

ピッチング (投球) の バイオメカニクス

ピッチングに関連する傷害は、オーバーユースに起因していると考えられています。¹オーバーユースに伴う筋肉疲労により、運動で発生したエネルギー（負荷）を吸収する能力が低下します。²つまり本来吸収されるべきエネルギーは、関節や他の軟部組織（筋肉や腱、靭帯、関節包など）で吸収されることになるため、通常よりも大きな負荷が加わり、傷害リスクが高くなります。また筋肉が疲労することで、関節にその影響が及び、その安定性に問題が発生します（肩関節の不安定性）。関節の不安定性はまた軟部組織への負荷を増加させます。特に肩甲上腕関節の安定化にとって重要な軟部組織である、ローテーターカフや関節包靭帯複

肩関節の不安定性によって誘発される、代償性（二次的）インピンジメント症候群の要因にはさまざまなものが考えられています。具体的には、ローテーターカフや関節包の機能低下、肩関節の可動域制限などがあります。³⁻⁹肩関節の可動域制限が不安定性を引き起こすという解釈は、一見論理の矛盾があるように思われますが、それは違います。野球やバレーボールなどのような、肩の挙上動作を伴うスポーツに従事しているアスリートの場合、肩関節（利き腕側）の外旋に可動域充進が見られる一方、内旋は可動域の制限が認められる傾向があります。^{3.5-7.10}このことは、投球動作の反復により、肩関節の関節包前部が何度も伸張を繰り返し、組織の弛緩が生じているのに対し、関節包後部は逆に硬縮（緊張）が起こっていることを示唆しています。また肩関節の回旋可動域（外旋可動域+内旋可動域）には、左右差がなかったこともわかっています。^{3.5-7.10}関節包後部の硬縮がある状態で、投球動作を反復することにより、関節



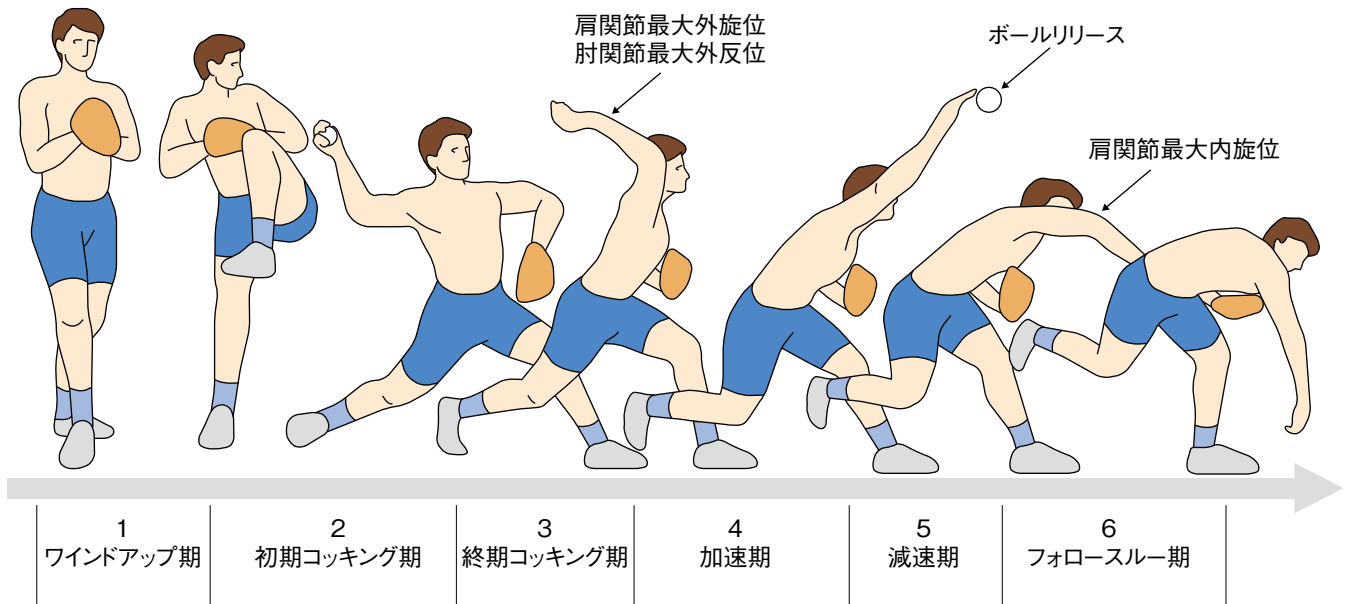
合体（関節包、関節上腕靭帯）、関節唇などへの負荷が増加します。具体的にはローテーターカフや上腕二頭筋長頭の腱炎、肩峰下包炎などが誘発されます。またそれらに伴う代償性（二次的）インピンジメント症候群も、しばしば見られるコンディションです。

