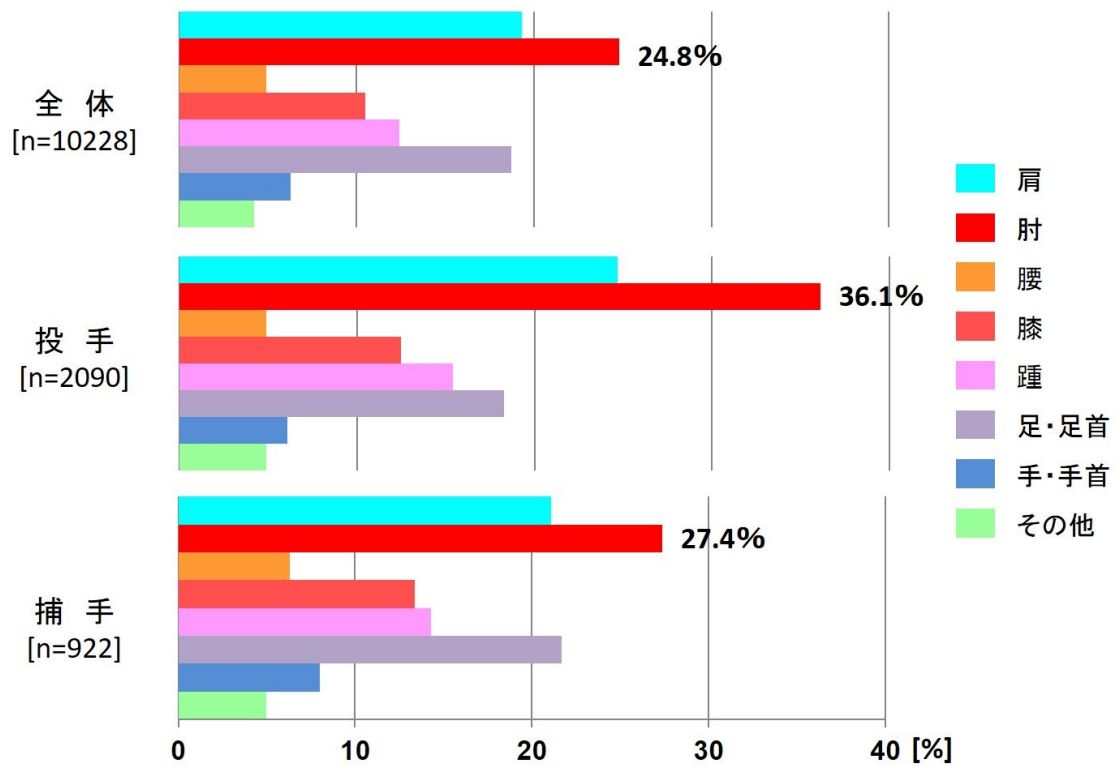


図 1.1 小学生を対象とした痛みの部位（文献 11 より引用，一部改変）

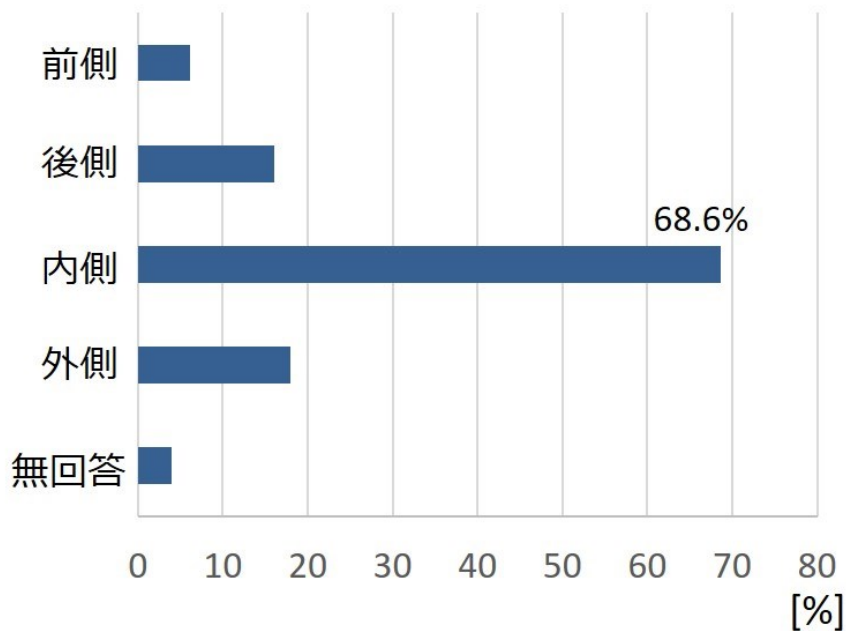


図 1.2 小学生を対象とした肘痛部位（文献 12 より引用）

肘痛経験者（1,639 人）からの回答（複数回答）の割合

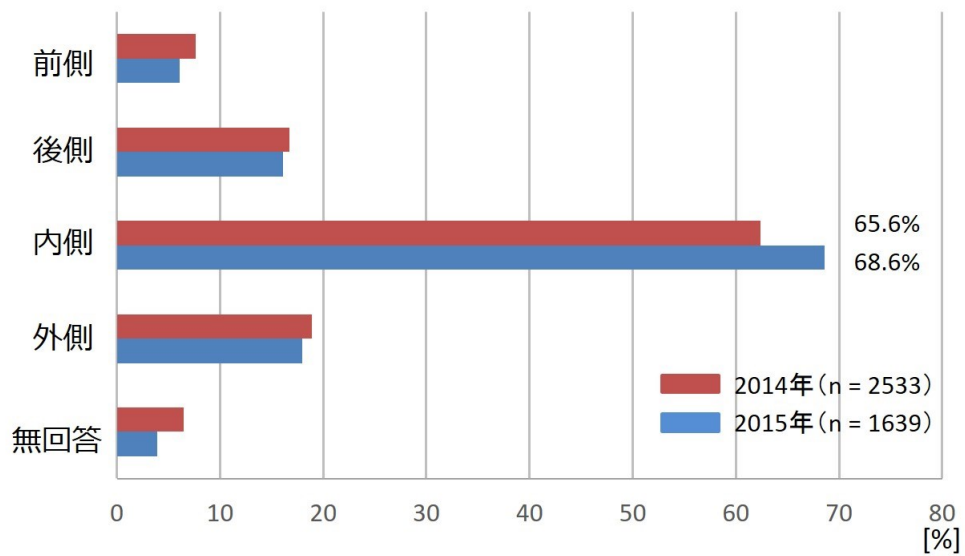


図 1.3 小学生を対象とした肘痛部位の経年比較（文献 12 より引用，一部改変）

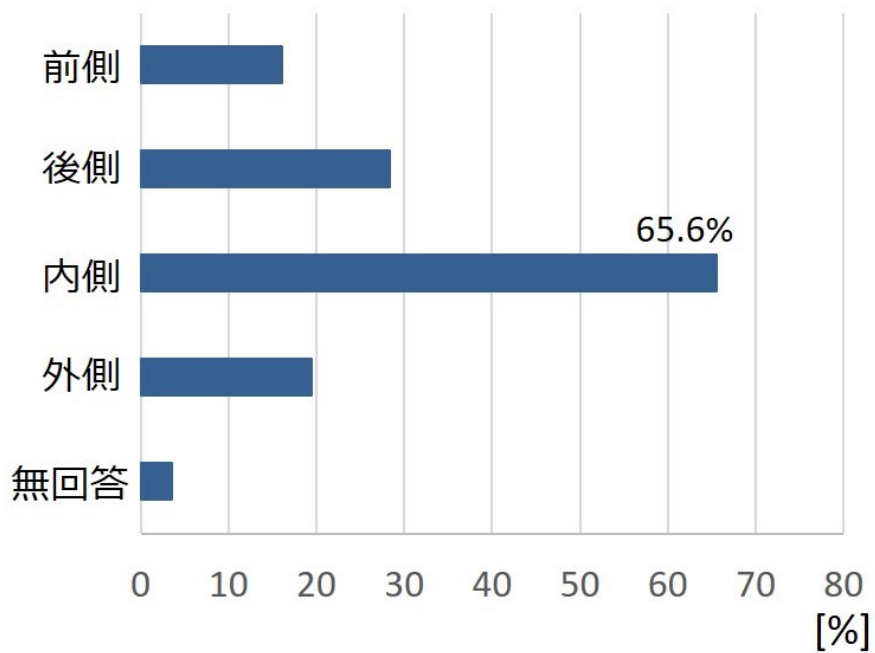


図 1.4 中学生を対象とした肘痛部位（文献 13 より引用）

肘痛経験者（2,282 人）からの回答（複数回答）の割合



### 1.3 疾病予防の階層と投球肘障害の対策

予防医学における疾病予防は、一次予防 (primary prevention)、二次予防 (secondary prevention)、三次予防 (tertiary prevention) に区分される。一次予防は身体的疾病・精神的情緒的障害・外傷などの健康障害の発生防止と健康増進である。二次予防は健康障害の早期発見と早期治療による障害の進展予防と生体機能の最大限の保全である。三次予防はすでに罹患してしまった者 (患者) が対象で、適切な治療と管理指導による疾病悪化防止と合併症／続発症の発生防止であり、究極的には死亡防止である。また、障害による生体機能の損失と生活／生命の質 quality of life (QOL) の低下を最小限に防止し、社会復帰を図るものとされている<sup>14)</sup>。

成長期における投球肘障害の予防をこの視点から見ると、一次予防は投球肘障害の発生防止、二次予防は早期発見と早期治療による障害の進展防止、三次予防は適切な治療とリハビリテーションによる早期回復と再発防止、肘障害による機能低下を最小限に防止し、競技への早期復帰を図ることが相当する (図 1.5)。

投球肘障害の予防対策として、一次予防では投球数の制限や投球フォーム指導、コンディショニング指導が考えられる。二次予防では上腕骨小頭離断性骨軟骨炎 (osteochondritis dissecans of capitulum humerus ; 以下、肘 OCD) に対する超音波測定装置 (以下、エコー) による野球肘検診が有効と考えられる。肘 OCD は無症候のまま障害が進展し、重篤な関節障害をもたらすが、早期発見により保存治療で競技復帰が可能になるため、近年のエコーの小型化や高画質化に伴い、エコー検査による野球肘検診が全国各地で行われている。三次予防では再発予防を念頭にした運動療法や装具療法が有効と考えられる。

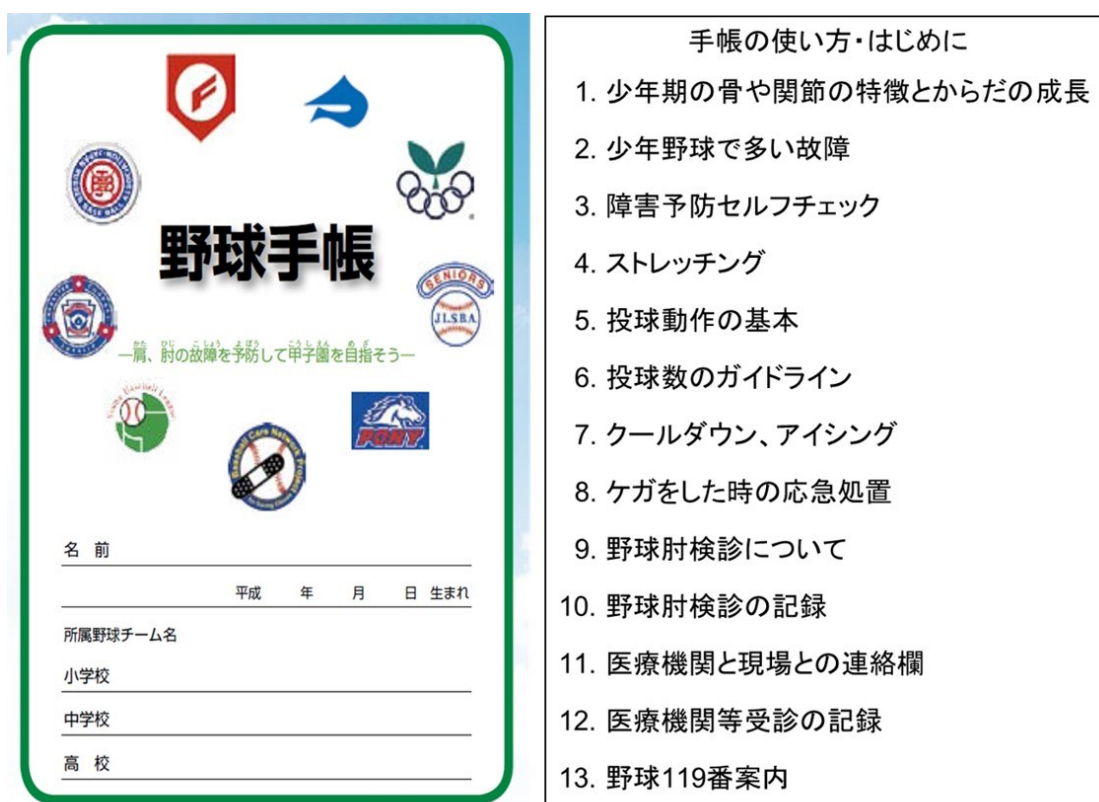


図 1.5 投球肘障害の予防概念

#### 1.4 新潟県における野球肘検診の成果と課題<sup>15~19)</sup>

新潟県では 2006 年から肘 OCD の早期発見，早期治療を目的に野球肘検診を開始した。検診内容は，医師によるエコー検査と理学療法士による肘関節機能検査である。この検診は，2006 年の 1 市から始まり，これまでに 12 市で実施した。2013 年度には，最大 8 市，1,762 人の検診受診者数に拡大した（表 1.2）。その内の 7 市は，年 1 回の検診を 4 年以上に渡って継続的に実施しており，定着化している地域も増加傾向にある。2007 年度から 2016 年度の 10 年間で，延べ 11,848 人の選手が検診を受け，170 人（1.43%）の肘 OCD 疑いの選手を発見し，医療機関への受診勧告を行った。また，2012 年には，更に野球肘検診の受診率と継続率を向上させるために野球手帳（図 1.6）を作成し，県内の小学 5 年生から中学 2 年生までの野球選手全員に配布した（以後，新 5 年生を対象に配布）。しかし，検診を行う医療者（医師・理学療法士）全員がボランティアであり，今後の検診地域の拡大と継続的な検診の実施については課題も残されている。検診を実施した市町村の増加に伴い，検診の受診者数と肘 OCD 疑い者の発見数は増加した（表 1.3）。継続的な肘検診の実施は，無症候性の肘 OCD の早期発見，早期治療に繋がっている。その効果は，2008～

2010年の3年間は肘OCDに対する手術件数が平均約40件であったのに対し、2011～2013年の3年間では平均20件に減少したことに表れている（表1.4）。しかしながら、肘OCDの発見率は2%前後で推移しており、検診のみでは一次予防としての効果は十分とは言えないことも明らかとなった。



a. 表紙

b. 内容

図 1.6 野球手帳

2011年に野球障害ケア新潟ネットワークの整形外科医師と理学療法士が共同で作成し、新潟県青少年野球団体協議会により発刊された野球手帳。

表 1.2 新潟県における野球肘検診を実施した市町村の推移

実施年度	実施市町村
2006	1
2007	1
2008	1
2009	1
2010	3
2011	4
2012	6
2013	8
2014	7
2015	8
2016	5

表 1.3 新潟県における野球肘検診の受診者数・肘 OCD 疑い者数・発見率

年 度	検診受診者数 (人)	肘 OCD 疑い者数 (人)	発見率 (%)
2007	618	6	0.97
2008	473	5	1.06
2009	585	6	1.03
2010	957	12	1.25
2011	829	19	2.29
2012	1632	37	2.27
2013	1762	27	1.53
2014	1540	22	1.43
2015	1756	18	1.03
2016	1696	18	1.06
計	11848	170	1.43

表 1.4 新潟県における野球肘検診と肘 OCD 手術件数の推移

年度	検診受診者数 (人)	肘 OCD 疑い者数 (人)	発見率 (%)	手術件数
2008	473	5	1.06	44
2009	585	6	1.03	36
2010	957	12	1.25	41
2011	829	19	2.29	26
2012	1632	37	2.27	15
2013	1762	27	1.53	21

## 1.5 論文の目的

成長期の投球肘障害予防における課題として、成長期では3次元投球動作解析による研究が少なく、投球フォームが肘関節に及ぼす生体力学的ストレスを増加させる要因が明らかではないこと。検診は二次予防であり、発生件数を減少させる一次予防の効果は期待できないこと。三次予防の効果が期待される装具は、軽量で機能的な製品が存在せず、肘関節への力学的負荷に対する制動効果が検証されていないことが挙げられる。

よって本論文の目的は、(1) 光学式モーションキャプチャー・システムによる3次元動作解析データから、小・中・高校生（成長期）野球選手の投球動作を運動学的に評価し、その特徴と肘関節にかかる力学的負荷の関係を明らかにすること、(2) 投球肘障害を予防する装具（以下、予防用肘装具）と上肢モデルを開発し、その基礎的・臨床的效果を検証することとした。そして、これらの結果から、投球肘障害の発生要因となる投球動作のメカニズムと、肘装具の根拠となるデータを明確にすることで、投球肘障害の予防やリハビリテーションにおける再発予防に寄与することである。

## 1.6 論文の構成

本論文の第1章では、本研究の背景および目的と意義について述べた。第2章では基本的な理解を深めるために肘関節の解剖と機能について述べる。項目として、肘関節の構造、肘関節の靭帯と強度、肘関節の運動学、肘関節の骨化過程と靭帯付着部の構造、肘関節内側筋群の機能について解説する。第3章では成長期における投球肘障害の概念、疫学、発生機序、肘外反ストレスに影響を与える投球動作、臨床診断、画像診断、治療とリハビリテーションについて解説する。第4章では、投球動作の計測方法として、計測条件、計測プロトコル、運動学・動力学的解析について述べる。投球上肢の肘関節に加わる関節間力と関節モーメントはニュートン・オイラー法を用いて、手関節、肘関節、肩関節の順に遠位から近位へと逆動力学的に推定したことを説明する。第5章では、運動学的評価として、

体幹（骨盤・胸部）の角度，投球上肢，体幹の移動速度と関節角速度，下肢のストライド長とストライド幅，各体節の移動速度や関節角速度の最高値が出現するタイミングについて検証する．また，投球時に肘関節にかかるメカニカルストレスを関節モーメントで評価し，年代別の比較から動力的な違いについて検証する．運動学的評価項目と肘外反モーメントとの関連を明らかにするため多変量解析により検証する．第6章では，開発した予防用肘装具の制動効果の検証実験について述べる．第7章では，実際の投球時における予防用肘装具による肘外反負荷の低減効果を，動作解析の手法で行った検証について述べる．第8章では，総括および今後の課題と展望について述べる．

## 参考文献

- 1) 日本臨床スポーツ医学会学術委員会整形外科部会: 青少年の野球障害に対する提言.  
日本臨床スポーツ医学会誌 13, suppl.: 241, 2005
- 2) 松浦哲也, 柏口新二 他: 少年野球肘検診－障害の早期発見・早期治療と予防を目指して－. 関節外科 27: 1089-1095, 2008
- 3) 帖佐悦男: 野球肘検診の普及－産官学連携の役割とその取り組み－. 臨床スポーツ医学 32: 608-612, 2015
- 4) 田中正栄, 西野勝敏 他: 三次元投球動作解析から見た成長期野球選手の投球動作の特徴についての検討. スポーツ傷害 18: 23-26, 2013
- 5) Lyman S, Fleisig GS et al: Longitudinal study of elbow and shoulder pain in youth baseball pitchers. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 33: 1803-1810, 2001
- 6) Lyman S, Fleisig GS et al: Effect of pitch type, pitch count, and pitching mechanics on risk of elbow and shoulder pain in youth baseball pitchers. *Am J Sports Med.* 30: 463-468, 2002
- 7) Olsen II SJ, Fleisig GS et al: Risk factors for shoulder and elbow injuries in adolescent baseball pitchers. *Am J Sports Med.* 34: 905-912, 2006
- 8) Dun S, Loftice J et al: A biomechanical comparison of youth baseball pitches. Is the curveball potentially harmful? *Am J Sports Med.* 41: 686-692, 2008
- 9) Fleisig GS, Andrews JR et al: Risk of serious injury for young baseball pitchers. A 10-year prospective study. *Am J Sports Med.* 39: 253-257, 2011
- 10) Kerut EK, Kerut DG et al: Prevention of arm injury in youth baseball pitchers. *J La State Med Soc* 160: 95-98, 2008
- 11) 一般財団法人全日本野球協会, 公益社団法人日本整形外科学会, 一般財団法人運動器の10年・日本協会: 平成26年度少年野球(軟式・硬式)実態調査 調査報告. 2015
- 12) 一般財団法人全日本野球協会, 公益社団法人日本整形外科学会, 一般財団法人運動器



- の10年・日本協会:平成27年度少年野球(軟式・硬式)実態調査 調査報告.2016
- 13) 一般財団法人全日本野球協会,公益社団法人日本整形外科学会,一般財団法人運動器  
の10年・日本協会:平成28年度中学野球(軟式・硬式)実態調査 報告書.2017
- 14) 大野良之:生活習慣病の概要と予防・健康づくり「健康日本21」.大野良之,柳川 洋  
(編),生活習慣病予防マニュアル,改訂4版,南山堂:4,2005
- 15) 田中正栄,山本智章 他:新潟における野球肘検診の取り組みと課題.第50回日本理  
学療法学術大会(東京):P3-C-0823,2015
- 16) 遠藤一樹,山本智章 他:新潟県における野球肘検診の報告ー10年の活動と,今後の展  
望ー.第26回新潟県理学療法士学会学会誌:44,2017
- 17) 山本智章,戸内英雄 他:子どもに笑顔をー野球手帳を用いた成長期野球選手の予防.  
整体会誌33:12-18,2013
- 18) 山本智章,菊池達哉 他:新潟県での取り組みー新潟県青少年野球団体協議会と野球  
手帳の活用ー.関節外科3:1174-1179,2014
- 19) 岡邨直人,関根裕之 他:野球手帳の利用状況と今後の展望.理学療法新潟 18: 35-39,  
2015

## 第2章 肘関節の解剖と機能

### 2.1 はじめに

本論文で展開する議論の基礎知識として、本章では肘関節の解剖（構造）と機能について解説する。

### 2.2 肘関節の構造

肘関節は、上腕骨、橈骨、尺骨で形成され、腕尺関節、腕橈関節、近位腕尺関節の3関節からなる複合関節である<sup>1-3)</sup> (図 2.1)。

上腕骨の内側には、内側上顆として骨隆起が確認でき、尺側（内側）側副靭帯、前腕屈筋・回内筋群が付着する。内側上顆の後下方には尺骨神経が走行する尺骨神経溝がある。外側には、外側上顆として骨隆起が確認でき、外側側副靭帯、前腕伸筋・回外筋群が付着する。

上腕骨遠位部の前後面は、肘関節の屈伸運動を円滑にするために前外側には橈骨窩、前中央には鈎突窩、後面には肘頭窩がある。腕尺関節では、上腕骨遠位部の30～45°前方傾斜と尺骨の30～45°後方傾斜が屈曲運動を有利にしている。腕橈関節は、上腕骨小頭と橈骨頭で形成されている。近位橈尺関節は、橈骨頭と尺骨の橈骨切痕で形成され、前腕の回内・回外運動に関与している<sup>4,5)</sup>。



図 2.1 肘関節の構造 (文献 2 より引用, 一部改変)

### 2.3 肘関節の靭帯と強度

肘関節の内側支持機構は尺側側副靭帯 (ulnar collateral ligament ; UCL) であり, 上腕骨内側上顆, 尺骨鈎状突起, 肘頭を連結する靭帯である. 付着部である上腕骨内側上顆には, 前腕屈筋群 (円回内筋, 浅指屈筋, 橈側手根屈筋, 尺側手根屈筋, 長掌筋) が共通頭となり付着している<sup>6)</sup> (図 2.2). UCL は, その走行から索状 (cord-like) 線維である前斜走靭帯 (anterior oblique ligament ; AOL), 扁平上 (fan-like) 線維である後斜走靭帯 (posterior oblique ligament ; POL), 横走靭帯 (transverse ligament ; TL) で構成されている (図 2.3). AOL は伸展位で, POL は屈曲位で緊張するとされている<sup>7,8)</sup>.