唇の断裂や肘関節にある尺側側副靭帯の損傷が引き起こされる可能性もあります。^{11.12}

肩関節の動的安定化（運動中における関節の安定化）には、ローテーターカフや上腕二頭筋長頭などの筋肉と、靭帯や関節包との間で微妙なバランスが保たれている必要があります。投球動作により、肩関節は非常に大きな負荷にさらされることとなります。Fleisigらの研究によると、投球時における上肢の角速度は7550°/秒、回旋トルクは67N・mにも達すると言われてしています。¹³肩関節の安定化構造が適切なバランスで保たれていなければ、関節の不安定化を引き起こし、さらに代償性のインピンジメント症候群（二次的インピンジメント症候群）を誘発させることとなります。

足投球フェーズ

投球フェーズは6段階に分かれます(下図)。^{14,15}



1. ワインドアップ期

投球モーションの最初の段階です。片足を挙上しバランスを取るところまで続きます。windアップ期の終期では、肩関節はやや外転位に保持されており、筋肉の活動レベルはもっとも低くなっています。

2. 初期コッキング期 (ストライド期)

片足挙上位においてバランスを保っているところから、挙上している側の足が地面に着地するまで続きます。肩関節は90°外転位、さらに15°水平内転位までの運動が起こります。この段階では、最初に三角筋に強い収縮が起こります。その後、棘上筋、棘下筋、小円筋の筋収縮が生じます。

3. 終期コッキング期

地面に足が着地してから、肩関節の外旋が最大可動域に到達するまでがコッキング期です。肩甲骨は内転位に保持されることで、上腕骨のための安定した基盤の役割を果たしています。肩関節の外旋に伴い、上腕骨頭は関節窩に対し、後方へと変位していきます。上腕骨

頭の後方変位に伴い、肩関節の関節包前部の緊張が高まっていきます。初期コッキング期において強い収縮を起こしていた三角筋の活動レベルは、次第に減少していきます。変わって棘上筋、棘下筋、小円筋の筋収縮レベルが増加していき、この期の中間期において最大収縮に到達します。また肩関節の内旋筋である肩甲下筋は、上半身が開いた状態(後方に振れた状態)から、前方へ回旋が始まるときに、筋収縮が増加していきます。上腕二頭筋は、この期を通じて適度な収縮を維持し、大胸筋、広背筋、前鋸筋の筋収縮は次第に増加していき、この期の最後において最大に到達します。

4. 加速期

肩関節最大外旋位から、ボールが手から離れる直前までが加速期です。肩関節は外転位を保ちながら、内旋していきます。また肩甲骨には外転が生じると同時に、上半身は前方へ回旋していきます。このとき肩関節前部にある筋群(大胸筋、肩甲下筋、上腕二頭筋など)の収縮形態は、伸張性収縮から短縮性収縮へと切り替わる一方で、肩関節後部にある筋群(棘下筋、小円筋、大円

筋、広背筋など)は短縮性収縮から伸張性収縮へと切り替わります。¹⁶ 上腕三頭筋は、初期において強い収縮を示し、大胸筋、広背筋、前鋸筋は終期に強く収縮します。肩関節に内旋が生じることで、上腕骨頭には前方変位が起こり、終期コッキング期で生じていた関節包前部の伸張(緊張)が軽減していきます。

5. 減速期

ボールが手から離れてから、肩関節の内旋が最大可動域に到達するまでが、減速期です。この期は、最初の3つの期(ワインドアップ期から終期コッキング期)の逆の運動が起こっています。投球フェーズの中で、もっとも傷害が発生しやすい期であり、加速期までに蓄えられたエネルギーが、全てボールに伝達されます。肩関節の外転は約 100° に維持され、水平内転は 35° に達します。この期では、上肢の内旋速度を減速させるために、肩関節周辺にある筋群全てが伸張性収縮を起こしています。