屍体肘関節に外反ストレスを負荷した実験結果では, UCL を 1mm 伸張するのに約 2Nm, 2mm 伸張するのに約 6Nm 必要とされている<sup>9)</sup>. また, UCL の破断強度は, 屍体肘関節屈曲 70° で外反トルクを負荷した結果, 34.29±6.9Nm で破断するとしている<sup>10)</sup>.

一方, 外側支持機構は外側側副靭帯 (lateral collateral ligament ; LCL) であり, 橈側側副靭帯 (radial collateral ligament ; RCL), 輪状靭帯 (annular ligament ; AL), 外側尺側側副靭帯 (lateral ulnar collateral ligament ; LUCL), 副靭帯 (accessory collateral ligament ; ACL) で構成されている (図 2.4). RCL は, 上腕骨外側上顆, 輪状靭帯, 回外筋の一部に付着する. LUCL は, 上腕骨外側上顆, 回外筋結節に付着し, 腕尺関節の安定性に寄与する. AL は, 尺骨橈骨窩の前縁から後縁に向かって橈骨頭を包み込むように付着する. ACL は, AL と回外筋結節に付着し, AL の安定性に寄与する<sup>8)</sup>.

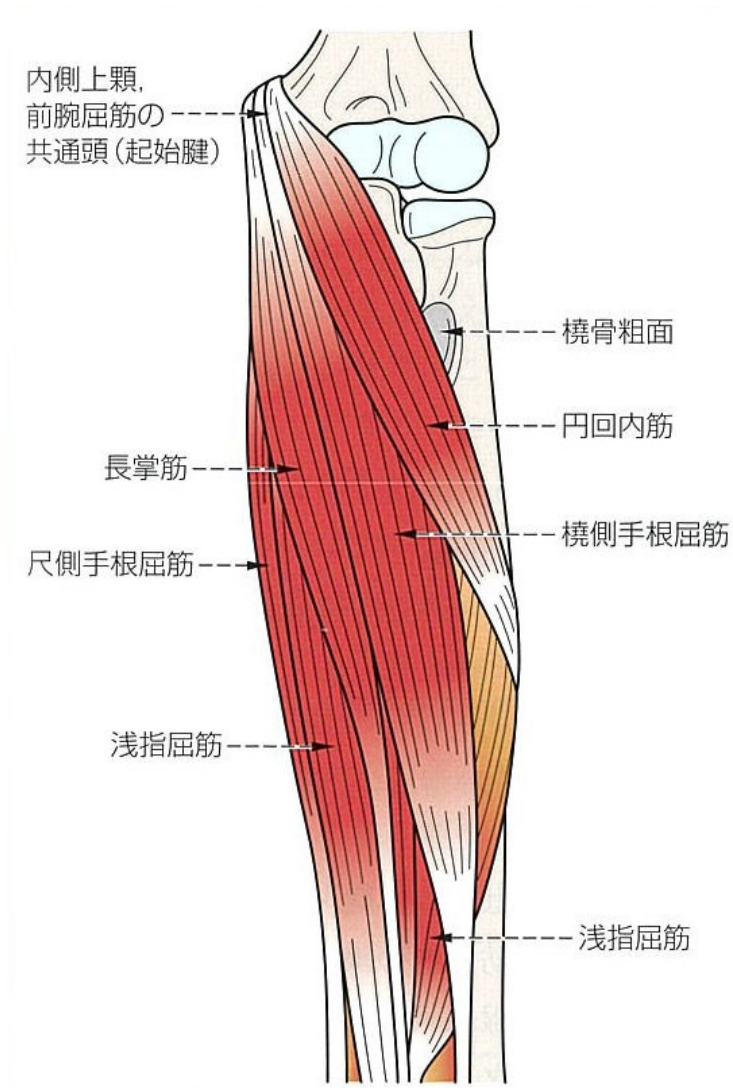


図 2.2 前腕屈筋群 (文献 6 より引用)

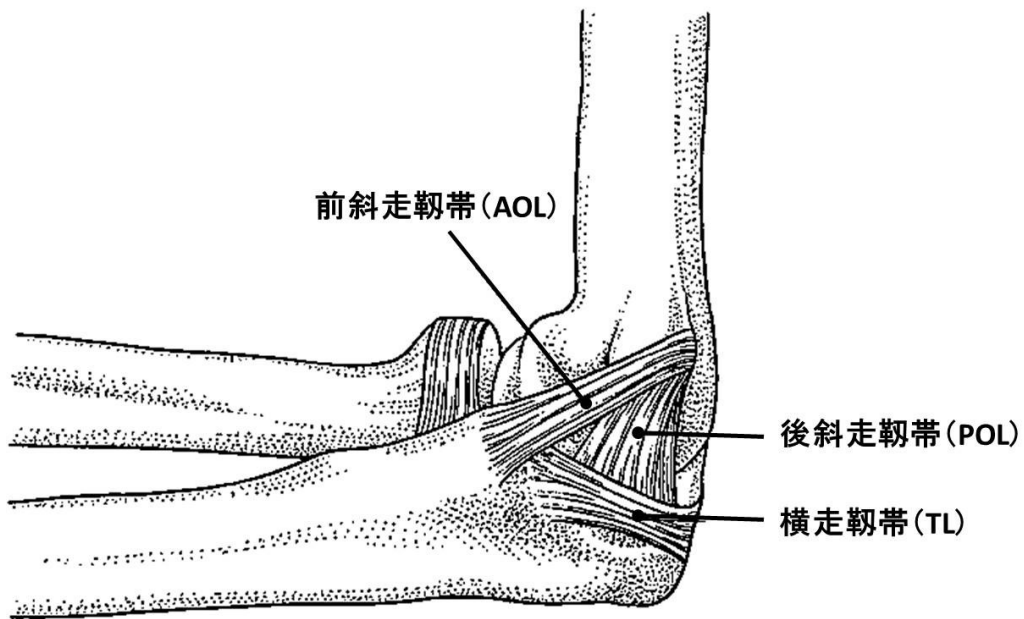


図 2.3 肘関節尺側（内側）側副靭帯（文献 4 より引用，一部改変）

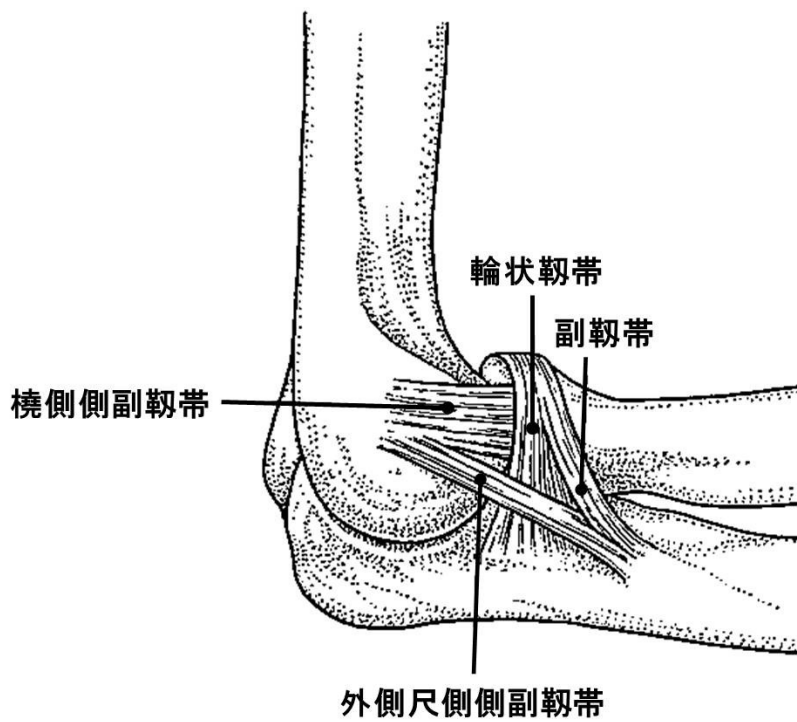


図 2.4 肘関節外側側副靭帯（文献 4 より引用）

## 2.4 肘関節の運動学

肘関節の屈曲・伸展運動は、主に蝶番関節に分類される腕尺関節で行われ、腕橈関節は腕尺関節に同調して運動する。屈曲・伸展可動域は上腕と前腕のなす角度で示され、基本肢位を  $0^\circ$  とし、正常可動域は屈曲  $140\sim 150^\circ$ 、伸展  $0\sim 10^\circ$  までを有する。肘伸展位では外反位、屈曲位では内反位となる。肘関節伸展運動では伸展角度の増大により肘関節は外反し、この際の上腕と前腕の長軸がなす角を肘の外偏角 (carrying angle) という。肘伸展運動の骨性制限因子は、肘頭と肘頭窩の接触であり、屈曲では、橈骨頭と橈骨窩、鈎状突起と鈎状窩の接触により制限される。肘の外反不安定性に対しては、UCL が第 1 の stabilizer で、ついで橈骨頭が第 2 の stabilizer となる。

## 2.5 肘関節の骨化過程

小児の肘関節レントゲン像では、6つの骨端核が順次出現し、12~16歳で癒合するまで骨化進行過程に応じた形態を示す。骨端核の出現時期や骨化進行過程は、骨端部位によって違いが生じる<sup>6)</sup> (図 2.5)。

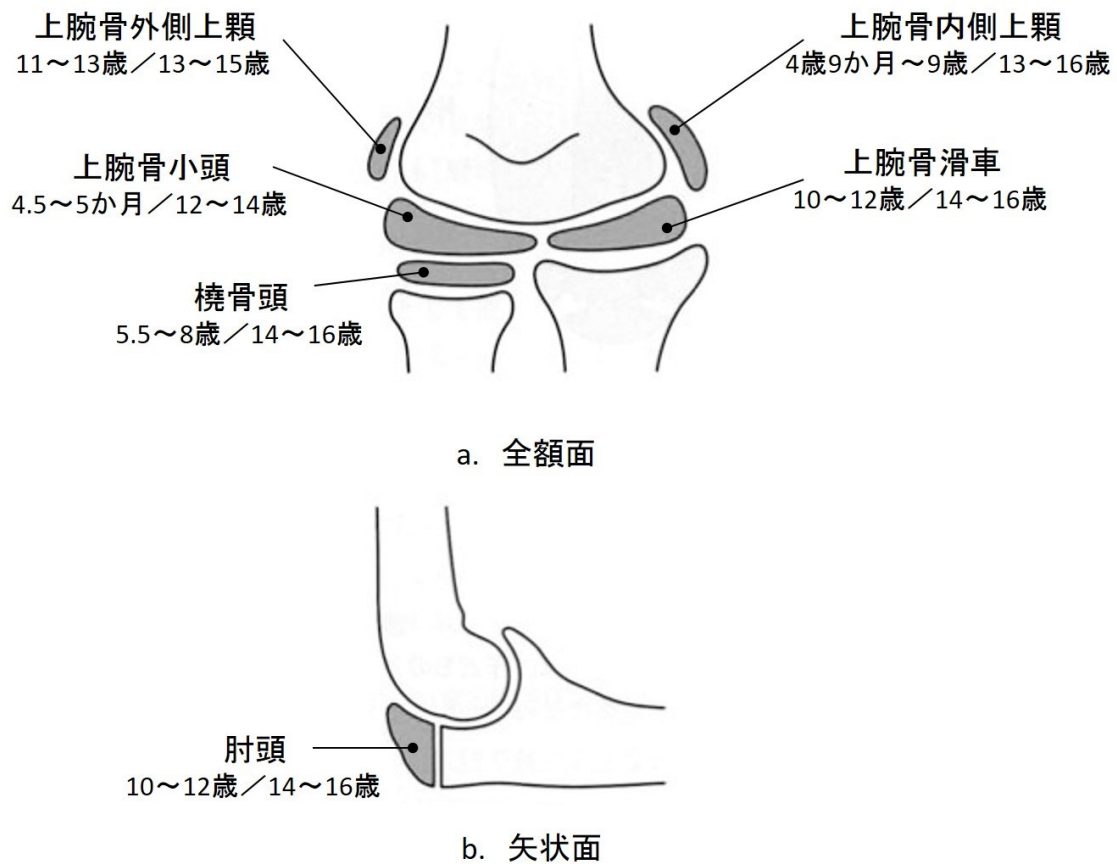


図 2.5 肘関節の骨化進行過程 (文献 6 より引用)

肘関節の 6 箇所 の骨化中心の出現時期と閉鎖時期を示す。

## 2.6 靭帯付着部の構造

腱・靭帯の付着部 (enthesis) は、線維性組織層 (fibrous tissue), 非石灰化線維軟骨層 (uncalcified fibrocartilage), 石灰化線維軟骨層 (calcified fibrocartilage), 骨層 (bone) の 4 層の階層構造を持ち、主に線維軟骨組織で形成されている<sup>11,12)</sup>。投球肘内側障害の主な損傷部位となる AOL の付着部も Wrap around 構造や滑膜組織を持ち、アキレス腱などと同様なエンテーシス・オーガン (enthesis organ) を形成している<sup>12,13)</sup> (図 2.6)。



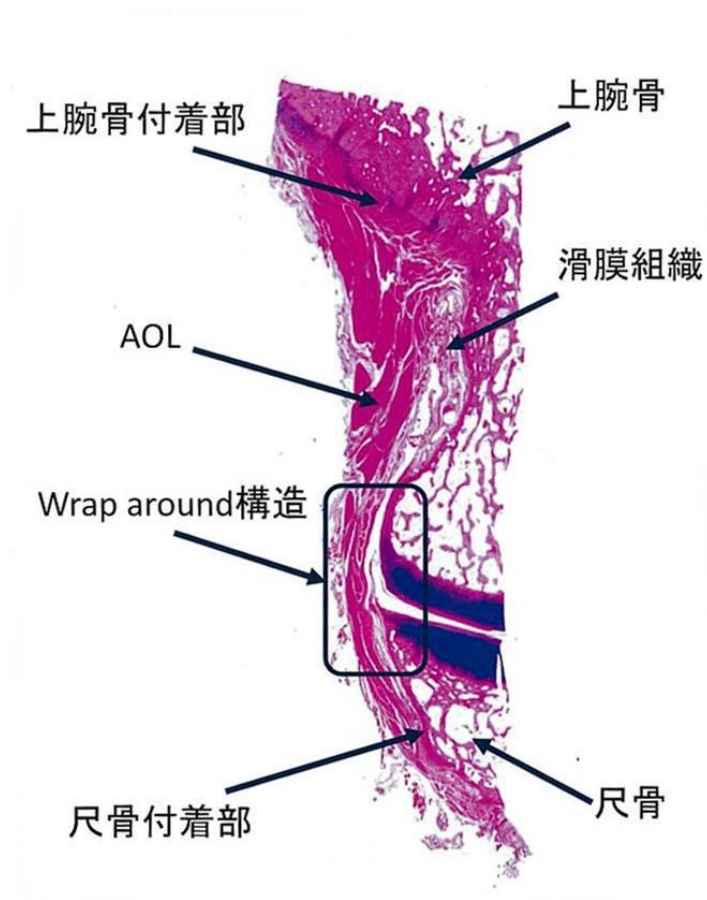


図 2.6 AOL 骨付着部の組織標本 (文献 6 より引用)

## 2.7 肘関節内側（尺側）筋群の機能

投球の 3 次元動作解析によって、投球時の肘関節へ生じる外反トルクは約  $64 \pm 12 \text{Nm}$  と推定されている<sup>14)</sup>。これは UCL の破断強度よりも大きく<sup>10)</sup>、UCL 等の静的支持機構のみでの外反制動は難しいため筋活動による制動が必要と考えられている。筋活動をシミュレーションした実験からは、尺側手根屈筋単独の筋活動、尺側手根屈筋と浅指屈筋の同時筋活動時に肘外反角度が有意に減少する結果が得られている<sup>15)</sup>。また、円回内筋、尺側手根屈筋、長掌筋、浅指屈筋の前方共同腱 (the anterior common tendon ; ACT) は、上腕骨内側上顆と前方関節包に付着することによって、肘関節内側に加わる静的・動的牽引力を分担しているとされている<sup>16)</sup>。

## 参考文献

- 1) 金子丑之助 原著, 金子勝治, 穂田真澄 (改訂): 日本人体解剖学 上巻. 改訂 19 版, 南山堂, 2000
- 2) Michael Schünke 著, 坂井建雄, 他 (監訳): プロメテウス解剖学アトラス解剖学総論/運動器系. 医学書院, 2007
- 3) Donald A. Neumann 著, 嶋田智明, 他 (監訳): 筋骨格系のキネシオロジー. 第 2 版, 医歯薬出版: 195-239, 2012
- 4) 和田卓郎, 磯貝哲 他: 肘関節のバイオメカニクス. 関節外科 21: 55-61, 2002
- 5) 茶木正樹: 肘関節・前腕・手関節・手指の構造と機能. 投球障害のリハビリテーションとリコンディショニング. 山口光國 (編), 文光堂: 14-24, 2010
- 6) 柏口新二: 肘内側上顆の骨化進行過程. よくわかる野球肘 肘の内側部障害一病態と対応一. 山崎哲也, 柏口新二, 他 (編), 全日本病院出版: 2-6, 2016
- 7) Morrey BF, An KN: Functional anatomy of the Ligaments of the Elbow. Clinical Orthopaedics and Related Research 201: 84-90, 1985
- 8) 橋詰博行, 小倉丘 他: 肘の解剖. NEW MOOK 整形外科 11. 越智隆弘, 菊地臣一 (編), 金原出版: 19-26, 2002
- 9) Armstrong AD, Dunning CE et al: A biomechanical comparison of four reconstruction techniques for the medial collateral ligament-deficient elbow. J Shoulder Elbow Surg.14: 207-215, 2005
- 10) Ahmad CS, Lee TQ et al: Biomechanical evaluation of a new ulnar collateral ligament reconstruction technique with interference screw fixation. Am J Sports Med. 31: 332-337, 2003
- 11) Benjamin M, Ralphs JR.: Fibrocartilage in tendons and ligaments-an adaptation

to compressive load. *J. Anat.* 193: 481-494, 1998

- 12) 篠原靖司, 熊井司: 腱・靭帯付着部の微細構造. よくわかる野球肘 肘の内側部障害—病態と対応—. 山崎哲也, 柏口新二 他 (編), 全日本病院出版: 18-25, 2016
- 13) Benjamin M, Moriggl B et al: The “enthesis organ” concept: why enthesopathies may not present as focal insertional disorders. *Arthritis & Rheumatism* 50: 3306-3313, 2004
- 14) Fleisig GS, Andrews JR et al: Kinetics of baseball pitching with implications about injury mechanisms. *Am J Sports Med.* 23: 233-239, 1995
- 15) Park MC, Ahmad CS: Dynamic contributions of the flexor-pronator mass to elbow valgus stability. *J Bone Joint Surg Am.* 86: 2268-2274, 2004
- 16) Otoshi K, Kikuchi S et al: The proximal origins of the flexor-pronator muscles and their role in the dynamic stabilization of the elbow joint: an anatomical study. *Surg Radiol Anat.* 36: 289-294, 2014

## 第3章 成長期の投球動作と投球肘障害

### 3.1 はじめに

本章では成長期に発生する投球肘障害の概念，疫学，発生機序とメカニズム，診断，治療とリハビリについて述べる．本論文で述べる成長期野球選手とは，男子の思春期を迎える時期（平均 10.38 歳）から最終身長に到達する時期（平均 16.91 歳）<sup>1)</sup> までを指標とした小，中，高校生年代の男子選手（小学 5 年生～高校 3 年生）とした．

### 3.2 投球動作の位相分類

投球障害や投球動作について論じる際に規定される投球動作の位相分類は，4 相から 6 相に分類される<sup>2-4)</sup>（図 1.1）．

- 1) Wind-up 相：動作開始から非投球側膝関節位置が最高位となるまで（KH ; the highest position of the knee）．
- 2) Early cocking 相：KH から非投球側足底の接地（FP ; foot plant）．
- 3) Late cocking 相：FP から投球側肩関節最大外旋位（MER ; maximum external rotation of the shoulder）．
- 4) Acceleration 相：MER からボールリリース（BR ; ball release）．
- 5) Deceleration 相：BR から投球側肩関節最大内旋位（MIR ; maximum internal rotation of the shoulder）．
- 6) Follow-through 相：MIR から投球動作終了．

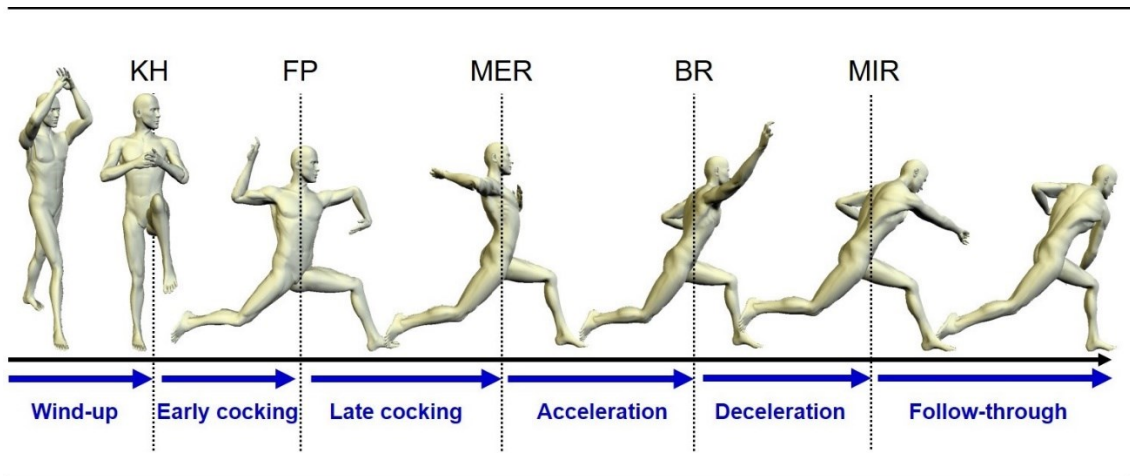


図 3.1 投球動作の位相分類

4 相分類<sup>4)</sup>は、先に述べた 6 相分類の early cocking 相と late cocking 相を cocking 相, 1 相とし, ボールリリース後の deceleration 相と follow-through 相を follow-through 相, 1 相とする. 5 相分類<sup>3)</sup>では, ボールリリース後の deceleration 相と follow-through 相を follow-through 相, 1 相とする. 本論文では, ボールリリース後を follow-through 相, 1 相として投球動作を 5 相に分類した.

### 3.3 成長期における投球肘障害の概念

野球における投球肘障害は, 内側, 外側, 後側部に発生する. これを Slocum<sup>5)</sup> は関節の障害部位や外部から加わるメカニカルストレスの種類や大きさによって分類し (表 3.1), 柏口<sup>6)</sup> は骨年齢から成長期と成人期に分け, 更に損傷組織によって骨・軟骨障害と軟部組織障害に分類している (表 3.2). 内側部では内側上顆の剥離や骨端離開, 尺側側副靭帯損傷, 尺骨神経障害, 外側部では上腕骨小頭離断性骨軟骨炎 (osteochondritis dissecans of capitulum humerus ; 以下, 肘 OCD), 滑膜ひだ障害, 後側部では肘頭の骨端離開, 骨端閉鎖不全, 滑膜ひだ障害, 骨棘骨折, 疲労骨折などがある. また, 骨化が完了した成人期と完了前の成長期では大きく異なるものとして考えなければならない. 例えば, 投球肘内

側障害では，成人期は尺側側副靭帯実質部が損傷されるのに対して，成長期では靭帯付着部（上腕骨内側上顆下端剥離骨折，上腕骨内側上顆骨端離開，尺骨鉤状結節）が損傷される．成長期の投球肘障害は，11，12歳の選手で多く発生するとされており<sup>7,8)</sup>，その要因として肘関節に出現する6つの二次骨化中心と骨化進行過程の時期に投球による肘関節への力学的ストレスが繰り返し生じるためと考えられている<sup>6)</sup>．成長期の投球肘障害の危険因子としては，投球過多（over use）と投球動作による影響が大きい<sup>9)</sup>．

表 3.1 メカニズムによる分類（文献5より引用，一部改変）

- 
- A. Medial tension overload injuries（牽引力による内側障害）
    - 1) Musculotendinous involvement
    - 2) Bony involvement
    - 3) Ligamentous and capsular involvement
  
  - B. Lateral compression injuries（圧迫・剪断力による外側障害）
  - C. Extension overload injuries（圧迫・剪断力による後方障害）
  - D. Posterolateral rotatory instability（不安定性による後外側障害）
-

表 3.2 野球肘の分類 (文献 6 より引用, 一部改変)

---

成長期の野球肘
A. 骨軟骨の外傷・障害
1) 骨端の障害 (osteochondrosis)
上腕骨内側上顆, 小頭, 滑車, 橈骨頭, 肘頭
2) 骨端線の障害
上腕骨内側上顆, 滑車, 肘頭
3) 裂離骨折や骨軟骨骨折
B. 軟部組織の外傷・障害
ダメージは受けているが障害が顕在化することは少ない
成人期の野球肘
A. 骨軟骨の外傷・障害
1) 筋腱の障害 (屈筋腱, 回内筋腱, 上腕筋)
2) 内側支持機構障害 (内側側副靭帯損傷を含む)
3) 外側側副靭帯損傷
4) 尺骨神経障害 (胸郭出口症候群を含む)
5) 滑膜および滑膜壁障害
B. 骨軟骨の外傷・障害
1) 発育期の遺残障害
2) 変形性関節症
3) 過労性骨軟骨障害 (疲労骨折)
肘頭, 肘頭窩, 滑車障害, 内側上顆

---

### 3.4 成長期における投球肘障害の疫学

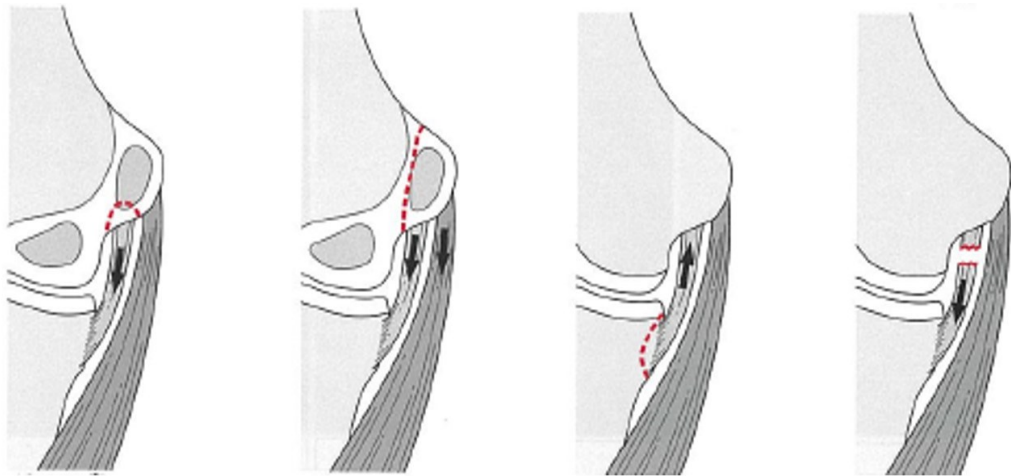
リトルリーグに所属している投手 (8~12 歳) を対象とした 1970 年代の米国の調査では, 肘痛を有した選手の割合は 17~20%と報告されている<sup>10,11)</sup>. また, Lyman ら<sup>7)</sup>の少年野球投手 (9~12 歳) を対象とした 2 年間の前向きコホート研究から, 投手の 25.5%が肘痛を有し, その危険因子として年齢, 体重, 所属リーグ外でのプレイ時間, 投球中の腕の疲労感, シーズン中の筋力トレーニング, 1 シーズン 600 球以上の投球を挙げている. 我が国においては, 本論文の序論で述べた一般財団法人全日本野球協会, 公益社団法人日

本整形外科学会，一般財団法人運動器の10年・日本協会によって平成26年から3年間実施された調査以外の報告として，Matsuura ら<sup>12)</sup>は，1年間の経過観察で449人中（7～11歳），137人（30.5%）がシーズン中に肘痛を経験したと報告している．その危険因子として年齢，ポジション（投手，捕手），1年間に100試合以上のプレイを挙げている．また，Otoshi ら<sup>13)</sup>は，4,249人中（6～17歳），2,309人（53.4%）が肘痛を経験していたと報告している．肘痛の有症率は，特に9歳以降に大幅に増加し始め，17歳で70%に達するとしている．ポジション別には，捕手（67.5%），投手（64.8%），内野手（51.8%），外野手（44.7%）の順に有症率が高く，部位別では，内側障害が2,248人（52.9%），外側障害（肘OCD）は93人（2.2%）と報告している．Sakata ら<sup>14)</sup>は，少年野球選手353人（6～12歳）を対象とした1年間の追跡調査において，内側障害の発症は78人（22.1%）とし，年齢，ポジション（投手），1日あたりの投球数（100球以上），胸椎の後弯角（30°以上），肘伸展角度の欠損（5°以上）を危険因子として報告している．しかし，いずれの研究も短期間（1～2年）のコホート研究であり，今後長期間のコホート研究の結果が待たれる．

### 3.5 成長期における投球肘障害の発生機序

肘関節内側障害は，骨成長の過程において好発部位が変化する．10～14歳前後では尺側副靭帯（ulnar collateral ligament；UCL）近位付着部の上腕骨内側上顆下端障害が多く，15歳前後からはUCL遠位付着部の尺骨鉤状結節障害が見られるようになる．肘関節の骨化が完了するとUCL実質部障害へと変化する（図3.5）．これらは骨化進行過程に伴う脆弱部が変化するためと考えられる<sup>15,16)</sup>．投球動作で肘に強いストレスが加わるコッキング期から加速期にかけて，肘外反ストレスによるUCLへの牽引力が加わり，牽引性の骨端障害が生じると考えられている<sup>17)</sup>．





a. 内上顆下端剥離骨折 (10-12歳)    b. 内上顆骨端離開 (13-14歳)    c. 鈎状結節部剥離骨折 (15-16歳)    d. UCL損傷 (15-16歳)

図 3.5 年齢の違いによる投球肘内側障害 (文献 16 より引用, 一部改変)

肘関節外側障害である肘 OCD は、初期には自覚的にも症状が乏しく、無症候のまま進行し重症化する。好発年齢は 12～15 歳である。その病因、病態は依然として明らかではないが、投球時に肘外側に加わる圧迫、剪断力によるメカニカルストレスが増悪因子として考えられている<sup>18)</sup>。

肘関節後方障害は、投球時加速期の外反ストレスと減速期（フォロースルー期）の過伸展ストレスに伴う肘頭骨端線、腕尺関節への圧迫、剪断力により障害が発生すると考えられている<sup>19)</sup>。好発年齢は 13～15 歳である。

### 3.6 肘外反ストレスに影響を与える投球動作

投球動作は、肘関節だけでなく多くの関節が連動して行われる全身運動であるため、投球時に発生する肘外反ストレスは、肘以外の関節運動の影響を受ける。先行研究では、投球側肩関節最大外旋時において肘関節屈曲角度が大きいと肘外反ストレスが減少すること

<sup>20)</sup>。Foot plant (FP) 時における肩関節外転角度と肘外反ストレスとの関係では、体幹側

屈角度 10~40° において肩外転 90~100° を最小として外転角度が減少しても増加しても肘外反ストレスが増大すること<sup>21)</sup> (図 3.6) が報告されている。また、骨盤回旋角度と肘外反ストレスとの関係では、FP 時において骨盤回旋角度が小さい(遅い)と肘外反ストレスが増大することが報告されている<sup>22)</sup>。しかし、いずれの報告もプロ野球選手、大学生や高校生選手を対象とした研究であり、成長期、特に学童期(小学生)を対象とした報告は少ない。

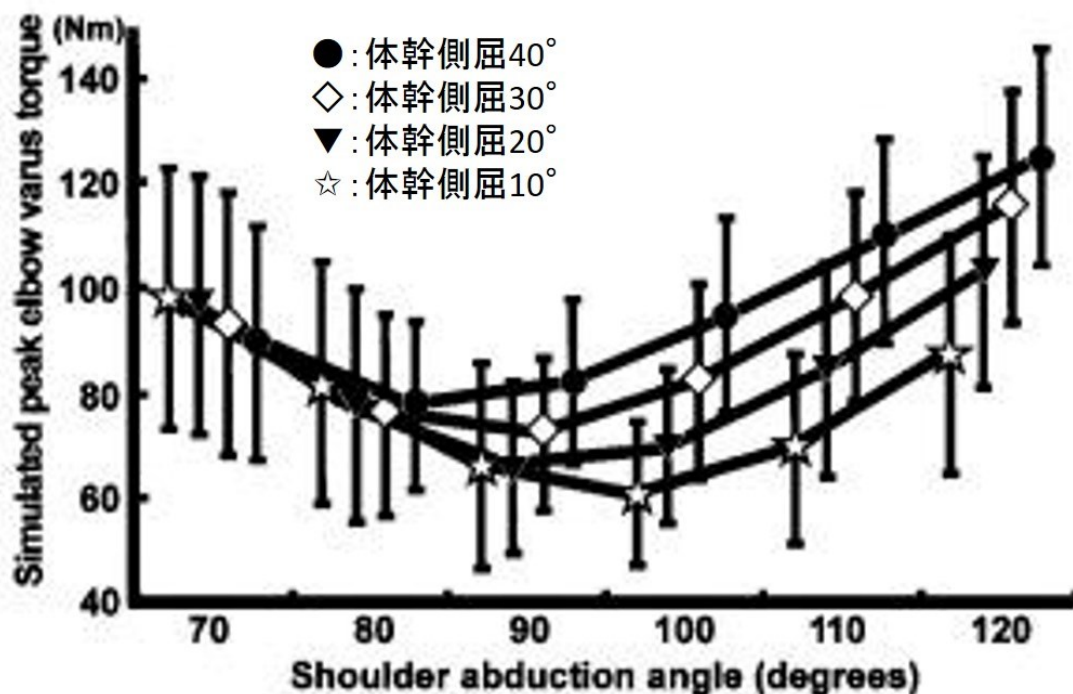
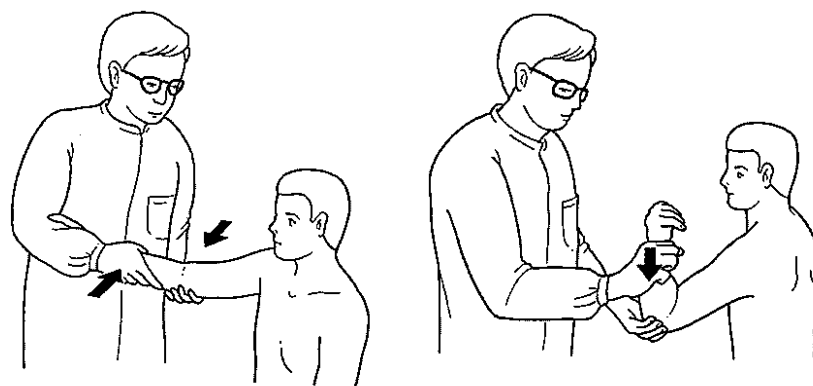


図 3.6 肩外転角度と肘関節トルクの関係 (文献 21 より引用, 一部改変)

### 3.7 臨床診断

問診では、発症時期や原因となったエピソード、症状の経過、肘関節の疼痛部位や程度、疼痛を誘発、増悪させる動作を聴取する。投球への支障の程度、練習、試合への影響や投球動作のどの時期に症状が出現するかを明確にする。理学所見として肘関節の腫脹、圧痛の有無、肘関節や前腕の可動域、握力などを計測する。肘関節内外反ストレステストで、

肘関節の不安定性や疼痛の有無を確認する。肘関節内側支持機構の障害では **milking test** が有効である<sup>23)</sup> (図 3.7)。小指の深指屈筋, 小指外転筋, 第 1 背側骨間筋, 母指内転筋などの筋力検査, 小指の知覚検査や **Tinel sign** など尺骨神経支配領域の検査を行う。



a. 肘外反ストレステスト

b. milking テスト

図 3.7 肘関節疼痛誘発テスト (文献 23 より引用)

### 3.8 画像診断

投球肘障害の画像診断は, 単純 X 線撮影, コンピュータ断層撮影 (Computed Tomography ; CT), 核磁気共鳴画像法 (Magnetic Resonance Imaging ; MRI), 超音波検査 (ultrasonography) による撮影画像が使われる。単純 X 線撮影では, 肘関節の正面・側面撮影に加えて, 肘 45° 屈曲位正面撮影が行われる。肘 45° 屈曲位正面撮影 (図 3.8) は, 内側上顆剥離骨折や肘 OCD の検出には必須である<sup>23)</sup>。岩瀬ら<sup>24)</sup>は, 単純 X 線画像による病期分類として透亮期, 分離期, 遊離体期に分類して治療選択上の指標とした (図 3.9)。単純 X 線撮影で検出困難な細部では, CT による冠状断, 矢状断, 3 次元再構成が有用である<sup>25)</sup>。MRI は骨, 軟骨, 靭帯, 筋・腱などの軟部組織の評価に優れている。近年では,

高分解能 MRI によって骨端核，骨端軟骨などの評価が可能となっている<sup>15)</sup>。無侵襲で高解像度の画像が得られるようになった超音波診断装置は，骨，軟骨，靭帯，筋，腱，神経の評価が可能であり，近年急速に普及している。

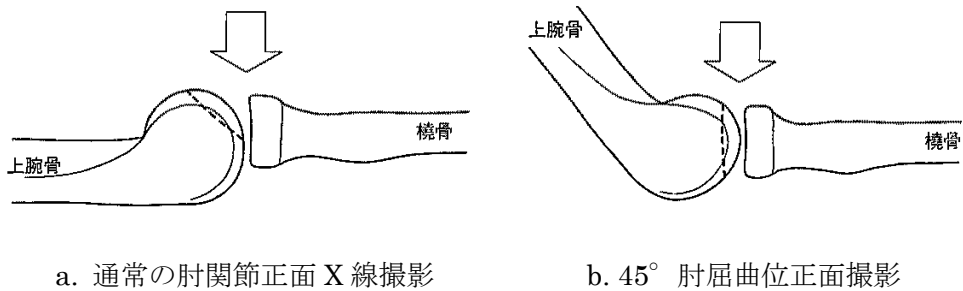


図 3.8 肘 OCD の X 線撮影 (文献 23 より引用)

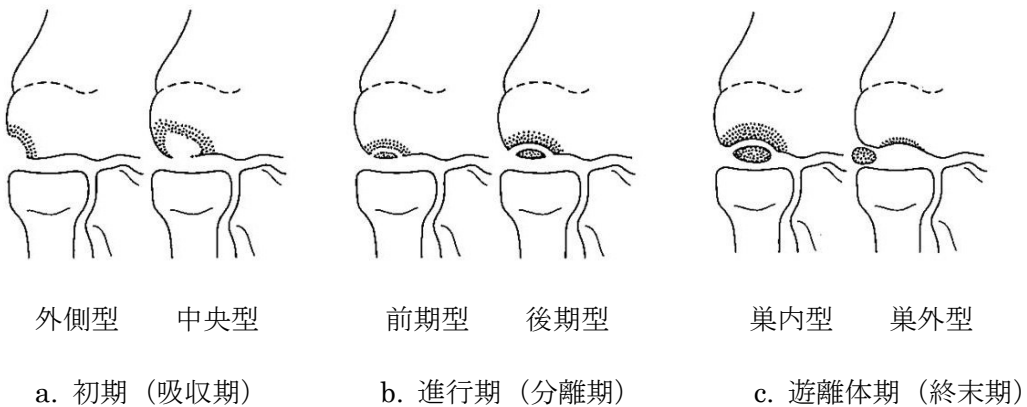


図 3.9 肘 OCD の病期分類 (文献 24 より引用)

### 3.9 治療とリハビリテーション

成長期の肘関節上腕骨内側上顆障害への対応は症状によって変わるが，基本的には疼痛時の投球中止，発育発達段階に応じた身体機能の改善，投球動作への介入である<sup>15)</sup>。疼痛がある時は，肘関節の安静を保つために投球を中止する。剥離骨折を生じた急性期を除い

ては、装具やギプス固定は不要である。痛みを誘発しないランニングやノックの捕球などの練習は許可し、投球のみを中止する。患部以外の身体機能についても評価し、姿勢や二関節筋の柔軟性の改善、肩、股関節、胸郭などの可動域の積極的な改善を図る。肘関節の回復については、圧痛の消失、肘の屈曲伸展、前腕回内外の運動時痛の消失と可動域の回復（非投球測との比較）、肘外反ストレス痛の消失を確認してから投球を再開する。多くはないが骨端線の開きや骨片転位が大きい場合や骨片の遺残障害がある場合は、手術治療が選択される。骨化完了後の内側障害である靭帯損傷に対しては、靭帯再建術が選択される。

肘 OCD への対応は、病期によって治療法の選択が異なる。初期、進行期では保存治療が第一選択となり、保存治療で修復されない症例や終末期では、骨片固定術、骨切り術、骨軟骨（柱）移植術など手術治療が選択される。保存治療ではギプスによる固定は不要であるが、肘関節への負担を極力減らすことが必要であるため投球やバッティングは中止する。投球中止 1～3 か月で疼痛などの症状は改善するが、X 線画像による修復の確認には 1 年程度の時間を要する<sup>26)</sup>。学童期の多感な時期に長期間に渡って投球制限を求めるため、メンタル面へのケアや指導者、保護者の理解と協力を得ることも重要である。

投球の再開にあたっては、距離、球数、強度を段階的に上げ、投球日と投球休養日などの頻度に注意し、再発の予防に努める。投球動作の介入については、多くの指導書によって発信されているが、その科学的根拠となる 3 次元動作解析データは十分ではなく議論の余地がある。