6. フォロースルー期

肩関節の最大内旋から、投球モーションの最後までがフォロースルー期にあたります。肩関節の外転は 100° に保持され、水平内転は 60° に達します。筋肉の活動レベルは休止状態に戻り、関節への負荷も軽減していきます。

上腕骨の後捻

投球動作を反復するアスリートの上腕骨は後捻(retrotorsion)している傾向があります。¹⁷⁻¹⁹ 上腕骨の後捻は、上腕骨近位端(上腕骨頭)に対して、上腕骨遠位端が後方に捻転している状態を言います。上腕骨の後捻が存在することで、肩関節の外旋可動域をより大きくしています。一般的に肩関節の外旋に伴い、それを包んでいる関節包靭帯には負荷(伸張力)が生じますが、上腕骨の後捻は、その負荷を軽減させる働きがあると思われます。肩関節の外旋可動域が大きければ大きいほど、この後に続く加速期における肩関節の内旋可動域が大きくなり、上肢の運動スピードをより加速させます。

後捻角の平均値は、 25° から 30° と言われていますが、²⁰

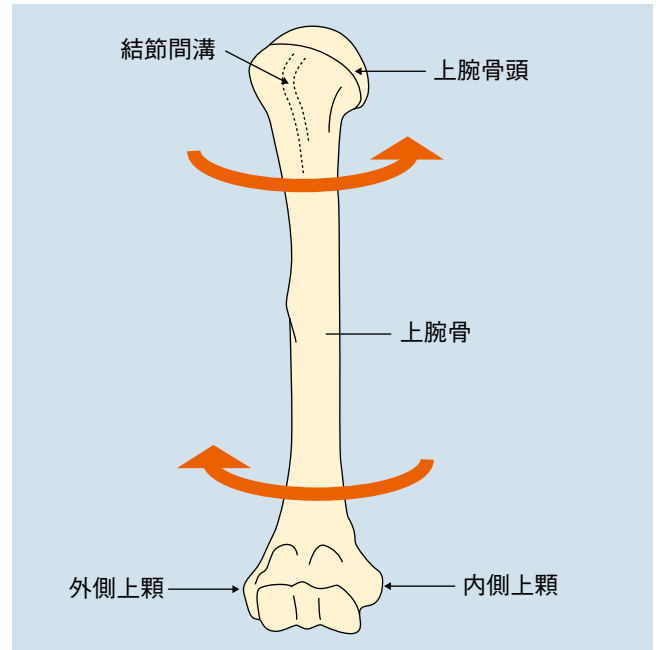


図2 上腕骨へのトルク

この値は $+60^{\circ}$ から -10° までのように、幅があります。²¹ また人種間の差、性差、左右差などが存在することが、報告されています。²² 投球動作を反復するアスリートの上腕骨の後捻角は、そうでない人よりも大きいと言われています。これは投球動作に伴い、上腕骨に後方への捻転力が繰り返し加わることに起因していると思われる(図2)。

オーバーヘッドの投球動作の加速期において、上腕骨には上図のようなトルク(捻転力)が生じている。上腕骨の長軸において、上腕骨頭に対し、遠位端に後方への捻転力が作用しています。

投球動作における肩甲骨の役割

肩甲骨上腕関節は球関節に分類されます。これはちょうど関節窩(肩甲骨)の窪みに上腕骨頭がはまっている状態です。英語では球関節のことを、Ball and socket jointと表現します。Ballはボール(球)、Socketは窪みのことです。窪みにボールがうまくはまっている状態を維持するためには、肩甲骨と上腕骨の連動が正常である必

要があります。このような肩甲骨と上腕骨の連動を肩甲骨胸郭リズム、または肩甲骨上腕リズムと呼びます。

肩甲骨は上腕骨の基盤としての重要な役割を持っているため、肩甲骨の機能低下（不安定性）は、直接的に肩甲骨上腕関節の運動障害（不安定性）に結びつきます。このような状態を維持したまま運動を継続することで、競技パフォーマンスの低下を引き起こし、棘上筋腱断裂などの肩関節の傷害リスクを高めることにつながります。