## 参考文献

- 1) 松岡尚史, 村田光範: 伸長を図る意味. ジュニア期の体力トレーニング. 日本体育協会: 12-16, 1996
- 2) Dillman CJ, Fleisig GS et al: Biomechanics of pitching with emphasis upon shoulder kinematics. *J Orthop Sports Phys Ther.* 18: 402-408, 1993
- 3) 信原克哉: 肩—その臨床と機能—. 第3版, 医学書院: 372-424, 2001
- 4) Jobe FW, Tibone JE et al: An EMG analysis of the shoulder in pitching. A second report. *Am J Sports Med.* 12: 218-220, 1984
- 5) Slocum DB: Classification of elbow injuries from baseball pitching. *Tex Med*, 1968
- 6) 柏口新二: 成長期と成人期での障害の違いと多様性. 岩瀬毅信, 柏口新二, 他(編). よくわかる野球肘 離断性骨軟骨炎. 全日本病院出版会: 2-8, 2013
- 7) Lyman S, Fleisig GS et al: Longitudinal study of elbow and shoulder pain in youth baseball pitchers. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 33: 1803-1810, 2001
- 8) Harada M, Takahara M et al: Risk factors for elbow injuries among young baseball players. *J Shoulder Elbow Surg.*19: 229-240, 2010
- 9) 宮下浩二, 小林寛和 他: 成長期選手の投球障害予防を目的とした投球動作の関節運動学的分析. *日本臨床スポーツ医学会誌* 20: 49-55, 2012
- 10) Gugenheim JJ Jr, Stanley RF et al: Little League survey: the Houston study. *Am J Sports Med* 4: 189-200, 1976
- 11) Larson RL, Singer KM et al: Little League survey: the Eugene study. *Am J Sports Med* 4: 201-209, 1976
- 12) Matsuura T, Suzue N et al: Elbow Injuries in Youth Baseball Players Without Prior Elbow Pain: A 1-Year Prospective Study. *Orthop J Sports Med.* 29: 1-4, 2013
- 13) Ootshi K, Kikuchi S et al: Age-Specific Prevalence and Clinical Characteristics of

- Humeral Medial Epicondyle Apophysitis and Osteochondritis Dissecans:  
Ultrasonographic Assessment of 4249 Players. *Orthop J Sports Med.* 24: 1-8, 2017
- 14) Sakata J, Nakamura E et al: Physical Risk Factors for a Medial Elbow Injury in Junior Baseball Players: A Prospective Cohort Study of 353 Players. *Am J Sports Med.* 45: 135-143, 2017
- 15) 柏口新二, 岡田知佐子 他: 野球肘: 成長期内側部障害の診断と治療. *臨床スポーツ医学* 30: 885-893, 2013
- 16) 岩堀裕介: 成長期における上肢スポーツ障害の特徴と治療. 山口光國, 編, *投球障害のリハビリテーションとリコンディショニング*, 文光堂: 91-117, 2010
- 17) Pappas AM: Elbow problems associated with baseball during childhood and adolescence. *Clinical Orthopaedics & Related Research* 164: 30-41, 1982
- 18) 岡田知佐子, 柏口新二 他: 少年サッカー選手における離断性骨軟骨炎発生率の調査—上腕骨小頭離断性骨軟骨炎の発生因子についての検討—. *日本整形外科スポーツ医学学会誌* 31: 219-224, 2011
- 19) 伊藤恵康: スポーツ障害としての肘頭骨端離開・肘頭疲労骨折の病態. *日肘会誌* 11: 45-46, 2004
- 20) Werner SL, Murray TA et al: Relationship between throwing mechanics and elbow valgus in professional baseball pitchers. *J Shoulder Elbow Surg.* 11: 151-155, 2002
- 21) Matsuo T, Fleisig GS et al: Influence of Shoulder Abduction and Lateral Trunk Tilt on Peak Elbow Varus Torque for College Baseball Pitchers during Simulated Pitching. *J Appl Biomech.* 22: 93-102, 2006
- 22) Wight J, Richards J et al: Influence of pelvis rotation styles on baseball pitching mechanics. *Sports Biomech.* 3: 67-83, 2004
- 23) 高原政利: 野球肘の診断と治療: 野球肘の診断. *関節外科* 27: 23-30, 2008

- 24) 岩瀬毅信, 井形高明: 上腕骨小頭骨軟骨障害. 伊丹康人, 他, 編, 整形外科 MOOK 54, 肘関節の外傷と疾患. 26-44, 金原出版, 1988
- 25) 松浦哲也, 柏口新二 他: 肘関節骨軟骨障害の病態診断における再構成 CT の有用性. 日本整形外科スポーツ医学会誌 22: 204-209, 2002
- 26) 松浦哲也, 柏口新二: 上腕骨小頭骨軟骨障害の保存治療. 臨床スポーツ医学 26: 493-498, 2009



## 第4章 投球動作の計測方法

### 4.1 はじめに

投球は高速で自由度の高い動作であるため、複数台の高速度ビデオカメラによる多方向撮影から動作の特徴を3次元推定する方法が用いられている。近年では、動作の特徴となる体表上に貼付したマーカの3次元位置を高速に計測できるモーションキャプチャー・システムが多用されている。本章では、モーションキャプチャー・システムによる投球動作の計測方法について述べる。

### 4.2 投球動作の計測方法

本論文では、光学式モーションキャプチャー・システムVICON (VICON612, Vicon Motion Systems UK) を用いた。光学式モーションキャプチャー・システムの構成要素である Charge-Couple Device (CCD) カメラ6台は、一連の投球動作全てを囲む空間の周囲に配置し、各カメラとシステムの中央処理装置との間を高速通信ケーブルで接続した。動作の計測は、カメラ上の赤色ライトから赤外線を照射し、対象の体表上に貼付した球形マーカ（反射マーカ）からの反射光をカメラ内のCCD素子が受光することによってカメラ内での反射マーカの2次元座標値を検出する。各カメラから得られた反射マーカの2次元座標値群をコンピュータへ取り込み、トラッキングソフトウェア (VICON Workstation) による3次元再構成処理によって反射マーカの3次元位置を推定する。本論文では、投球動作の計測におけるカメラのサンプリング周波数を250Hzとした。

計測は室内で行い、投球時の軸脚での踏込みを助けるために床面に投球プレートを固定した。投球プレートから本塁までの距離は公式規定では18.44 mであり、投手は本塁上に定義されたストライクゾーンに目がけて投げる。しかし、本論文で行った計測は室内による

環境制限のため、投球プレートから11.0m先の地点の地面から高さ1.0mの位置に的（0.4m×0.4m）を設置し、その的を仮想のストライクゾーンとした。

球速の計測には超音波速度計（Stalker Pro, Radar Sports, USA）を用いた。同時に、2台の高速度ビデオカメラ（HSV-500C<sup>3</sup>, NAC Image Technology Inc. Japan）を用いてサンプリング周波数250Hzにて投球動作をビデオ撮影し、投球動作の相分類の判定に用いた。

次に光学式モーションキャプチャー・システムから得られる反射マーカの3次元位置の基準となるカメラ座標系（ワールド座標系）について述べる。カメラ座標系 $\Sigma_w$ は投球プレート上に設定した。投球プレートの右端前方を原点 $O_w$ とし、投球プレートから投球方向を $Y$ 軸（ $y_w$ ）、床面の垂直上方を $Z$ 軸（ $z_w$ ）とした。 $X$ 軸（ $x_w$ ）は投球方向に対して右側（三塁方向）へ向かうベクトルとした（図4.1）。

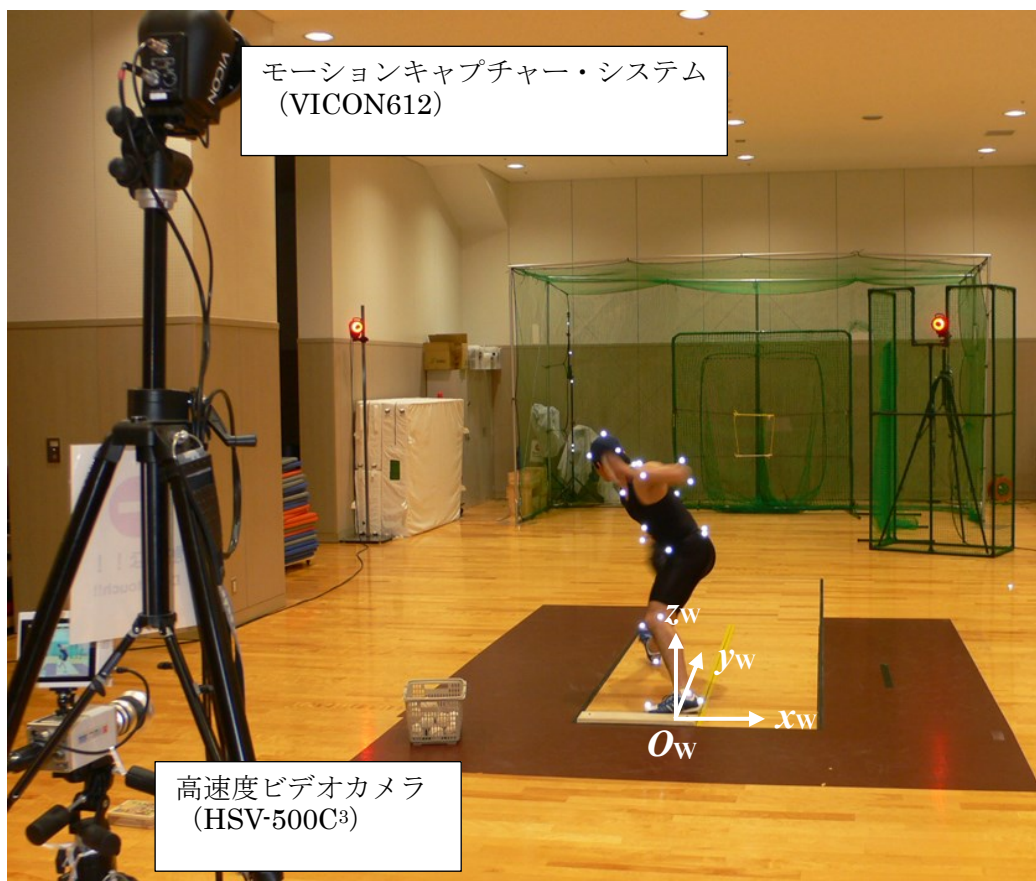


図4.1 投球動作（左投手）の計測環境

対象の体表から触診により解剖学的骨特徴点を検出し，そこに球形の反射マーカ（直径 25 mm，質量 5g）を貼付した．貼付位置は図 4.2 に示す 30 箇所とした：頭頂部，頭部前面，後頭部，胸骨柄 (SM)，剣状突起 (SX)，第 7 頸椎棘突起 (C7)，第 10 胸椎棘突起 (T10)，肩峰 (AC)，上腕骨外側上顆 (LEH)，上腕骨内側上顆 (MEH)，橈骨茎状突起 (SPR)，尺骨茎状突起 (SPU)，第 3 中手骨頭背側 (F3)，上前腸骨棘 (ASIS)，上後腸骨棘 (PSIS)，大腿骨外上顆 (LEF)，腓骨外果 (LM)，第 3 中足骨頭背側 (TM)，踵骨 (CA)．着衣による体表皮膚面と反射マーカとのズレを軽減するため，対象の頭部には水泳用キャップ，上半身には高密着性のノースリーブウェア，下半身にはハーフタイプのスパッツ，非投球側の手にはグローブを着用させた．反射マーカの貼付材は，両面テープを用いた．



図 4.2 反射マーカの貼付位置（全 30 箇所）

### 4.3 対象者と計測条件

対象者は、2003年から2010年において新潟県健康づくり・スポーツ医科学センターの動作分析事業を利用して投球動作を計測した小学生から高校生までの男子野球選手とした。対象者の選択基準は、(1) 過去に肩関節と肘関節の手術歴がないこと、(2) 投球動作の計測時に疼痛を訴えていないこと、(3) 右投げで投球フォームがオーバーハンド又はスリークォーターの3項目を満たす者とした。その内訳は、小学生38名、中学生36名、高校生78名であった。

### 4.4 計測プロトコル

計測プロトコルは、新潟県健康づくり・スポーツ医科学センター倫理審査委員会の承認を受けて行った(承認番号17・34)。投球動作の計測を行う前に、計測の趣旨や目的、撮影方法について対象者本人と保護者、引率者に口頭と書面にて説明を行い、同意書を取得した。計測前のウォーミングアップは、対象者本人が試合前や練習前に行っている内容に準じて行った。計測時には4.2節で述べたウェアに着替え、体表上に反射マーカを貼付した。マーカ貼付後に計測環境にて十分な投球練習を行った後、最大努力下での投球動作を計測した。球種はストレートとした。的を通過し、且つ選手と指導者が納得した試技を3回以上取得した。なお、反射マーカが投球動作を阻害するといった訴えはなかった。計測に用いたボール(硬式球、軟式球:B号、C号)は、各対象者の競技規定に沿うように選択した。

### 4.5 投球動作の運動学・動力学的解析

#### 4.5.1 体節座標系の設定

計測によって得られた1サンプル当たりの反射マーカの3次元位置は、カメラ座標系 $\Sigma_w$ から見た3次元位置を表し、この時間による連続値が投球動作中の反射マーカの推移を表

す。一般的に、反射マーカの3次元位置の原データには高周波成分のノイズが混入している。このノイズが位置の時間微分で求められる速度・加速度のデータに大きな影響を及ぼす。そこで、このノイズの除去に、4次のバターワースフィルタ（20Hz）によるフィルタリング処理を行った。

投球動作の計測によって得られた反射マーカの3次元位置データ群から、次の手順によって投球動作の運動学・動力的解析を行った。

まず、全身を15個の剛体とし、隣り合う体節間をボール・アンド・ソケット関節で繋ぐ剛体リンクモデルで表し、各体節には座標系を設定した<sup>1-5)</sup>。ここでは、骨盤、胸部、上腕部、前腕部、手部に設定した体節座標系について述べる。

体節座標系の原点の設定方法について述べる。骨盤座標系  $\Sigma_P$  の原点  $O_P$  は、左右の ASIS と左右の PSIS 上に貼付した4個のマーカの中点とした。胸部座標系  $\Sigma_T$  の原点  $O_T$  は、SM, SX, C7, T10 上に貼付した4個のマーカの中点とした。上腕座標系  $\Sigma_U$  の原点  $O_U$  は、肩関節中心とした。肩関節中心は、後述する胸部座標系  $\Sigma_T$  に関して AC を Z 軸下方に身長 の 1.87%、および Y 軸前方に身長 の 0.645% に移動した位置とした<sup>1)</sup>。前腕座標系  $\Sigma_F$  の原点  $O_F$  は、MEH と LEH の中点とした。手部座標系  $\Sigma_H$  の原点  $O_H$  は、SPR と SPU の中点とした。

次に、体節座標系の各軸の設定方法について述べる。骨盤座標系  $\Sigma_P$  の第1軸は Z 軸とし、Left ASIS と Right ASIS、そして左右の PSIS の中点の3点から成る平面の法線ベクトルとした。第2軸は X 軸とし、左右の PSIS の中点から左右の ASIS の中点へ向かうベクトルと Z 軸との外積とした。第3軸となる Y 軸は X 軸と Z 軸との外積とした。胸部座標系  $\Sigma_T$  の第1軸は Z 軸とし、SX と T10 の中点から SM と C7 の中点へ向かうベクトルとした。第2軸は X 軸とし、C7 と T10 の中点から SM と SX の中点へ向かうベクトルと Z 軸との外積とした。第3軸となる Y 軸は X 軸と Z 軸との外積とした（図4.3）。

上腕座標系  $\Sigma_U$  の第1軸となる Z 軸は、 $O_P$  から  $O_U$  へ向かうベクトルとした。第2軸となる X 軸は、 $O_U$  と LEH, MEH の3点から成る平面の法線ベクトルと Z 軸との外積とし、 $O_P$  か

らLEHの方向を正とした。第3軸となるY軸は、X軸とZ軸との外積とした。前腕座標系 $\Sigma_F$ の第1軸となるZ軸は、 $O_H$ から $O_F$ へ向かうベクトルとした。第2軸となるX軸は、 $O_E$ とLEH、MEHの3点から成る平面の法線ベクトルとZ軸との外積とし、 $O_F$ からLEHの方向を正とした。第3軸となるY軸は、X軸とZ軸との外積とした。手部座標系 $\Sigma_H$ の第1軸となるZ軸は、F3から $O_H$ へ向かうベクトルとした。第2軸となるX軸は、SPUとSPR、F3の3点から成る平面の法線ベクトルとZ軸との外積とし、 $O_H$ からSPRの方向を正とした。第3軸となるY軸は、X軸とZ軸との外積とした(図4.4)。また、予め、図4.3と図4.4のような立位静止姿勢を撮影し、この姿勢において隣接する体節座標系間の位置関係のオフセットをとった。

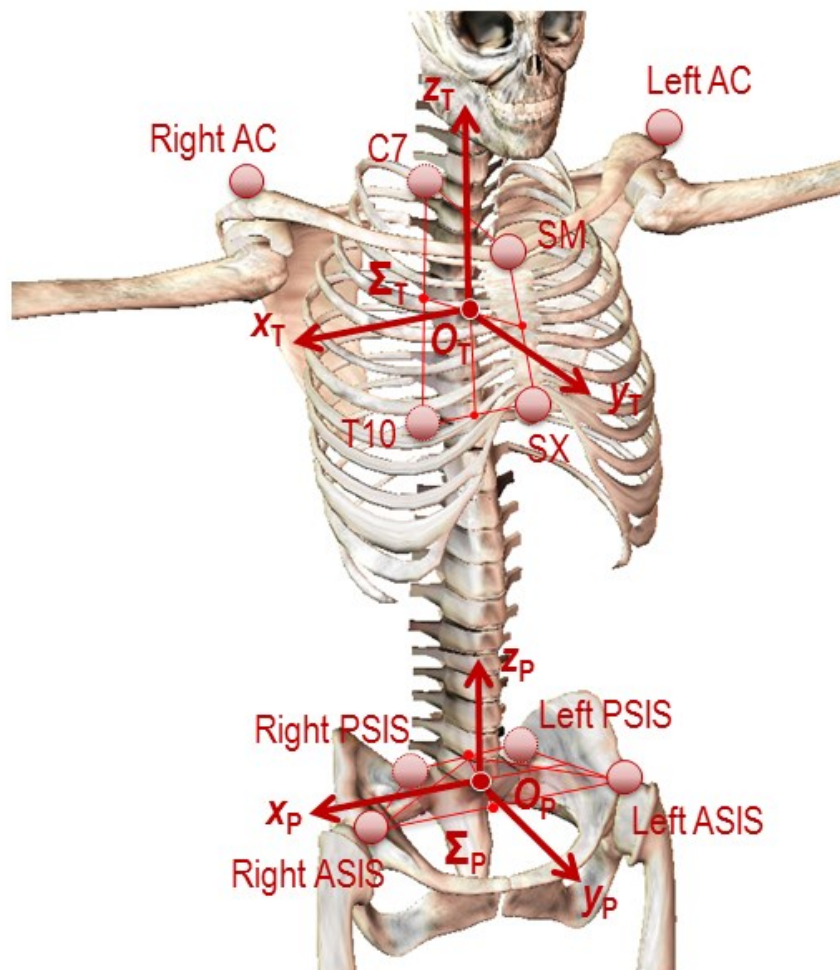


図4.3 骨盤座標系 $\Sigma_P$ と胸部座標系 $\Sigma_T$ の設定

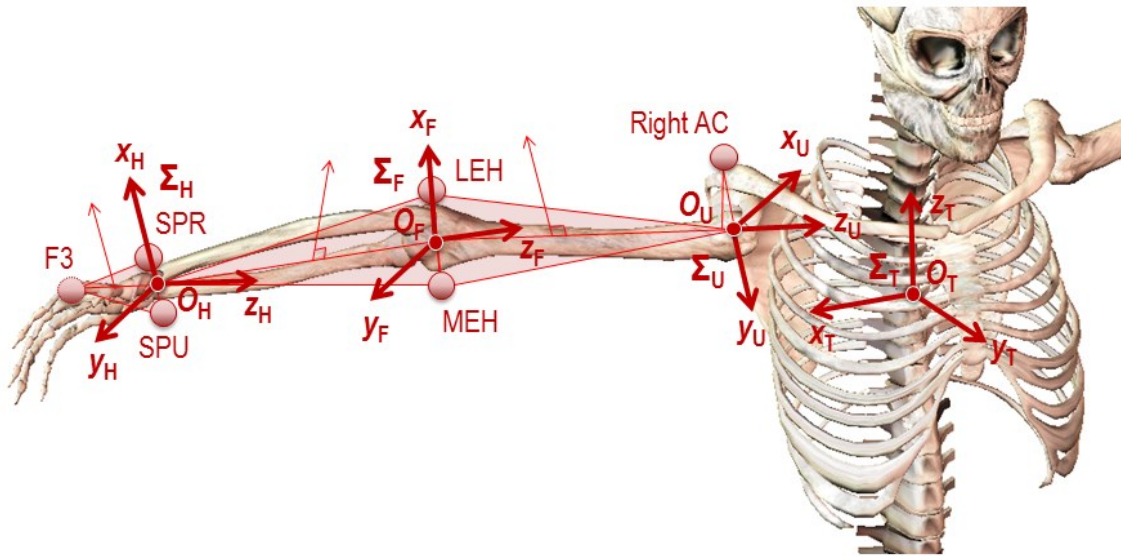


図4.4 上腕座標系  $\Sigma_U$  と前腕座標系  $\Sigma_F$ , 手部座標系  $\Sigma_H$  の設定

#### 4.5.2 関節角度の算出

関節角度の算出には、臨床で用いられる関節運動と類似した結果を比較的容易に算出することができ、解剖学的な角度表記と動力的解析との対応がよい Eulerian-sequence を用いた<sup>1-5)</sup>。それは対象とする座標系から親座標系への座標変換を用いて回転角度を計算し、それを関節角度とした。ここでは、骨盤、体幹、肩関節、肘関節、手関節の姿勢について述べる。

骨盤姿勢は、骨盤座標系  $\Sigma_P$  からカメラ座標系  $\Sigma_w$  への座標変換の回転行列を X-Y-Z のロール・ピッチ・ヨー軸の順で分解することで角度成分を計算した。骨盤姿勢は3自由度とし、X軸回りの前傾（プラス）／後傾（マイナス）、Y軸回りを右引下げ（プラス）／左引下げ（マイナス）、Z軸回りを左回旋（プラス）／右回旋（マイナス）とした。体幹姿勢は、胸部座標系  $\Sigma_T$  からカメラ座標系  $\Sigma_w$  への座標変換の回転行列を X-Y-Z のロール・ピッチ・ヨー軸の順で分解することで角度成分を計算した。体幹姿勢は3自由度とし、X軸回りの前傾（プラス）／後傾（マイナス）、Y軸回りを右引下げ（プラス）／左引下

げ（マイナス）， $Z$ 軸回りを左回旋（プラス）／右回旋（マイナス）とした．肩関節姿勢は，上腕座標系 $\Sigma_U$ から胸部座標系 $\Sigma_T$ への座標変換の回転行列を $X$ - $Y$ - $Z$ のロール・ピッチ・ヨー軸の順で分解することで角度成分を計算した．ただし，肩関節を胸部と上腕からなるボール・アンド・ソケット関節として仮定している．肩関節姿勢は3自由度とし， $X$ 軸回りの回転を水平外転（プラス）／水平内転（マイナス）， $Y$ 軸回りを外転（プラス）／内転（マイナス）， $Z$ 軸回りを外旋（プラス）／内旋（マイナス）とした．本論文における肩関節内転／外転角度，肩関節外旋／内旋と水平内転／水平外転角度は，臨床的な角度標記と一致している．肘関節姿勢は，前腕座標系 $\Sigma_F$ から上腕座標系 $\Sigma_U$ への座標変換の回転行列を $X$ - $Y$ - $Z$ のロール・ピッチ・ヨー軸の順で分解することで角度成分を計算した．肘関節姿勢は3自由度とし， $X$ 軸回りの回転を屈曲（プラス）／伸展（マイナス）， $Y$ 軸回りを外反（プラス）／内反（マイナス）， $Z$ 軸回りを回外（プラス）／回内（マイナス）とした．手関節姿勢は，手部座標系 $\Sigma_H$ から前腕座標系 $\Sigma_F$ への座標変換の回転行列を $X$ - $Y$ - $Z$ のロール・ピッチ・ヨー軸の順で分解することで角度成分を計算した．手関節姿勢は2自由度とし， $X$ 軸回りの回転を屈曲（プラス）／伸展（マイナス）， $Y$ 軸回りを橈屈（プラス）／尺屈（マイナス）とした．

#### 4.5.3 関節間力と関節モーメントの算出

投球動作中の肩関節と肘関節に加わる機械的ストレス（関節間力，関節間モーメント）を逆動力学的に推定するために，以下の仮定を導入する<sup>2)</sup>．

- (1) 体幹，上腕，前腕をそれぞれ一つの剛体とする．
- (2) 手部とボールは一体とみなし，剛体とする．
- (3) 肩関節と肘関節の回転自由度は3自由度とする．
- (4) 手関節の回転自由度は2自由度とする．



(5) 空気抵抗は無視する.

投球腕の肩関節と肘関節に加わる関節間力と関節モーメントはニュートン・オイラー法を用いて, 図4.5に示すように手関節, 肘関節, 肩関節の順に遠位から近位へと推定した1,2,6~15). まず, 関節間力の推定方法について述べる.

手関節中心  $O_H$  には, 手部から前腕部に関節間力  $F_w$  が作用する.

$$F_w = m_w \cdot \ddot{p}_w - m_w \cdot g \quad (\text{式 1})$$

ただし, 手部とボールの質量を  $m_w$ , カメラ座標系  $\Sigma_w$  に関する手部とボールの重心位置を  $p_w$  として時間による2階微分を  $\ddot{p}_w$ , 重力加速度を  $g = (0, 0, 9.80665)^T$  とした.

次に肘関節中心  $O_E$  には, 前腕部から上腕部に関節間力  $F_e$  が作用する.

$$F_e = m_e \cdot \ddot{p}_e - m_e \cdot g + F_w \quad (\text{式 2})$$

ただし, 前腕部の質量を  $m_e$ , カメラ座標系  $\Sigma_w$  に関する前腕部の重心位置を  $p_e$  として時間による2階微分を  $\ddot{p}_e$ , 重力加速度を  $g = (0, 0, 9.80665)^T$  とした.

最後に肩関節中心  $O_U$  には, 上腕部から胸部に関節間力  $F_s$  が作用する.

$$F_s = m_s \cdot \ddot{p}_s - m_s \cdot g + F_e \quad (\text{式 3})$$

ただし, 上腕部の質量を  $m_s$ , カメラ座標系  $\Sigma_w$  に関する上腕部の重心位置を  $p_s$  として時間による2階微分を  $\ddot{p}_s$ , 重力加速度を  $g = (0, 0, 9.80665)^T$  とした.

前腕部から上腕部に加わる関節間力  $F_e = (F_{e,x}, F_{e,y}, F_{e,z})$  は, 次の成分に分けることができる: 外側 (プラス) と内側 (マイナス) 方向の成分  $F_{e,x}$ , 前方 (プラス) と後方 (マイナス) の成分  $F_{e,y}$ , 近位 (プラス) と遠位 (マイナス) 方向の成分  $F_{e,z}$ . 同様に, 上腕部から胸部に加わる関節間力  $F_s = (F_{s,x}, F_{s,y}, F_{s,z})$  は, 次の成分に分けることができる: 上方 (プラス) と下方 (マイナス) 方向の成分  $F_{s,x}$ , 前方 (プラス) と後方 (マイナス) の成分  $F_{s,y}$ , 近位 (プラス) と遠位 (マイナス) 方向の成分  $F_{s,z}$ .

次に, 関節モーメントの推定方法について述べる. 手関節中心  $O_H$  に作用する手関節モーメント  $M_w$  は, 式4から求めた.

$$\mathbf{M}_w = (\mathbf{I}_w \cdot \boldsymbol{\omega}_w + \boldsymbol{\omega}_w \times \mathbf{I}_w \cdot \boldsymbol{\omega}_w) - \mathbf{r}_{w,p} \times \mathbf{F}_w \quad (\text{式 4})$$

ただし、 $\mathbf{r}_{w,p}$ は手部の重心位置から $O_H$ へ向かうベクトル、 $\boldsymbol{\omega}_w$ はカメラ座標系 $\Sigma_w$ に関する手部の角速度、 $\mathbf{I}_w$ は手部の慣性テンソルとする。

肘関節中心 $O_F$ に作用する肘関節モーメント $\mathbf{M}_e$ は、式5から求めた。

$$\mathbf{M}_e = (\mathbf{I}_e \cdot \boldsymbol{\omega}_e + \boldsymbol{\omega}_e \times \mathbf{I}_e \cdot \boldsymbol{\omega}_e) - \mathbf{r}_{e,p} \times \mathbf{F}_e + \mathbf{r}_{e,d} \times \mathbf{F}_w + \mathbf{M}_w \quad (\text{式 5})$$

ただし、 $\mathbf{r}_{e,p}$ は前腕部の重心位置から $O_F$ へ向かうベクトル、 $\mathbf{r}_{e,d}$ は前腕部の重心位置から $O_H$ へ向かうベクトル、 $\boldsymbol{\omega}_e$ はカメラ座標系 $\Sigma_w$ に関する前腕部の角速度、 $\mathbf{I}_e$ は前腕部の慣性テンソルとする。

最後に、肩関節中心 $O_U$ に作用する肩関節モーメント $\mathbf{M}_s$ は、式6から求めた。

$$\mathbf{M}_s = (\mathbf{I}_s \cdot \boldsymbol{\omega}_s + \boldsymbol{\omega}_s \times \mathbf{I}_s \cdot \boldsymbol{\omega}_s) - \mathbf{r}_{s,p} \times \mathbf{F}_s + \mathbf{r}_{s,d} \times \mathbf{F}_e + \mathbf{M}_e \quad (\text{式 6})$$

ただし、 $\mathbf{r}_{s,p}$ は上腕部の重心位置から $O_U$ へ向かうベクトル、 $\mathbf{r}_{s,d}$ は上腕部の重心位置から $O_F$ へ向かうベクトル、 $\boldsymbol{\omega}_s$ はカメラ座標系 $\Sigma_w$ に関する上腕部の角速度、 $\mathbf{I}_s$ は上腕部の慣性テンソルとする。各体節の質量、重心位置、慣性テンソルは、阿江ら<sup>16)</sup>による日本人アスリートを対象としたデータに基づいて対象の年齢毎に算出した。

肘関節中心 $O_F$ に作用する肘関節モーメント $\mathbf{M}_e = (M_{e,x}, M_{e,y}, M_{e,z})$ は、次の成分に分けることができる：伸展（プラス）と屈曲（マイナス）方向の関節モーメント $M_{e,x}$ 、内反（プラス）と外反（マイナス）の関節モーメント $M_{e,y}$ 、回内（プラス）と回外（マイナス）方向の関節モーメント $M_{e,z}$ 。同様に肩関節中心 $O_U$ に作用する肩関節モーメント $\mathbf{M}_s = (M_{s,x}, M_{s,y}, M_{s,z})$ は、次の成分に分けることができる：水平内転（プラス）と水平外転（マイナス）方向の関節モーメント $M_{s,x}$ 、内転（プラス）と外転（マイナス）方向の関節モーメント $M_{s,y}$ 、内旋（プラス）と外旋（マイナス）方向の関節モーメント $M_{s,z}$ 。

本論文で推定した関節間力と関節モーメントは、遠位の体節から近位の体節に加わるものとして扱う。また、関節間力は、関節面と軟部組織を含む関節全体に加わる力として、方向を持つベクトルとして扱う。関節モーメントは、各体節を剛体と仮定して推定

したものであり，関節周りのモーメントの総和を意味している．したがって，実際の各筋が各関節周りで発揮しているモーメントとは異なる．本論文における関節モーメントは，外部モーメントとして表す．

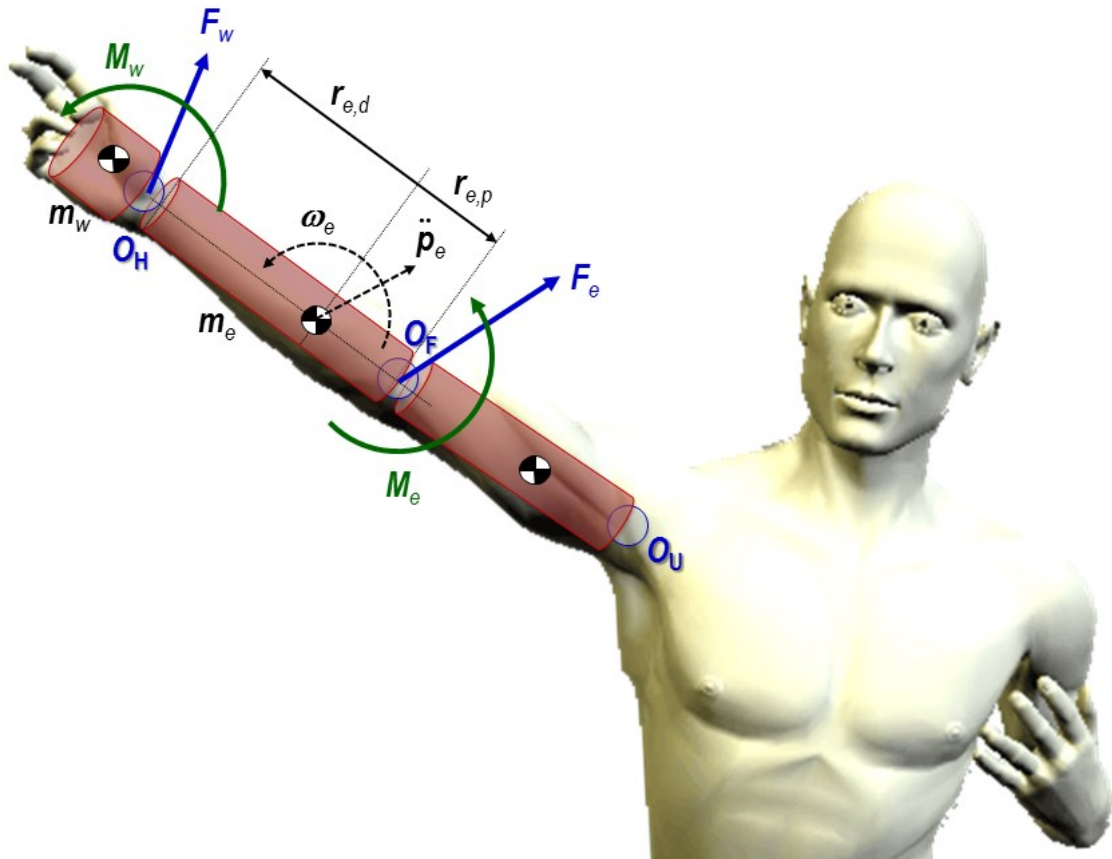


図4.5 関節モーメントの計算 (肘関節モーメント  $M_e$  を求める場合)

## 参考文献

- 1) 江原義弘, 別府政敏 他: 投球時における肩の負荷の力学的分析. バイオメカニズム 14: 39-48, 1998
- 2) 中村康雄, 中村真里 他: 肩甲帯を考慮した投球動作中の肩関節運動の運動学・動力学的解析. 日本臨床バイオメカニクス学会誌 25: 235-241, 2004
- 3) Wu G, Siegler S et al: ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion--part I: ankle, hip, and spine. International Society of Biomechanics. J Biomech. 35: 543-548, 2002
- 4) Wu G, van der Helm FCT et al: 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. J Biomech. 38: 981-992, 2005
- 5) Zatsiorsky VM: Kinematics of human motion. Human Kinetics, 1997
- 6) David A. Winter 著, 長野明紀, 吉岡伸輔 訳: バイオメカニクス 人体運動の力学と制御. 原著第4版, ラウンドフラット, 2011
- 7) Feltner ME, Dapena J: Dynamics of the shoulder and elbow joints of the throwing arm during a baseball pitch. Journal of Applied Biomechanics 2: 235-259, 1986
- 8) Feltner ME, Dapena J: Three-dimensional interactions in a two-segment kinetic chain: Part I . General model, International Journal of Sport Biomechanics 5, 403-419, 1989
- 9) Feltner ME: 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, 420-450, 1989
- 10) Fleisig GS, Escamilla R et al: Kinematic and kinetic comparison between baseball pitching and football passing. Journal of Applied Biomechanics 12: 207-224, 1996

- 11) Fleisig GS, Andrews JR et al: Kinetics of baseball pitching with implications about injury mechanisms. *Am J Sports Med.* 23: 233-239, 1995
- 12) Fleisig GS, Barrentine SW et al: Kinematic and kinetic comparison of baseball pitching among various levels of development. *Journal of Biomechanics* 32: 1371-1375, 1999
- 13) Stodden DF, Fleisig GS et al: Relationship biomechanical factors baseball pitching velocity: within pitcher variation. *Journal of Applied Biomechanics* 21: 44-56, 2005
- 14) Werner SL, Fleisig GS et al: Biomechanics of the elbow during baseball pitching. *J Orthop Sports Phys Ther.* 17: 274-278, 1993
- 15) Zatsiorsky VM: Kinetics of human motion. *Human Kinetics*, 2002
- 16) 阿江良通, 湯海鵬 他: 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定. *バイオメカニズム* 11: 23-33, 1992

## 第5章 成長期野球選手の3次元投球動作解析による動力学・運動学的検討<sup>1)</sup>

### 5.1 はじめに

投球中に肩・肘関節に生じるメカニカルストレスについて運動学的・動力学的に分析する研究は、1980年代後半から行われている<sup>2,3)</sup>。1990年代後半からは、高速度ビデオカメラやモーションキャプチャー・システム等、撮影装置の進歩と普及に伴って多くの報告が行われ<sup>4-7)</sup>、2000年代からは米国において成長期野球選手を対象にした検討が行われ<sup>8),9)</sup>、適切な投球動作の指導に沿った動作項目を定義し、その項目を数多くクリアした選手ほど球速に対する肩・肘関節へのメカニカルストレスが小さかったということが明らかにされている。

投球動作は、運動連鎖の観点から次の順でボールに速度を与える複合的な全身動作である。(1) 骨盤・下肢(下半身)の運動による目標への並進移動(投球上肢のコッキングも同時に行われる)。(2) 足の着地によって並進移動の急停止。(3) 並進移動によって得られた運動エネルギーを上半身の回転運動に変換。(4) 回転運動の速度が高まった投球上肢からボールを放つ。このようなピッチングメカニクスを生体力学的に分析したこれまでの研究は、米国で散見されるが、特に小学生を含めた幅広い年齢を対象とした研究報告は国内も含め十分とは言えない。そこで、我が国における成長期野球選手の投球動作を運動学・動力学的に分析し、投球障害の予防や適切な投球指導法を確立するための客観的データを整理する必要があると考えた。本論文では、成長期における投球障害で発生率の高い肘関節内側障害に焦点をあて、光学式モーションキャプチャー・システムを用いた3次元投球動作解析データに基づき、成長期における投球肘障害の予防に関する研究を行った。

成長期野球選手の投球肘障害は、投球技術や投球数、身長や体重などの発育、運動発達、疲労を含むコンディションなどの要因が複合的に影響し発生する。投球肘障害を念頭にした現場の指導では、肘下がりなど上肢の使い方が主として行われている。しかし、全身運

動である投球動作指導は、ストライドや体幹回旋運動も重要な指導ポイントである。また、3次元動作解析によるこれまでの研究は、対象がプロ選手や大学生が多く小・中学生を対象とした研究は少ない。

これまでに小学生と高校生の3次元投球動作解析を比較した結果、小学生では加速期における体幹の回旋運動量が小さく、投球初期からの体幹後傾や胸部回旋の始動が早く、上肢に依存した投球動作であることを報告した<sup>10)</sup>。更に、小学生の肘内側関節間力球速比(投球の効率性)の低い群(効率性が良い)と高い群(効率性が悪い)の投球動作解析を比較した結果、肘内側関節間力球速比が低い群では体幹の推進力や回旋運動量が優れており、肘内側関節間力球速比が高い群では肩内旋、肘伸展運動が優位となる上肢に依存した投球動作であることを報告した<sup>11)</sup>。

そこで本研究では、小学生、中学生、高校生の各年代の投球動作を比較してその特徴を捉え、成長期に習得すべき投球動作の知見を得ることを目的とした。特に今回は下肢のステップ動作と骨盤、胸部の姿勢や体幹回旋動作について検討した。各年代間(3群間)の比較とともに投球肘障害に影響を与える肘外反モーメントを体格や球速で除して標準化し、肘外反モーメントの各指標と年齢との相関と各肘外反モーメント指標に影響を与える運動学的因子を明らかにするために多変量解析により検討した。

## 5.2 対象

対象は、全例右投げで小学生38名、中学生36名、高校生78名の男子野球選手152名で、計測当日に肩、肘関節等に運動器の障害がなく、痛みなく全力投球が可能な選手とした。対象とした3群の年齢、野球歴、身長、体重、球速などの基本情報を表5.1に示す。

表 5.1 対象のプロフィール

	小学生 (n = 38)	中学生 (n = 36)	高校生 (n = 78)	有意差
年齢 (歳)	11.3 ± 0.5	13.6 ± 0.9	16.6 ± 0.7	** (a,b,c)
野球歴 (年)	2.4 ± 1.2	5.0 ± 1.8	7.1 ± 1.9	** (a,b,c)
身長 (cm)	148.0 ± 8.2	167.2 ± 8.6	175.0 ± 5.8	** (a,b,c)
体重 (kg)	41.2 ± 8.2	56.6 ± 9.4	69.9 ± 7.5	** (a,b,c)
球速 (km/h)	82.2 ± 7.4	103.4 ± 10.1	115.8 ± 6.9	** (a,b,c)

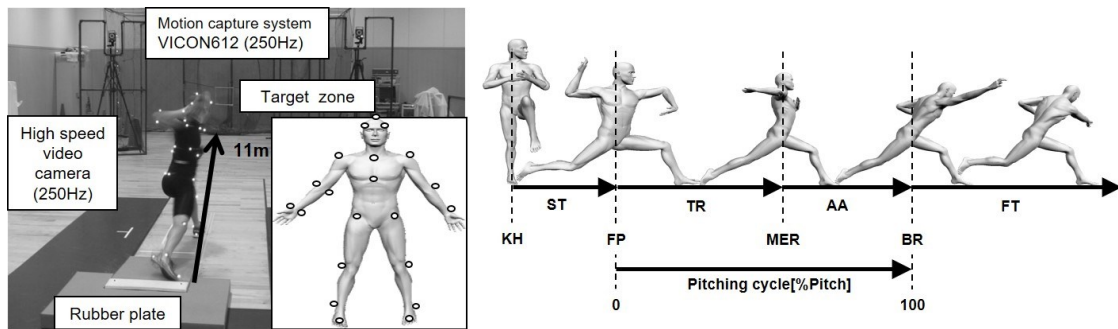
3群間の比較: (a) 小学生と中学生, (b) 小学生と高校生, (c) 中学生と高校生 (平均 ± 標準偏差)  
 \*\*: p < 0.01

### 5.3 方法

#### 5.3.1 投球動作の3次元測定

測定機器は、6台の赤外線カメラを備えたモーションキャプチャー・システム VICON (VICON612, Vicon Motion Systems UK) と2台の高速度ビデオカメラ (HSV-500C<sup>3</sup>, NAC Image Technology Inc. Japan) を使用した。サンプリング周波数は 250Hz とし、身体上の特徴点 30 箇所反射マーカを貼付した (図 5.1.a.)。投球試技は、プレートから 11.0m 先に地面から高さ 1.0m の位置に設置した的 (0.4m × 0.4m) へ直球を全力投球させ、その球速をスピードガン (Stalker Pro, Radar Sports, USA) で計測した。分析した試技は、的を通過した 5 試技以上の中で球速が最も速い試技を採用した。





a. 測定環境と反射マーカの貼付位置

b. 投球動作の位相

図 5.1 投球動作の測定環境と位相

Knee High(KH), Stride(ST), Foot Plant(FP), Trunk Rotation(TR), Maximum External Rotation(MER), Arm Acceleration(AA), Ball Release(BR), Follow-Through(FT)

### 5.3.2 投球動作の分析

投球動作は、モーションキャプチャー・システムのデータと高速度ビデオカメラの映像を基にして特定した<sup>12,13)</sup>。(1) 踏込み脚の膝が最高位に到達 (Knee high, KH), (2) 踏込み脚の足底全接地 (Foot plant, FP), (3) 投球側肩関節最大外旋位 (Maximum external rotation of the shoulder, MER), (4) ボールリリース (Ball release, BR). 分析区間は局面 KH から BR までとし、ピッチングサイクル(単位:%Pitch)は FP (0%Pitch) ~BR (100%Pitch) までの区間とした (図 5.1.b.) .