また投球動作において、肩甲骨は後退（外転）と前突（内転）の役割も持っています。コッキング期において、肩甲骨には内転運動が生じますが、これにより肩関節前部にある筋群の収縮形態が伸張性収縮から短縮性収縮へと効率的に変化します。^{1,23}この後に続く加速期において、肩甲骨は胸郭上を前突（外転）していきます。これにより上腕骨との正常な位置関係を保持します。このとき肩甲骨に十分な前突運動が発生しない場合（可動域制限）、棘下筋腱や小円筋腱、関節包後部など、肩関節後部にある構造には、非常に大きな牽引力が生じます。

コッキング期から加速期にかけて、上肢の挙上とともに、肩甲骨の烏口突起にも挙上が起こります。烏口突起が挙上することで、ローテーターカフの腱が烏口肩峰スペースにおいて、適切にすり抜けることができます。つまりインピンジメントの発生を防いでいます。

また肩甲骨は、筋肉の付着部としての役割も持っています。肩甲骨の安定化筋は、その内側縁と上部、下部に付いており、肩甲骨の動的・静的安定化を行っています。さらに三角筋、上腕二頭筋、上腕三頭筋などの表層部筋は、肩甲骨の外側縁に付着部を持ち、肩甲骨上腕関節に作用します。また深層部筋であるローテーターカフは、肩甲骨の前後を覆い、伸張性・短縮性収縮により、肩関節の運動を安定化させています。ローテーターカフ、特に棘上筋は、上腕骨頭を肩甲骨の関節窩に圧迫させることで、肩甲骨上腕関節の安定化を果たしています。

投球動作に限らず、肩甲骨は下肢や体幹部の大きな筋肉で発生したエネルギーを、上肢から指先にまで伝達する「運動連鎖」の一端を担っています（図3）。テニスのサーブにおいて発生するエネルギーの51%は、下肢、殿部、体幹から来ています。²⁴肩甲骨は、下肢や殿部、体幹で発生したエネルギーを上肢から手に伝達するための中継地点の役割をしています。²⁴⁻²⁷