モーションキャプチャー・システムから得られたデータは、動力学と運動学の観点から次のように分析した. 動力的分析項目は肘関節の最大外反モーメント (外部モーメント) とした. 関節モーメントはボールを含む手部の末端から体幹に至るまでの上肢の剛体リンクモデルを作成し, ニュートン・オイラー法を用いて逆動力的解析により算出した<sup>12)</sup>. 算出に用いる各体節の係数は, 阿江<sup>13)</sup>の身体部分慣性係数に準じた. 肘外反モーメントは, Fleisig ら<sup>6)</sup>, Sabick ら<sup>8)</sup>に準じて身長と体重で除して標準化し, 更に Davis ら<sup>9)</sup>に準じて球速で除して標準化肘外反モーメント球速比を算出し, 投球効率の

評価とした。また、運動学的分析項目として、FP から BR までの地面に対する骨盤の角度、骨盤に対する胸部の角度、胸部回旋角度と骨盤回旋角度の差を表す体軸内回旋角度、胸部と骨盤の投球方向への推進速度や角速度、肘、肩関節の角度と角速度、手関節、肘関節中心の移動速度を評価した。ストライドは、軸足の関節中心（第3中足骨背側マーカと踵骨マーカを結んだ線に腓骨外果マーカを投影した点；図 5.2）から踏み込み足の関節中心の距離をストライド長、投球方向に対する踏み込み足の関節中心までの距離をストライド幅として評価した。ストライド幅によって、軸足から踏み込み足が的に向かって真っすぐに踏み込んだものを **straight step**、非投球側に踏み込んだものを **open step**、投球側に踏み込んだものを **closed step**（図 5.3）とした。運動方向は、**closed step (+)**、**open step (-)**、肘関節屈曲 (+)、伸展 (-)、肩関節外転・外旋・水平外転 (+)、内転・内旋・水平内転 (-)（図 5.4）、骨盤と胸部は前傾・投球側側屈・非投球側回旋 (+)、後傾・非投球側側屈・投球側回旋 (-) と定義した（図 5.5）。関節角度は、立位静止時の姿勢を基準として補正した。ピッチングサイクルに準じた推進速度と関節角速度の最高値の出現時期についても評価した。

本研究は、新潟県健康づくり・スポーツ医科学センターの倫理審査委員会の承認を得て（承認番号：34）行った。対象者には実施前に本研究の趣旨を十分に説明し、本人ならびに保護者の同意を得て行った。

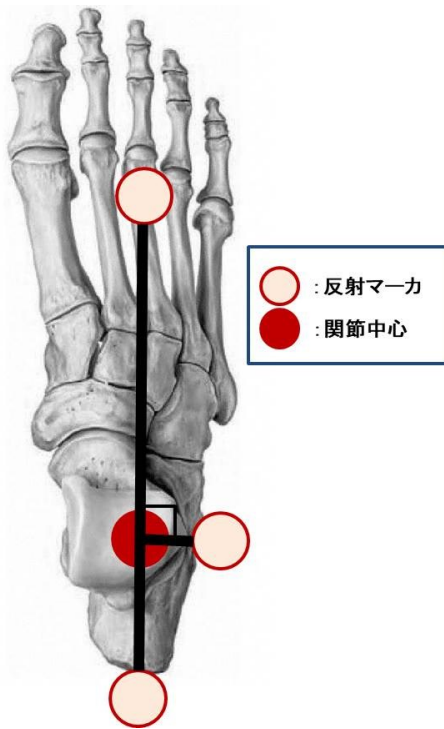


図 5.2 足関節中心の定義

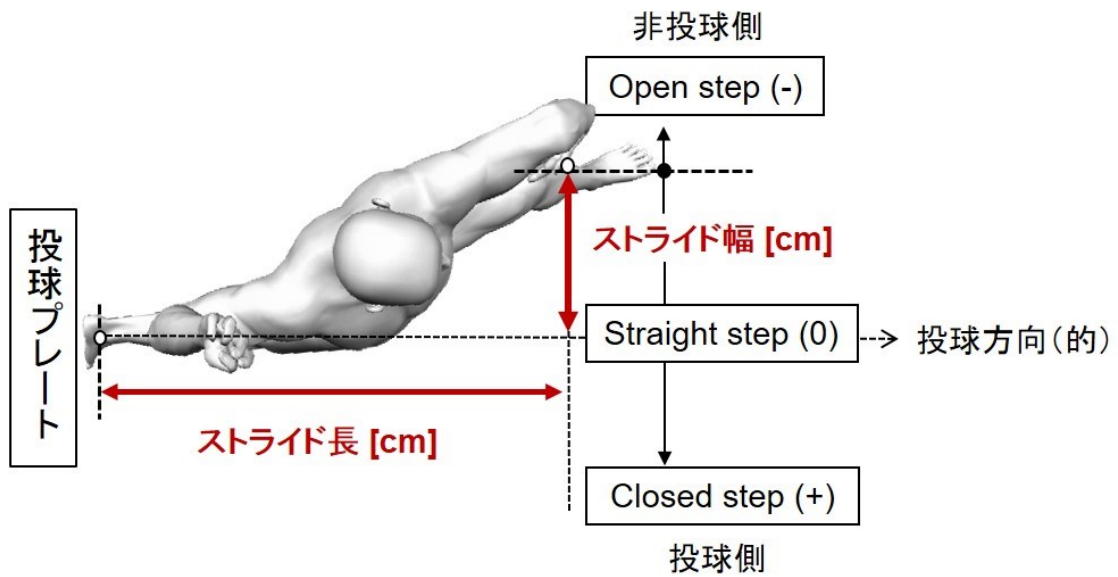


図 5.3 ストライド長とストライド幅の定義

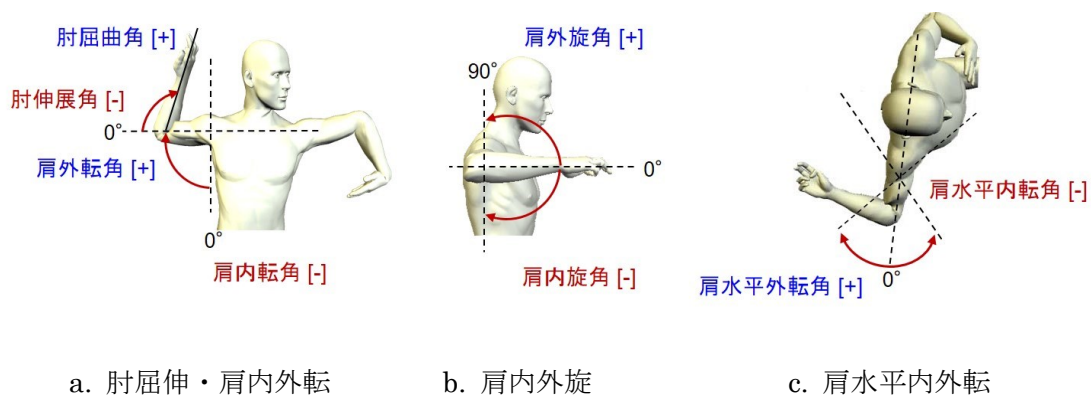


図 5.4 肘・肩関節の運動方向の定義

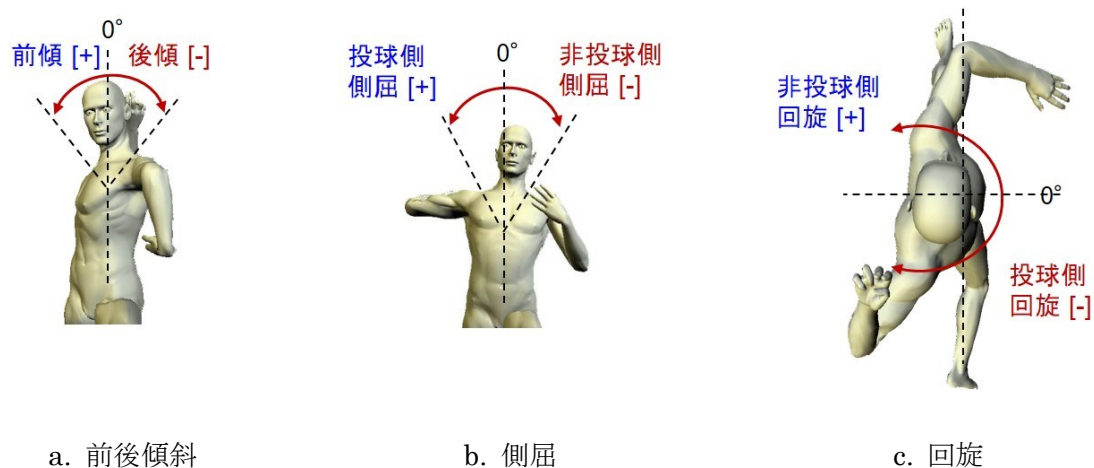


図 5.5 骨盤・胸部の運動方向の定義

### 5.3.3 統計学的データ分析

3 群間の分析項目については、多重比較検定 Tukey-Kramer 法で比較した。肘外反モーメントの指標と年齢との相関分析は Pearson の積率相関係数、標準化肘外反モーメント球速比に対する運動学的評価項目との多変量解析は、Stepwise 法による重回帰分析で検討した。有意水準は 5% ( $\alpha=5\%$ ) とした。

## 5.4 結果

### 5.4.1 肘関節外反モーメントの3群間の比較

肘外反モーメントは、成長に伴い有意に大きくなるが、身長と体重で除した標準化肘外反モーメントでは中学生が有意に高く、小学生と高校生間には有意差を認めなかった。標準化肘外反モーメント球速比では高校生が有意に低く、小学生と中学生間に有意差を認めなかった（表 5.2）。

表 5.2 3群間の動力学データ

	小学生 (n = 38)	中学生 (n = 36)	高校生 (n = 78)	有意差
肘外反モーメント (Nm)	24.8 ± 7.5	43.7 ± 12.9	49.6 ± 11.6	** <sup>(a,b)</sup> * <sup>(c)</sup>
標準化 肘外反モーメント (BWHT)	0.041 ± 0.009	0.048 ± 0.014	0.042 ± 0.009	* <sup>(a,c)</sup> NS <sup>(b)</sup>
標準化 肘外反モーメント球速比 (BWHT/BV)	0.0005 ± 0.0001	0.0005 ± 0.0001	0.0004 ± 0.00007	** <sup>(b)</sup> * <sup>(c)</sup> NS <sup>(a)</sup>

3群間の比較: (a) 小学生と中学生, (b) 小学生と高校生, (c) 中学生と高校生  
 \*\*:  $p < 0.01$ , \* :  $p < 0.05$ , NS: 有意差なし

(平均 ± 標準偏差)

### 5.4.2 肘関節外反モーメントの指標と年齢との相関

肘外反モーメントの指標と年齢との相関分析の結果、肘外反モーメント (Nm) と年齢には正の相関 ( $r = 0.69$ ,  $p < 0.01$ ) を認めた (図 5.6)。標準化肘外反モーメント (BWHT) と年齢には相関 ( $r = -0.02$ ,  $p = 0.78$ ) を認めなかった (図 5.7)。標準化肘外反モーメント球速比 (BWHT/BV) と年齢には負の相関 ( $r = -0.53$ ,  $p < 0.01$ ) を認めた (図 5.8)。

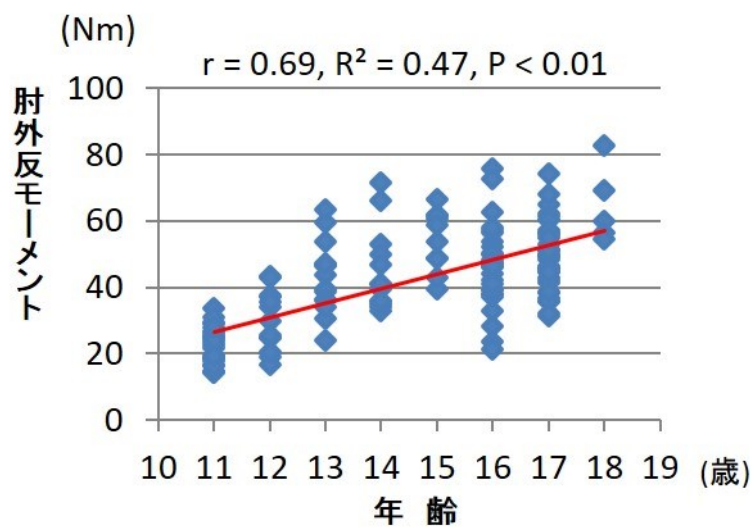


図 5.6 肘外反モーメントと年齢との相関

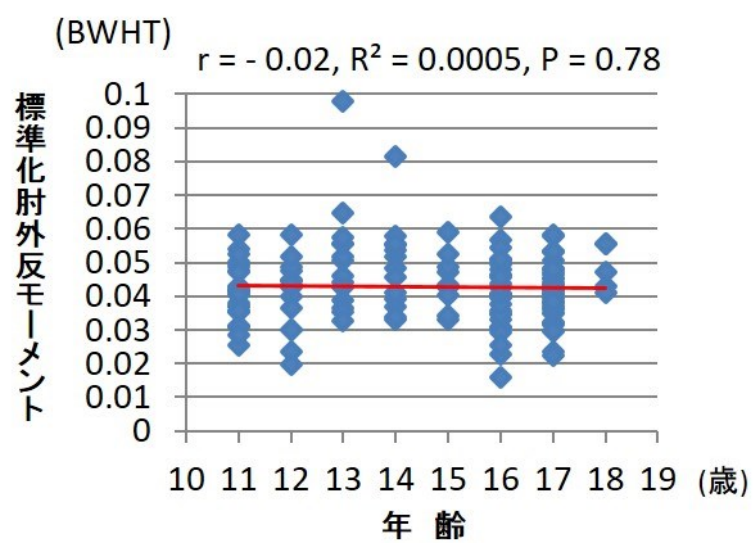


図 5.7 標準化肘外反モーメントと年齢との相関

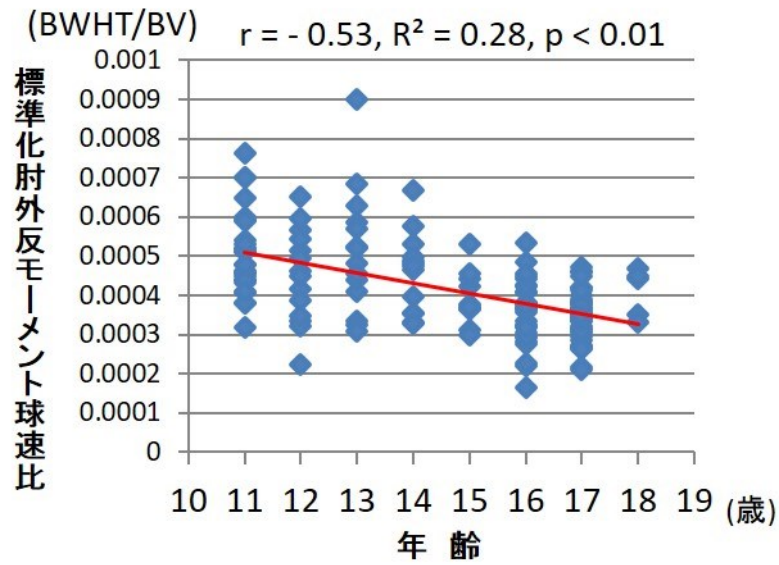


図 5.8 標準化肘外反モーメント球速比と年齢との相関

#### 5.4.3 ストライドと骨盤・胸部・体軸内回旋角度について

ストライド長は成長に伴い有意に大きくなるが、身長による標準値では3群間に有意差を認めなかった。ストライド幅は小学生が非投球側に有意に大きく open step していた。FP における骨盤、胸部の回旋角度は3群間に有意差を認めなかったが、体軸内回旋角度は高校生が有意に小さかった (表 5.3)。

表 5.3 3 群間の運動学データ

	小学生 (n = 38)	中学生 (n = 36)	高校生 (n = 78)	有意差
ストライド長 (cm)	119.4 ± 9.8	137.6 ± 13.2	146.1 ± 12.0	** (a,b,c)
ストライド長 (%BH)	80.8 ± 6.4	82.2 ± 6.2	83.4 ± 6.3	
ストライド幅 (cm)	- 6.6 ± 11.0	0.8 ± 9.1	0.1 ± 8.1	** (a,b)
骨盤回旋角度 @FP (deg.)	40.7 ± 10.9	38.5 ± 15.4	43.6 ± 10.9	
胸部回旋角度 @FP (deg.)	14.9 ± 12.0	12.3 ± 15.8	9.1 ± 13.6	
体軸内回旋角度 @FP (deg.)	- 24.1 ± 9.8	- 25.1 ± 8.1	- 32.8 ± 8.4	** (b,c)

3群間の比較: (a) 小学生と中学生, (b) 小学生と高校生, (c) 中学生と高校生 (平均 ± 標準偏差)  
 \*\*: p < 0.01

#### 5.4.4 骨盤・胸部の推進速度と回旋角速度及び最高値の出現時期について

小学生に対して中学生, 高校生の骨盤推進速度 (Pelvis-center driving velocity, PCDV), 胸部推進速度 (Thorax-center driving velocity, TCDV) は有意に速かったが, 骨盤回旋角速度 (Pelvis horizontal rotation angular velocity, PHRAV), 胸部回旋角速度 (Thorax horizontal rotation angular velocity, THRAV) には有意差を認めなかった. 最高速度の出現時期は, 3群間に有意差を認めなかった. しかし, TCDV 最高値の出現については, 小学生は FP 前に出現していたのに対して中学生と高校生は FP 後に出現していた (表 5.4, 図 5.9)



表 5.4 3 群間の骨盤・胸部の推進速度とピッチングサイクル

	小学生(n = 38)	中学生 (n = 36)	高校生 (n = 78)	有意差
骨盤推進速度 [PCDV] (km/h)	2.2 ± 0.2	2.5 ± 0.3	2.5 ± 0.3	** (a,b)
胸部推進速度 [TCDV] (km/h)	3.0 ± 0.3	3.5 ± 0.4	3.6 ± 0.4	** (a,b)
骨盤回旋角速度 [PHRAV] (deg/s)	644.3 ± 85.1	627.8 ± 88.3	654.4 ± 81.9	
胸部回旋角速度 [THRAV] (deg/s)	1016.3 ± 169.5	1026.5 ± 153.9	1071.3 ± 175.1	
最高PCDV [%Pitch]	-18.6 ± 18.4	-21.0 ± 16.5	-28.2 ± 15.2	
最高TCDV [%Pitch]	-5.5 ± 15.3	1.4 ± 15.6	5.7 ± 15.3	
最高PHRAV [%Pitch]	15.9 ± 16.4	14.7 ± 16.3	8.9 ± 16.4	
最高HRAV [%Pitch]	52.6 ± 11.5	50.1 ± 11.1	47.5 ± 11.7	

3群間の比較: (a) 小学生と中学生, (b) 小学生と高校生, (c) 中学生と高校生 (平均 ± 標準偏差)  
 \*\*: p < 0.01

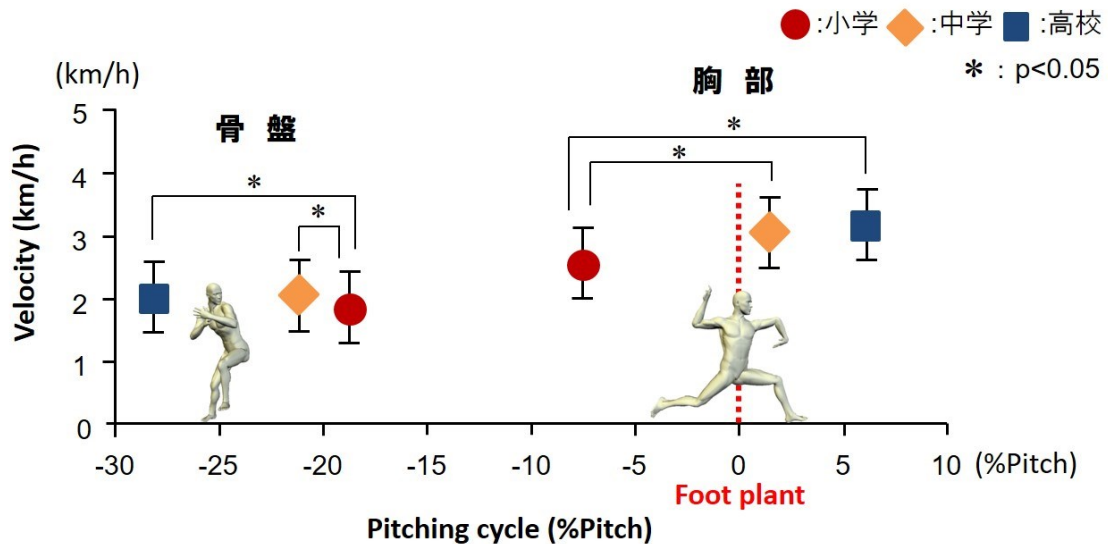


図 5.9 骨盤・胸部の推進最高速度の出現時期

#### 5.4.5 標準化肘外反モーメント球速比と運動学的評価項目との重回帰分析について

Stepwise 法による重回帰分析は、投球動作時の肘関節に加わる最大肘外反モーメントを体格と球速で標準化した投球動作の効率性の指標を従属変数とし、ストライド長・幅と FP・MER 時の骨盤・胸部の回旋・側屈・前後傾斜角度，肩外転・回旋・水平外転角度，肘屈曲角度 22 項目を独立変数とした。解析の結果， $p < 0.01$ ， $R^2 = 0.36$  でストライド長，FP 時の肘屈曲角度，MER 時の胸部・骨盤回旋角度，ストライド幅の順に 5 項目が選択された（表 5.5）。尚，独立変数のための重回帰分析に先行し，相関行列表から  $|r| > 0.9$  存在が無いこと，VIF（variance inflation factor; 分散インフレ係数）が 1.06~1.89 で  $VIF < 10$  を確認した。更に残差の正規性を Shapiro-Wilk 検定により確認し，Durbin-Watson = 2.03 により残差がランダムであることを確認した。

表 5.5 標準化肘外反モーメント球速比の重回帰分析（Stepwise 法）

独立変数	標準偏回帰係数	有意確率	95%信頼区間		VIF
			下限	上限	
ストライド長	-0.32	0.00	-3.3E-4	-1.3E-4	1.10
肘屈曲角度(FP)	-0.29	0.00	-2.0E-6	-8.8E-7	1.06
胸部回旋角度(MER)	0.39	0.00	2.0E-6	6.0E-5	1.74
骨盤回旋角度(MER)	-0.30	0.00	-7.0E-6	-2.0E-6	1.89
ストライド幅	-0.17	0.02	-4.0E-6	-3.5E-7	1.17

#### 5.5 考察

本研究では，1 回の投球が肘関節にもたらす負担の指標を MER 時の肘外反モーメントとして評価し，投球パフォーマンスの指標を球速として評価した。制球力については，的を通過させることを条件として規定した。今回の検討では，特にストライド期のステップと骨盤，胸部の体幹の使い方に注目し分析を行った。先行研究では，球速の増加に伴い肩，

肘関節の関節トルクや関節間力が増加することが報告されている<sup>7,8)</sup>。よって球速が速く、肘関節外反モーメントが小さい選手は、下肢、体幹から上肢末端部へ順次加算されていく効率的な運動連鎖を使った投球動作で、技術的に優れていると判断した。今回の結果、球速や年齢に伴い、各年代間の肘関節外反モーメントは有意な増加（年齢と正の相関）を示した。しかし、身長と体重で除した標準化肘外反モーメントで比較すると小学生と高校生間には有意な差がない（年齢と無相関）ことや、投球の効率性の指標となる標準化肘外反モーメント球速比で比較すると高校生が小学生と中学生に比べて有意に減少（年齢と負の相関）していたことから、投球技術は、競技歴や成長に伴い向上し、高校生が最も高いと考えられた。そこで、投球の効率性に影響を与える要因を明らかにするため多変量解析を行った。その結果、狭いストライド長と過度な open step、MER 時の過度な胸部回旋と不十分な骨盤回旋、foot plant 時の不十分な肘屈曲が投球の効率性を低下させることが明らかとなり、投球フォームのチェックポイントとして有用と考えられた。

体幹回旋機能の特徴として、foot plant 時の骨盤と胸部の体軸内回旋角度が大きい高校生は、小学生と中学生に比べ体幹の回旋運動が優れていると考えられた。また、骨盤と胸部の推進最高速度の出現時期の特徴として、小学生では骨盤と胸部の推進最高速度の出現時期の時間差が小さく、更に胸部推進最高速度の出現時期が小学生では foot plant 前に出現し、中学生と高校生では foot plant 後に出現していたことから、ストライド期の体重移動においても骨盤、胸部の体軸内回旋が未熟であると考えられた。よって、下部体幹（骨盤）と上部体幹（胸部）の体軸内回旋を促すことが重要と考えられた。ステップの特徴としては、中学生と高校生が軸足と踏込み足が投球方向に一致するのに対して、小学生は非投球側に open step しており、いわゆる体の開きにつながるものと推察された。

投球時の体幹回旋機能は、骨盤と胸部が一体化するより、分離して回旋する投球動作が技術的に高く<sup>14)</sup>、体幹の動きと肩、肘への負担との関連性については、骨盤、体幹の回旋を始めるタイミングや回旋最高速度の出現時期と関係しているとされている<sup>15,16)</sup>。また、

open step や体の開きは肩，肘関節への力学的負担が大きいとされている<sup>9)</sup>。よって，小学生の早い段階でストライド期の体重移動において非投球側の殿部から投球方向に移動する，いわゆるヒップファーストの習得や胸部の早期からの非投球側回旋，いわゆる体の開の抑制，軸足と踏み込み足を投球方向に一致させたステップ，骨盤，胸部の体軸内回旋運動の習得が必要であると考えられた。これらの動作を改善する対策としては，既に即時効果が検証されている **throwing lunge drill**<sup>17)</sup>や座位シャドー<sup>18)</sup>などの積極的な競技現場への導入が必要と考えられ，更に多くのドリルの考案が待たれる。

適切な投球技術は，早期年代からの習得が推奨されており<sup>7)</sup>，小学生年代での習得は，未成熟な骨端軟骨への負担の軽減と共に投球障害予防につながるものと考えられ，投球数や登板間隔などの制限と共に重要である。

## 5.6 結語

成長期の投球障害予防を念頭に各年代の投球動作の特徴を運動学的に比較検討し，成長期に習得すべき投球技術の知見を得ることを目的とした。小学生のストライド幅は，非投球側に open step し，中学生と高校生では軸足と踏み込み足が投球方向に一致する傾向にあった。Foot plant における骨盤と胸部の体軸内回旋は高校生で大きく，小学生と中学生では体幹の体軸内回旋が未熟な傾向にあった。胸部推進最高速度は，小学生では foot plant 前に，中学生と高校生では foot plant 後に出現しており，成長に伴い骨盤推進最高速度は早期に，胸部推進最高速度は遅延して出現する傾向にあった。また，多変量解析により投球の効率性を低下させる投球フォームのチェックポイントとして，ストライド長，MER 時の胸部・骨盤回旋角度，foot plant 時の肘屈曲角度，ストライド幅の影響因子が明らかとなった。

## 参考文献

- 1) 田中正栄, 大森豪 他: 成長期野球選手の投球動作におけるステップ幅と体幹回旋角度の特徴. 日本臨床バイオメカニクス学会誌 38: 361-366, 2017
- 2) Pappas AM, Zawacki RM et al: Biomechanics of baseball pitching: A preliminary report. Am J Sports Med. 13: 216-222, 1985
- 3) Feltner ME, Dapena J: Dynamics of the shoulder and elbow joints of the throwing arm during a baseball pitch. Journal of Applied Biomechanics 2: 235-259, 1986
- 4) Dillman CJ, Fleisig GS et al: Biomechanics of pitching with emphasis upon shoulder kinematics. J Orthop Sports Phys Ther. 18: 402-408, 1993
- 5) Werner SL, Fleisig GS et al: Biomechanics of the elbow during baseball pitching. J Orthop Sports Phys Ther. 17: 274-278, 1993
- 6) Fleisig GS, Andrews JR et al: Kinetics of baseball pitching with implications about injury mechanisms. Am J Sports Med. 23: 233-239, 1995
- 7) Fleisig GS, Barrentine SW et al: Kinematic and kinetic comparison of baseball pitching among various levels of development. Journal of Biomechanics 32: 1371-1375, 1999
- 8) Sabick MB, Torry MR et al: Valgus torque in youth baseball pitchers: A biomechanical study. Journal of Shoulder and Elbow Surgery 13: 349-355, 2004
- 9) Davis JT, Limpisvasti O et al: The effect of pitching biomechanics on the upper extremity in youth and adolescent baseball pitchers. Am J Sports Med. 37: 1484-1491, 2009
- 10) 田中正栄, 西野勝敏 他: 三次元投球動作解析から見た成長期野球選手の投球動作の特徴についての検討. J. sports Injury 18: 23-26, 2013
- 11) 田中正栄, 西野勝敏 他: 球速比関節感力による小学生投球運動解析の検討. 日本臨床

バイオメカニクス学会誌 36: 41-245, 2015

- 12) 中村康雄, 林豊彦 他: 投球フォームとボール・リリース時の肩関節負荷. バイオメカニズム 17: 123-132, 2004
- 13) 阿江通良: 日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数. Jpn. J. Sports. Science 15: 155-62, 1996
- 14) Stodden DF, Langendorfer SJ et al: Kinematic constraints associated with the acquisition of overarm throwing part 1: step and trunk actions. RQES77: 417-427, 2006
- 15) Aguinaldo AL, Chambers H et al: Correlation of throwing mechanics with elbow valgus load in adult baseball pitchers. Am J Sports Med. 37: 2043-2048, 2009
- 16) Oyama S, Yu B et al: Improper trunk rotation sequence is associated with increased maximal shoulder external rotation angle and shoulder joint force in high school baseball pitchers. Am J Sports Med. 42: 2089-2094, 2014
- 17) 元脇周也, 小柳磨毅 他: 投球障害症例に対する投球フォーム指導の効果 — 体幹回旋運動における定量的評価を用いた検証 —. J. sports Injury18: 27-30, 2013
- 18) 来田晃幸, 小柳 磨毅 他: 座位のシャドーピッチング指導が投球フォームに及ぼす影響. J. sports Injury19: 24-26, 2014

## 第6章 予防用肘装具の開発と生体力学的効果の検証

### 6.1 はじめに

投球肘障害は、野球選手の障害の中で最も頻度が高い<sup>1-3)</sup>。特に内側支持機構の炎症や損傷によるものが多く、投球時に繰り返される外反ストレスが要因として考えられている<sup>4)</sup>。そのため投球動作の加速期に発生する肘外反ストレスを低減させることができれば、投球時の肘痛軽減、炎症組織の保護や修復促進につながり、特に肘外反制動効果を利用した肘関節用装具が有効な対策として考えられる。

一般的に装具は、使用目的別に予防用装具、治療用装具、再発予防用装具に分類される<sup>5,6)</sup>。投球肘障害用装具は、障害発症後の治療・リハビリテーション期に使用可能な装具として、肘外反方向への制動性と肘関節の可動性が求められる。また、スポーツ活動時の使用に配慮した装具の軽量化も求められる。しかし、スポーツ活動で使用可能な軽量且つ機能的な装具はなく、肘外反の力学的負荷に対する制動効果を客観的に検証した報告も渉猟し得た範囲ではなかった。

本章では、再発予防を目的とし、装具メーカーと整形外科医師が共同で開発した予防用肘装具の外反制動の効果検証について述べる。

### 6.2 予防用肘装具の構造

#### 6.2.1 肘外反の制動機構

肘外反制動は、ヒンジ付き両側支柱（アルミニウム）とゴムバンドストラップ（ポリエステル・ナイロン・ポリウレタン）の3点支持機構によって制動する（図6.1）。両側支柱とストラップは、ともに装具本体部からの着脱が可能で制動力の調整が段階的に可能な構造とした。



図 6.1 ストラップの3点支持機構による肘外反制動

### 6.2.2 装具の可動性と軽量化

肘関節屈伸運動の可動性と装具の質量を考慮して、本体部は通気性伸縮素材（ナイロン・ポリウレタン）、本体前後面の屈曲部は伸縮立体メッシュ構造（ポリエステル・ポリウレタン）、支柱はヒンジ付き構造（アルミニウム）とし、装具の可動性と軽量化を図った。その結果、装具の質量はS、M、Lサイズで120～134gとなった（図 6.2）。



a. 装具の前面

b. 装具の側面と支柱

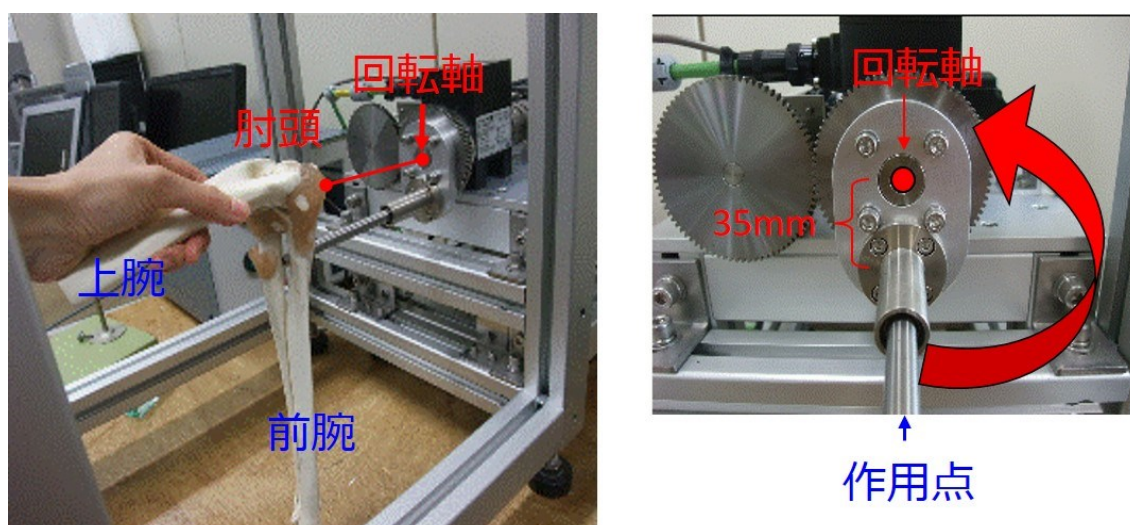
図 6.2 予防用肘装具の構造



### 6.3 肘外反制動効果の検証実験

#### 6.3.1 外反制動力の計測試験機 (図 6.3)

試験機は、動力部が回転力の発生と制動トルクの計測が可能となるようにプログラム制御されている。試験機の動力部と投球肘モデルを連結させ、外反ストレスを加えた際に発生する外反制動力（トルク）が計測可能な構造となっている。



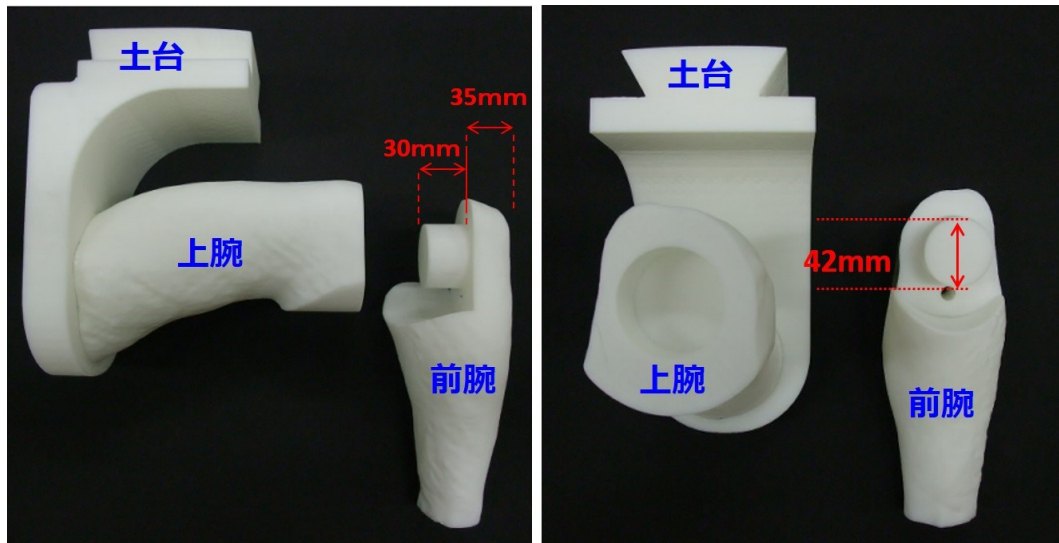
a. 骨模型による計測イメージ

b. 計測機の動力部

図 6.3 骨模型による計測イメージと計測機の動力部

#### 6.3.2 投球肘モデルの作成

投球加速期の肘関節角度を想定し、成人男性の 3D 人体データから 3D CAD で肘屈曲  $90^\circ$  の上肢モデルを設計した。設計モデルから 3D プリンターで前腕と上腕モデルを作成した。モデルの材質は ABS 樹脂で、肘頭部から上腕方向 35mm の位置に前腕と上腕パーツの連結部を設定した。連結部は円柱形状の凹凸で接続し、回転運動が可能となっている。また、上腕パーツには試験機と接続固定するための土台を設置した (図 6.4)。



a. モデルの全体像

b. 上腕と前腕の連結部

図 6.4 投球肘モデル

### 6.3.3 肘外反制動試験の計測条件

肘屈曲  $90^\circ$  の投球肘モデルを試験機に強固に固定した。試験機の動作角速度は  $30^\circ$  毎秒で、試験機が外反  $20^\circ$  時の外反トルク値を外反制動力として計測した。試験条件は、(1) 両側支柱およびストラップなしの装具（本体部のみ）、(2) 両側支柱あり、ストラップなしの装具、(3) 両側支柱およびストラップありの装具の 3 条件で実施した（図 6.5）。各条件下で試験を 5 回、3 セット、計 15 回計測した。尚、装具なしの投球肘モデルのみの場合には、外反制動力の発生がないことを計測前に確認した。



a. 条件(1)

b. 条件(2)

c. 条件(3)

図 6.5 試験条件

- a. 条件(1) : 両側支柱およびストラップなしの装具 (本体部のみ)
- b. 条件(2) : 両側支柱あり, ストラップなしの装具
- c. 条件(3) : 両側支柱およびストラップありの装具

#### 6.3.4 統計学的データ分析

計測試験 3 条件, 各 15 回で得られた最大外反制動力を多重比較検定 Tukey-Kramer 法で比較した. 有意水準は 5% ( $\alpha = 5\%$ ) とした.

### 6.4 結果

#### 6.4.1 3 条件下でのヒステリシス曲線

試験条件(1), (2), (3)の順に外反制動トルクは上昇した (図 6.6).

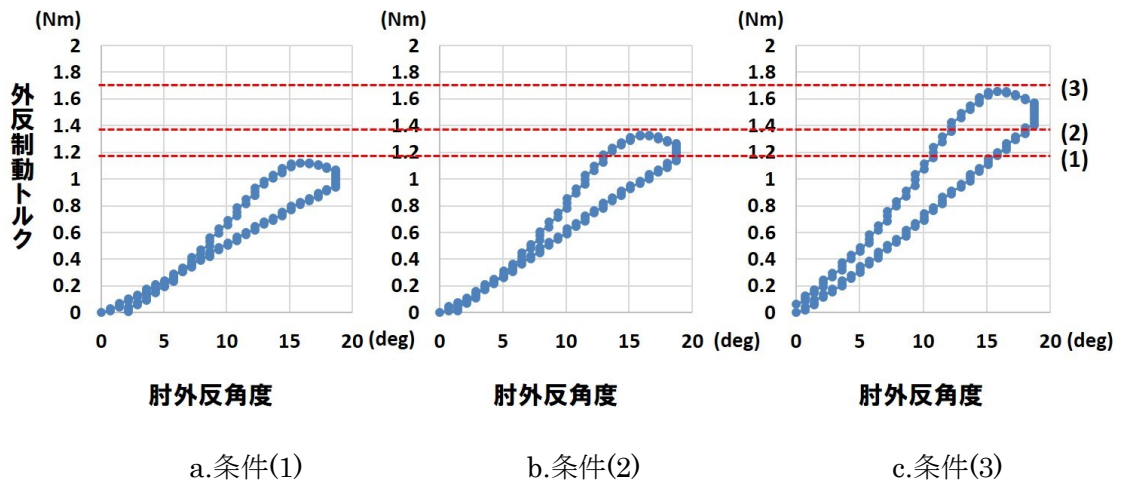


図 6.6 3 条件下でのヒステリシス曲線

#### 6.4.2 肘外反制動力の比較

試験条件(1)に対して条件(2)と条件(3)は有意に制動力が大きくなった。条件(2)と条件(3)の間には有意差を認めなかった (図 6.7)。

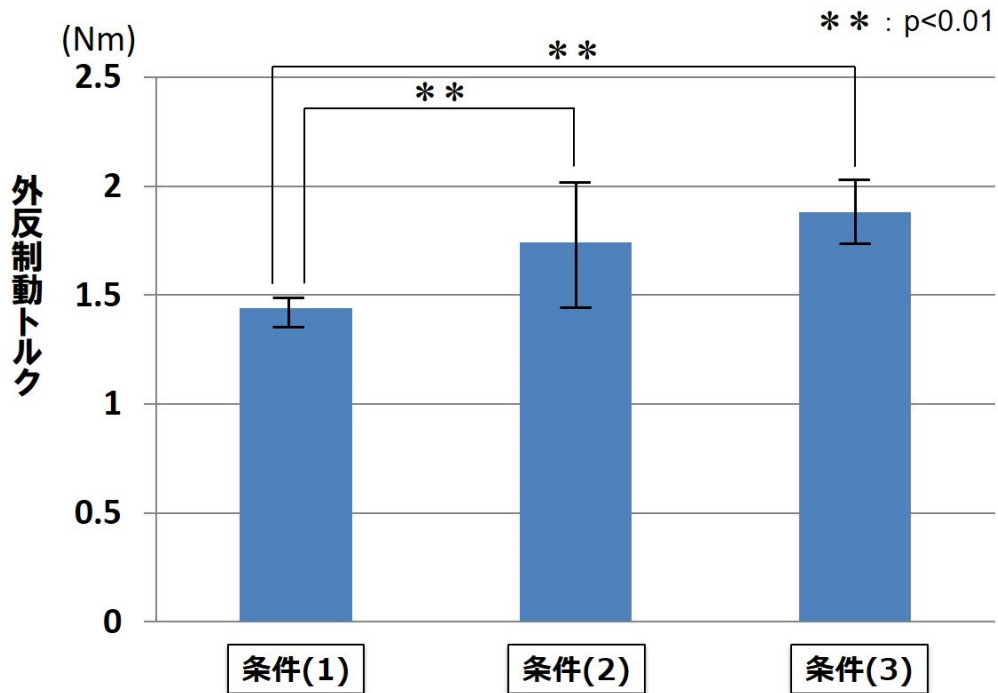


図 6.7 3 条件下での肘外反制動力の比較

## 6.5 考察

投球時の加速期に発生する肘外反ストレスの低減を目的とした投球肘障害の予防装具は、肘関節の屈伸運動を阻害することなく、肘外反運動を制動することが求められる。本装具の可動性については、装具の本体部に伸縮可能な素材を使用し、肘外反制動を担う両側支柱をヒンジ付きとした。特に装具の前後面部は、肘屈曲時の肘頭部の突出や装具本体の撓みが屈曲運動の支障とならないようにメッシュ構造で伸縮性の高い素材を使用した。外反制動については、両側支柱とストラップによる 3 点支持機構により側方安定性を図った。また、アルミニウム製の支柱を使用することで軽量化を図り装着感、使用感に配慮した設計とした。

今回の肘外反制動力の計測では、装具本体部のみ、両側支柱あり、両側支柱とストラップありの 3 条件で外反制動トルクを計測した。その結果、両側支柱、ストラップを付加することで外反制動トルクが有意に増加し、肘関節の側方安定性に寄与することが確認できた。また、両側支柱とストラップは自由に装具への着脱が可能な設計となっており、障害の回復に合わせた段階的なリハビリテーションにおいても有効利用が可能な装具と考えられた。

本実験の限界として、計測機の動作角速度が  $30^{\circ}$  毎秒と低速度であったことがあげられる。特に投球など肘外反ストレスが発生するオーバーヘッドスポーツへの臨床応用については、別の検証実験が必要と考えられた。

## 6.6 結語

装具メーカーと整形外科医師が共同で開発した予防用肘装具の肘外反制動力を検証した。計測の結果、両側支柱、ストラップによる外反制動力を確認することができた。両側支柱とストラップは、着脱可能な設計で段階的なリハビリテーションに有効利用が可能と考えられた。