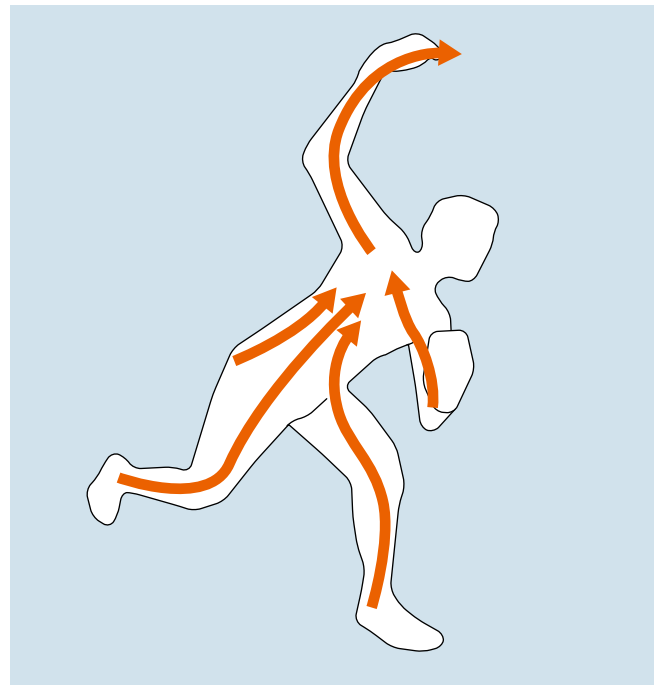


図3
下肢、殿部、体幹で発生したエネルギーが、肩甲骨を介して上肢から指先まで伝達される

引用文献

1. Fleisig GS, Dillman CJ, Andrews JR: Biomechanics of the shoulder during throwing, in Andrews JR, Wilk KE (eds): *The Athlete's Shoulder*.. New York, Churchill Livingstone 355-368,1994
2. Mair SD: The role of fatigue in susceptibility to acute muscle strain injury.. *Am J Sports Med*;24:137-143,1996
3. Allegrucci M, Whitney SL, Irrgang JJ: Clinical implication of secondary impingement of the shoulder in freestyle swimmers.. *J Orthop Sports Phys Ther* 20: 307-318,1994
4. Cavello RJ, Speer KP: Shoulder instability and impingement in throwing athletes.. *Med Sci Sports Exerc* 30 (Clinical Suppl): S18-S25,1998
5. Jobe CM: Superior glenoid impingement.. *Orthop Clin North Am* 28: 137-143,1997
6. Jobe CM: Superior glenoid impingement. Current concepts. *Clin Orthop* 330: 98-107,1996
7. Kvitne RS, Jobe FW, Jobe CM: Shoulder instability in the overhand or throwing athlete.. *Clin Sports Med* 14: 917-935,1995
8. Parker RD, Seitz WH Jr: Shoulder impingement/instability overlap syndrome.. *J South Orthop Assoc* 6: 197-203,1997
9. Warren RF: Subluxation of the shoulder in athletes.. *Clin Sports Med* 2:339-354,1983
10. Ticker JB, Fealy S, Fu FH: Instability and impingement in the athlete's shoulder.. *Sports Med* 19: 418-426,1995
11. Burkhart SS, Morgan CD, Kibler WB: The disabled throwing shoulder:spectrum of pathology part I: Pathoanatomy and biomechanics.. *Arthroscopy*;19:404-420,2003
12. Burkhart SS, Morgan CD, Kibler WB: Shoulder injuries in overhead athletes: the "dead arm" revisited.. *Clin Sports Med*;19:125-158,2000
13. Fleisig GS, Andrews JR, Dillman CJ: Kinetics of baseball pitching with implications about injury mechanisms.. *Am J Sports Med* 23: 233-239,1995
14. Escamilla RF, Fleisig GS, Barrentine SW, Zheng N, Andrews JR: Kinematic comparisons of throwing different types of baseball pitches.. *J Appl Biomech*;14:1-23,1998
15. Fleisig GS, Escamilla RF, Andrews JR, Matsuo T, Satterwhite Y, Barrentine SW: Kinematic and kinetic comparison between baseball pitching and football passing.. *J Appl Biomech*;12:207-224,1996
16. Pappas AM, Zawacki RM, Sullivan TJ: Biomechanics of baseball pitching. A preliminary report.. *Am J Sports Med* 13: 216-222,1985
17. Crockett HC, Gross LB, Wilk KE: Osseous adaptation and range of motion at the glenohumeral joint in professional baseball pitchers.. *Am J Sports Med*;30:20-26,2002
18. Osbahr DC, Cannon DL, Speer KP: Retroversion of the humerus in the throwing shoulder of college baseball pitchers.. *Am J Sports Med*;30:347-353,2002
19. Pieper HG: Humeral torsion in the throwing arm of handball players.. *Am J Sports Med*;26:247-253,1998
20. Craig EV: Total shoulder replacement for primary osteoarthritis and osteonecrosis. In: Craig EV, editor. *The shoulder*.. New York: Raven Press;311-343,1995
21. Keen JS, Huizenga RE, Engber WD, Rogers SC: Proximal humeral fractures: a correlation of residual deformity with long term function.. *Orthopedics*;6:173-178,1983
22. Krahl VE, Evans FG: Humeral torsion in

- man.. Am J Phys Anthropol;3:229-253,1945
23. Pink MM, Perry J: Biomechanics, in Jobe FW (ed): Operative Techniques in Upper Extremity Sports Injuries.. St. Louis, Mosby 109?123,1996
 24. Kibler WB: Biomechanical analysis of the shoulder during tennis activities.. Clin Sports Med 14: 79?85,1995
 25. Elliott BC, Marshall R, Noffal G: Contributions of upper limb segment rotations during the power serve in tennis.. J Appl Biomech 11: 433?442,1995
 26. Kennedy K: Rehabilitation of the unstable shoulder.. Oper Tech Sports Med 1: 311?324,1993
 27. Kraemer WJ, Triplett NT, Fry AC: An in-depth sports medicine profile of women college tennis players.. J Sports Rehabil 4: 79?88,1995