## 参考文献

- 1) 一般財団法人全日本野球協会, 公益社団法人日本整形外科学会, 一般財団法人 運動器の10年・日本協会: 平成26年度少年野球(軟式・硬式)実態調査 調査報告. 2015
- 2) 一般財団法人全日本野球協会, 公益社団法人日本整形外科学会, 一般財団法人 運動器の10年・日本協会: 平成27年度少年野球(軟式・硬式)実態調査 調査報告. 2016
- 3) 一般財団法人全日本野球協会, 公益社団法人日本整形外科学会, 一般財団法人 運動器の10年・日本協会: 平成28年度中学野球(軟式・硬式)実態調査 報告書. 2017
- 4) Pappas AM: Elbow problems associated with baseball during childhood and adolescence. *Clinical Orthopaedics & Related Research* 164: 30-41, 1982
- 5) 福林徹: アスレティックテーピング・ブレース. スポーツ医学研修ハンドブック応用科目. 日本体育協会指導者育成専門員会スポーツドクター部会(監), 250-258, 2004
- 6) 田中正栄: 補装具 装具使用の考え方. アスリートのリハビリテーションとリコンディショニング 下巻 プログラミングの実際と手法の活用. 小林寛和(編), 福林徹, 小林寛和(監): 文光堂: 274-276, 2012

## 第7章 予防用肘装具による投球時肘外反ストレスの低減効果の検証<sup>1)</sup>

### 7.1 はじめに

競技現場では、投球肘内側障害による肘痛や内側不安定感に対してテーピングが行われる。テーピングは、装具に比べて装着感が良いとする選手の声も聞かれるが、装具に比べて汗の影響を受けやすく、皮膚トラブルへの注意がより必要となる<sup>2)</sup>。また、テープの走行や強度などの技術的問題、時間経過に伴うテープの緩み、テーピングの頻度に伴う経済的負担などの課題も多い<sup>3-6)</sup>。よって、投球時の後期コッキング期から加速期にかけて肘関節に発生する外反ストレスを低減することが可能な肘装具が必要である。

本章では、第6章で検証した予防用肘装具の臨床的データを得るため、実際の投球動作を3次元動作解析の手法を用いて行った検証について述べる。

### 7.2 対象

対象は高校硬式野球男子投手4名で、対象の年齢、身長、体重、野球歴の基本情報を表7.1に示す。2名の選手は、計測時に投球肘内側障害で通院治療中であった。他の2名は、計測時に通院治療中ではないものの過去に既往歴のある選手であった。

表 7.1 対象のプロフィール

	平均	標準偏差
年齢(歳)	17.0	0.0
身長(cm)	168.5	1.0
体重(kg)	71.5	6.7
野球歴(年)	7.7	0.5

(n = 4)

## 7.3 方法

### 7.3.1 投球動作の3次元計測

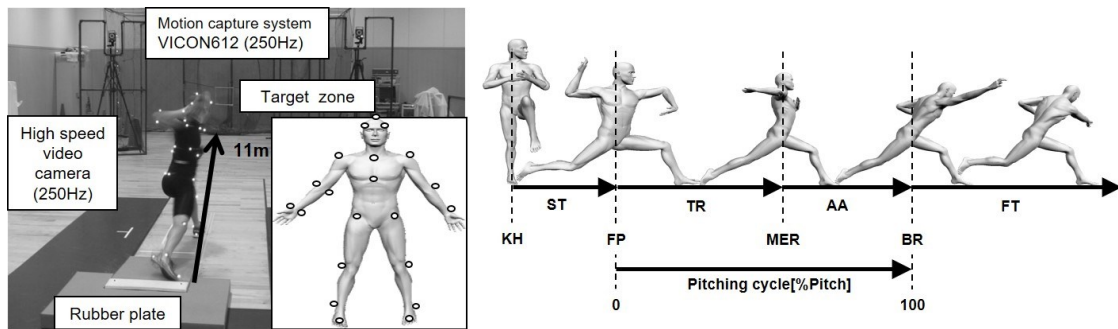
計測機器は、6台の赤外線カメラを備えたモーションキャプチャー・システム VICON (VICON612, Vicon Motion Systems UK) と2台の高速度ビデオカメラ (HSV-500C<sup>3</sup>, NAC Image Technology Inc. Japan) を使用した。サンプリング周波数は250Hzとし、身体上の特徴点30箇所に反射マーカを貼付した(図7.1.a.)。投球試技は、プレートから11.0m先に地面から高さ1.0mの位置に設置した的(0.4m×0.4m)へ直球を全力投球させ、その球速をスピードガン(Stalker Pro, Radar Sports, USA)で計測した。分析した試技は、的を通過した5試技以上の中で球速が最も速い試技を採用した。装具装着の有無による2パターンの投球試技をランダムに行った。

### 7.3.2 投球動作の分析

投球動作は、モーションキャプチャー・システムのデータと高速度ビデオカメラの映像を基にして特定した<sup>7,8)</sup>。(1)踏込み脚の膝が最高位に到達(Knee high, KH)、(2)踏込み脚の足底全接地(Foot plant, FP)、(3)投球側肩関節最大外旋位(Maximum external rotation of the shoulder, MER)、(4)ボールリリース(Ball release, BR)。分析区間は局面KHからBRまでとし、ピッチングサイクル(単位:%Pitch)はFP(0%Pitch)～BR(100%Pitch)までの区間とした(図7.1.b.)。

モーションキャプチャー・システムから得られたデータは、動力学と運動学の観点から次のように分析した。動力的分析項目は、MER時の肘・肩関節のモーメントとした。また、運動学的分析項目として、FPからBRまでの肘関節屈曲角度とMER時の肩関節外転、水平外転、外旋角度を評価した。関節角度は、立位静止時の姿勢を基準として補正した。





a. 測定環境と反射マーカの貼付位置

b. 投球動作の位相

図 7.1 投球動作の測定環境と位相

Knee High(KH), Stride(ST), Foot Plant(FP), Trunk Rotation(TR), Maximum External Rotation(MER), Arm Acceleration(AA), Ball Release(BR), Follow-Through(FT)

### 7.3.3. 予防用肘装具の効果判定

予防用肘装具の効果判定は、装具装着有りの評価値を装具装着無しの評価値で除して増減率 (%) として算出した。

投球前後に整形外科医師が、肘関節の疼痛や違和感などについて選手全員から問診や肘関節可動域、圧痛、ストレステストなどの診察を行った。

本研究は、新潟県健康づくり・スポーツ医科学センターの倫理審査委員会の承認（承認番号：17）を得て行った。対象者には実施前に共同研究者の整形外科医師（主治医）から本研究の趣旨を十分に説明し、本人ならびに保護者の同意を得て行った。

## 7.4 結果

### 7.4.1. 球速及び肘・肩関節角度の変化

装具装着の有無によって、球速の極端な減少はみられず、肩関節の外転、水平外転、外旋角度にも大きな変化はみられなかった。肘関節屈曲角度は、FP と BR 時に差がみられ、角度変化が生じていた（表 7.2）。

表 7.2 球速及び肘・肩関節角度の変化

		装具無	装具有	増減率 (%)
球速 (km/h)		114.8 ± 4.2	110.0 ± 2.5	95.9
肘関節角度 (deg.)				
屈曲	FP	102.2 ± 18.2	97.6 ± 8.4	95.5
	MER	86.1 ± 7.5	92.7 ± 8.1	107.7
	BR	16.4 ± 8.9	21.6 ± 8.2	131.6
肩関節角度 (deg.)				
外転	FP	85.7 ± 9.8	88.7 ± 3.3	103.5
	MER	102.2 ± 9.8	103.4 ± 10.7	101.1
	BR	95.6 ± 7.9	93.6 ± 9.0	98.3
水平外転	FP	-8.2 ± 9.0	-8.1 ± 5.1	99.2
	MER	22.5 ± 9.5	22.7 ± 9.2	100.6
	BR	12.2 ± 5.2	13.6 ± 6.3	111.7
外旋	FP	48.9 ± 41.6	50.5 ± 13.5	103.3
	MER	172.5 ± 20.2	173.4 ± 11.0	100.5
	BR	91.5 ± 16.0	91.7 ± 6.8	100.2

(平均 ± 標準偏差)

#### 7.4.2. 肘・肩関節モーメントの変化

肘関節外反モーメントは、MER 時に装具装着により 93.0%に減少した。しかし、肩関節外旋モーメントは、MER 時に 109.9%に増加した (表 7.3)。

表 7.3 肘・肩関節モーメントの変化

		装具無	装具有	増減率 (%)
肘関節 外反モーメント (Nm)	MER	51.7 ± 15.8	48.1 ± 0.4	93.0
肩関節 外転モーメント (Nm)	MER	23.2 ± 7.3	24.1 ± 7.5	104.1
水平外転モーメント (Nm)	MER	23.0 ± 12.9	20.0 ± 7.5	87.1
外旋モーメント (Nm)	MER	19.7 ± 3.0	21.7 ± 0.8	109.9

(平均 ± 標準偏差)

#### 7.4.3. 投球時の装具の装着感と投球前後の理学所見の変化

対象選手 4 名全員が、装具装着によって投球時の肘痛や違和感が軽減したと回答した。また、装具装着により投球動作に支障を訴える選手はいなかった。計測後に肘関節の症状と理学所見が悪化した選手はいなかった。

#### 7.5 考察

予防用肘装具は、装具の装着によって投球動作に大きな影響を与えることなくパフォーマンス（球速）を発揮でき、且つ投球時の肘痛や違和感が軽減することが臨床的に重要となる。今回の検証では、球速の若干の低下がみられたが、肩関節の角度はほとんど変化がみられなかった。肘関節では、FP 時の屈曲角度の低下と BR 時の伸展角度の低下がみられ、装具装着による影響と考えられた。その原因は明確には特定できないが、装具本体の

深屈曲時の撓みとストラップ構造の影響と推察された。しかし、対象選手の全員が投球動作への支障はなく、投球時の肘痛や違和感が軽減したと回答している。しかし、Hattoriら<sup>9)</sup>の健常選手(16.6±0.7歳)を対象とした報告では、25名中17名(68%)の選手が本装具装着時の投球に何らかの不快感を訴えたとしている。投球肘障害の既往のある選手と健常選手によって、装具装着による投球時の印象が大きく変わる可能性も考えられた。

力学的な検討では、投球時の肘外反モーメントが若干低減していたことから、第6章で得られた肘外反制動効果を裏付ける結果となった。Hattoriら<sup>9)</sup>も、健常選手を対象とした投球による肘関節内側の裂隙間距離を比較した検証実験で、本装具の肘関節負荷の低減効果が60～100投球後に現れることを報告している。一方、肘関節より近位関節である肩関節モーメントが一部増加し、装具質量が132gと軽量ながら、遠位の質量増加による近位関節への影響も注意しなければならないことがわかった。

以上のことから、投球肘内側障害の症状の遷延化や再発を繰り返す選手のリハビリテーションにおいて、段階的な投球練習への使用と再発予防(三次予防)効果が期待できると考えられた。本研究の限界として、対象者数が少なく統計学的分析による検討が十分でないこと、肩、肘関節以外に前腕回内外運動の影響を検証できなかったことがあげられる。更に検証実験を重ねることで、より有用な予防用肘装具の開発に繋げていきたい。

## 7.6 結語

予防用肘装具の臨床的検証実験として、投球時の肘外反モーメントの変化について検討した。投球時の肘外反モーメントの若干の低減はみられたが、肘屈曲角度の変化や肩関節モーメントにも一部変化がみられた。装具の材質を含め、更なる改良が投球肘障害予防の発展にも繋がるものと考えられた。

## 参考文献

- 1) 山本智章, 西野勝敏 他: 野球肘に対する肘関節装具の効果についてのバイオメカニクスの検討. 臨床スポーツ医学 26: 1297-1300, 2009
- 2) 宮下浩二: テーピング 肘関節. アスリートのリハビリテーションとリコンディショニング 下巻 プログラミングの実際と手法の活用. 小林寛和 (編) , 福林 徹, 小林寛和 (監) : 文光堂: 258-262, 2012
- 3) Alt W, Lohrer H, Gollhofer A: Functional properties of adhesive ankle taping neuromuscular and mechanical effects before and after exercise. Foot Ankle Int. 20: 238-245, 1999
- 4) Gross MT, Lapp AK et al: Comparison of Swede-O-University Ankle Support and Aircast Sport-Stirrup orthoses and ankle tape in restricting eversion-inversion before and after exercise. J Orthop Sports Phys Ther. 13: 11-19, 1991
- 5) Jerosch J, Thorwesten L et al: Is prophylactic bracing of the ankle cost effective?. Orthopedics. 19: 405-414, 1996
- 6) Paris DL, Kokkaliaris J et al: Ankle ranges of motion during extended activity periods while taped and braced. J Athl Train. 30: 223-228, 1995
- 7) Dillman CJ, Fleisig GS et al: Biomechanics of pitching with emphasis upon shoulder kinematics. J Orthop Sports Phys Ther. 18: 402-408, 1993
- 8) Fleisig GS, Barrentine SW et al: Kinematic and kinetic comparison of baseball pitching among various levels of development. J Biomech. 32: 1371-1375, 1999
- 9) Hattori H, Akasak K et al: The effects of elbow bracing on medial elbow joints space gapping associated with repetitive throwing in high school baseball players. The orthopaedic journal of sports medicine 5: 1-6, 2017

## 第8章 総括

### 8.1 総括

本論文の第1章では、頻発する野球肘障害と予防の意義について、子どもの人口が減少していく現状と、指導者や保護者、競技団体や医療関係者が連携して選手の育成と障害の予防に努める必要性を述べた。次に研究目的として、(1) 光学式モーションキャプチャー・システムによる3次元投球動作解析データから小・中・高校生（成長期）の投球動作を運動学的に評価し、その特徴と肘関節にかかる力学的負荷の関係を明らかにすること、(2) 投球肘障害の予防用装具（以下、予防用肘装具）と上肢モデルを開発し、その基礎的・臨床的效果を検証することの2項目を示した。これらの結果から、成長期野球選手の投球肘障害の発生要因となる投球動作のメカニズムと、肘装具の根拠となるデータを明確にすることで、投球肘障害の予防やリハビリテーションにおける再発予防に寄与することを述べた。

第2章では、基本的な理解を深めるために肘関節の解剖と機能について述べた。項目として、肘関節の構造、肘関節の靭帯と強度、肘関節の運動学、肘関節の骨化過程と靭帯付着部の構造、肘関節内側筋群の機能について解説した。特に投球時の肘関節へ生じる外反トルクは尺側側副靭帯の破断強度よりも大きく、尺側側副靭帯等の静的支持機構のみでの外反制動は難しいため筋活動による制動が必要であること、筋活動をシミュレーションした実験からは、尺側手根屈筋単独の筋活動、尺側手根屈筋と浅指屈筋の同時筋活動時に肘外反角度が有意に減少すること、円回内筋、尺側手根屈筋、長掌筋、浅指屈筋の前方共同腱が、上腕骨内側上顆と前方関節包に付着することによって、肘関節内側に加わる静的・動的牽引力を分担していることを解説した。

第3章では、成長期の投球肘障害の概念、疫学、発生機序、肘外反ストレスに影響を与える投球動作、臨床診断、画像診断、治療とリハビリテーションについて解説した。投球肘障害の内側部では、内側上顆の剥離や骨端離開、尺側側副靭帯損傷、尺骨神経障害が発生する。外側部では、上腕骨小頭離断性骨軟骨炎、滑膜ひだ障害、後側部では肘頭の骨端

離開，骨端閉鎖不全，滑膜ひだ障害，骨棘骨折，疲労骨折などが発生する。また，投球肘障害は，肘関節の骨化が完了した成人期と完了前の成長期では大きく異なり，投球肘内側障害では，成人期は尺側側副靭帯実質部が損傷されるのに対して，成長期では靭帯付着部（上腕骨内側上顆下端剥離骨折，上腕骨内側上顆骨端離開，尺骨鈎状結節）が損傷される。成長期の投球肘障害は，11，12歳の選手で多く発生するとされており，その要因として肘関節に出現する6つの二次骨化中心と骨化進行過程の時期に投球による肘関節への力学的ストレスが繰り返し生じることを説明した。リハビリテーション期の投球の再開にあたっては，距離，球数，強度を段階的に上げ，投球日と投球休養日などの頻度に注意し，再発の予防に努める必要がある。投球動作の介入については，多くの指導書によって情報発信されているが，その科学的根拠となる3次元動作解析データは十分ではなく議論の余地があることから，小・中・高校生を対象とした3次元投球動作解析をすることに至った経緯について述べた。

第4章では，投球動作の計測方法として，計測条件，計測プロトコル，運動学・動力学的解析について述べた。投球上肢の肩関節と肘関節に加わる関節間力と関節モーメントはニュートン・オイラー法を用いて，手関節，肘関節，肩関節の順に遠位から近位へと逆動力学的に推定したことを説明した。

第5章では，成長期の野球選手に対し，運動学的評価として，体幹（骨盤・胸部）の角度，投球側上肢や体幹の移動速度と角速度，下肢のストライド長とストライド幅について検証した。また，移動速度や角速度については最高値が出現するタイミングについても検証した。その結果，小学生のストライド幅は，非投球測に **open step** し，中学生と高校生では軸足と踏み込み足が投球方向に一致する傾向にあった。**Foot plant** における骨盤と胸部の体軸内回旋角度は高校生で大きく、小学生と中学生では体幹の回旋運動が未熟な傾向にあった。更に多変量解析により，こうした小学生における投球フォームの特徴は，体格と球速で標準化した肘外反負荷を増大させる因子となることが明らかとなった。また，胸

部推進最高速度は、小学生では foot plant 前に出現し、中学生と高校生では foot plant 後に出現していたことから、成長に伴い骨盤推進最高速度は早期に、胸部推進最高速度は遅延して出現する傾向にあることが明らかとなった。

第 6 章では、開発した予防用肘装具の制動効果の検証実験について述べた。開発した上肢モデルによる計測の結果、両側支柱とストラップにより、投球肘障害の主要な発生要因とされる外反力に対する制動効果を確認した。両側支柱とストラップは、着脱可能な設計で障害の回復に合わせた段階的なりハビリテーションへの有用性も確認された。

第 7 章では、実際の投球時における予防用肘装具による肘外反負荷の低減効果を、動作解析の手法を用いて検証した。その結果、肘装具の装着により、投球フォームや球速には大きな変化はなく、肘外反負荷は低減することが確認できた。また、装具装着による投球動作への支障はなく、投球時の肘痛や違和感が軽減したことから、臨床的にも予防用肘装具が有用であることが明らかとなった。しかし、肘屈曲角度や肩関節モーメントにも一部変化がみられ、装具の材質を含めた更なる改良が必要なことも明らかとなった。

## 8.2 今後の展望

小・中・高校生年代のいわゆる成長期野球選手の 3 次元投球動作解析を通して、体幹運動や下肢のストライドの特徴を明らかにするとともに、開発した予防用肘装具の制動効果を基礎的・臨床的検証実験によって、その効果を明らかにした。投球動作解析から得られた知見については、野球の障害予防を念頭に新潟県で作成された「野球手帳」の投球動作のチェックポイントの頁で活用されている。予防用肘装具については、肘関節内側障害が遷延した選手や、再発を繰り返す選手に有効利用されている。今後の課題として、成長に伴う投球動作の変化がパフォーマンス向上に寄与する因子なのか、投球肘障害に影響を与える因子なのかを更に明確にしていくことが必要と考えている。また、マーカ貼付箇所(大腿・下腿内側)を増やして下肢関節の角度や前腕回内外の角度、非投球側上肢の運動、胸



郭・脊柱の運動の検証も発展的に行いたいと考えている。肘装具については、治療やリハビリテーション期の三次予防的装具から一次予防としても利用可能な装具の開発に繋げていきたいと考えている。

本論文で述べた研究成果は、国内外の学術大会および論文で公表するとともに、筆者の所属機関ならびに関連医療機関において、リハビリテーション期の再発予防（三次予防）の投球動作指導として取り入れられている。今後は、投球動作改善のためのドリルを考案し、現場へ普及させ、投球肘障害の予防（一次予防）に貢献していきたい。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり，指導教員として研究計画から論文執筆に至るまで多大なるご指導と助言をいただきました大阪電気通信大学大学院医療福祉工学研究科医療福祉工学専攻小柳磨毅教授に謹んで御礼申し上げます。小柳磨毅先生には，私が新潟で高校野球の医療支援を始めて以来，約 20 年にわたって，臨床，研究，教育，スポーツ現場における理学療法士としての在り方など多くのことについてご指導と助言をいただきました。心より感謝申し上げます。

大阪電気通信大学大学院医療福祉工学研究科医療福祉工学専攻 吉田正樹教授には，論文の作成にあたり，丁寧なご指導と助言をいただきました。特に装具の基礎的検証実験，バイオメカニクスに関するご指導をいただきました。厚く御礼申し上げます。

大阪電気通信大学大学院医療福祉工学研究科医療福祉工学専攻 田中則子教授には，論文の作成にあたり，細部にわたって多くのご指導と助言をいただきました。深く感謝申し上げます。

大阪保健医療大学大学院保健医療学研究科 境隆弘教授にはデータの解釈から論文の執筆に至るまで細部にわたってのご指導と助言，多くの激励の言葉を掛けていただきました。心より感謝申し上げます。

二王子温泉クリニック 古賀良生院長には整形外科医師の立場から，私が理学療法士になって以来，約 30 年にわたって臨床，研究，教育についてご指導をいただきました。厚く御礼申し上げます。

新潟医療福祉大学健康科学部健康スポーツ学科 大森豪教授には整形外科医師の立場から臨床と研究の両立，学会発表，論文作成にわたり多くのことをご指導いただきました。心より感謝申し上げます。

新潟リハビリテーション病院 山本智章院長には整形外科医師の立場から野球選手への

医療支援，野球手帳の作成，予防用肘装具の臨床的検証にいたるまで多くのご指導をいただきました。深く感謝申し上げます。

日本シグマックス株式会社には予防用肘装具，検証実験用の上肢モデルと計測機の開発ならびに基礎データの検証実験において全面的なご支援とご協力をいただきました。改めて感謝の意を表します。

新潟県健康づくり・スポーツ医科学センター 西野勝敏博士（工学）には，データの計測と解析においてご協力いただきました。深謝いたします。

投球動作の計測に際して，ご協力いただいた新潟医療センターならびに新潟リハビリテーション病院の理学療法士の皆様に改めて感謝申し上げます。

最後に研究にご協力いただいた被験者と保護者の皆様に心より御礼申し上げます。