

3

野球投手の投球動作のバイオ
メカニクスと投球障害予防

田中 洋, 小橋昌司, 信原克哉

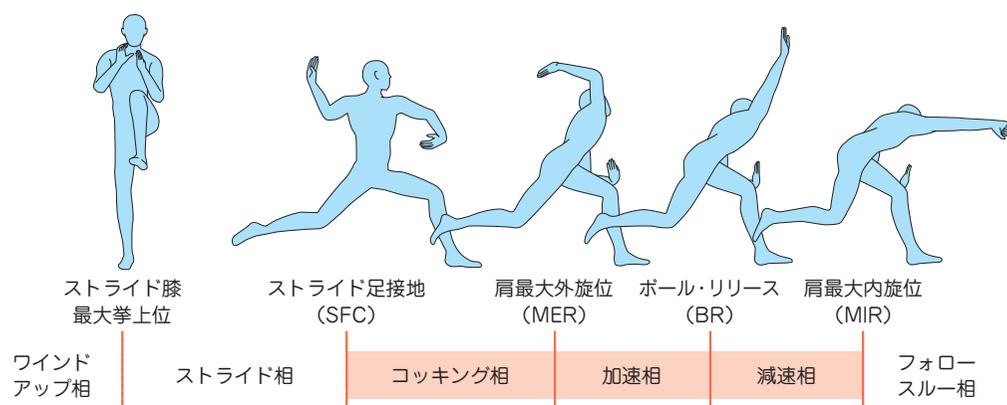
1 投球動作中の肩関節の運動とストレス

投球障害は投球動作に起因し、それを繰り返す最中に生じる。投球障害肩肘は、投球過多による軟部組織の過度な緊張や疲労を要因とし、その状態でも繰り返し投げ続けることにより発症する身近な問題である^{1)~5)}。これに対して投球制限や休息は、軟部組織の緊張や疲労の軽減を図ることができるため、投手にとっては簡便で効果的な予防策のひとつである。しかし、この全力投球での数の制限や休息だけでは必ずしも投球障害を回避することができず、身体機能や投球動作へのアプローチが必要となる⁶⁾⁷⁾。ただし、器質的变化を有していたとしても、症状を呈さずに全力投球が可能な選手が一定数存在する⁸⁾。

投球動作のバイオメカニクスでは、投球障害リスクの最小化および投球パフォーマンスの最大化を定量的にめざす。投球障害に至った投手はそうとはならなかった投手よりも、投球動作中の関節に大きなトルクが加わっていたことが明らかとなっており⁹⁾、関節に加わる力やトルクの大きさを関節への負担(障害リスク)の大きさととらえる。したがって、投球動作中の関節に加わる力とトルクをできる限り低減させ、球速やコントロール、あるいはその両者を維持する/向上させる投球動作を探索することが、投球動作のバイオメカニクスの道筋となる。ただし、個人の人体組織の特徴量、たとえば硬い/柔らかい/強い/弱いなどは、投球動作を解析する際の便宜上、直接的に考慮しないことが多いが、今後はこれらを含めた解析が主流となるだろう。

全力での投球動作中の肩関節と肘関節には、非常に大きな力とトルクが加わる¹⁰⁾。これは投手にだけ当てはまるのではなく、遠投を行う選手にも同程度もしくはそれ以上の力とトルクが肩関節と肘関節に加わる^{11~13)}。ただし、投球強度が弱くなれば、それだけ関節に加わる力とトルクは小さくなり、球速も遅くなる¹²⁾。これらのことから、1人当たりの全力投球数が多いポジションである「投手」が投球障害肩肘になりやすいことは想像に難くない^{4) 14) 15)}。

投球障害肩肘と関連づけられている投球動作中の力とトルクの多くは、コッキ



力とトルク	タイミング	大きさ	障害との関連
肩最大前方関節間力	コッキング相中盤	210~444 N	肩前方不安定性の助長
肘最大内側関節間力	コッキング相後半	186~379 N	上腕骨内上顆炎
肩最大内旋トルク (外旋トルクに抵抗)	コッキング相後半 (MER直前)	18~108 N・m	上腕骨骨端線障害 上腕骨骨幹部骨折 肩前方不安定性の助長 SLAP損傷 インターナル・インピンジメント 腱板疎部損傷
肘最大内反トルク (外反トルクに抵抗)	コッキング相後半 (MER直前)	27~106 N・m	肘内側側副靭帯損傷 上腕骨内上顆炎
肘最大屈曲トルク (伸展トルクに抵抗)	加速相中盤	12~74 N・m	肩関節唇損傷
肘最大近位関節間力	減速相前半 (BR直後)	354~1,109 N	上腕二頭筋長頭腱炎 肩腱板損傷
肩最大近位関節間力	減速相前半 (肘最大近位 関節間力の直後)	202~1,280 N	上腕骨内上顆炎 肘内側側副靭帯損傷
肩最大内転トルク (外転トルクに抵抗)	減速相後半	43~139 N・m	広背筋症候群
肩最大後方関節間力	フォロースルー相前半	160~400 N	上腕二頭筋長頭腱/肩腱板/関節包の緊張
肩最大水平外転トルク (水平内転トルクに抵抗)	フォロースルー相前半	40~109 N・m	

図1 肩関節と肘関節に加わる力とトルクの種類，平均的なタイミング，値の大きさ，投球障害との関連
SFC: stride foot contact, MER: maximum shoulder external rotation, BR: ball release, MIR: maximum shoulder internal rotation, SLAP: superior labrum anterior-posterior

(文献16~45をもとに作成)

ング相から減速相に発生する(図1)^{16)~45)}。特に、コッキング相後半と減速相からフォロースルー相前半には、肩関節と肘関節に大きな多様な負担が加わる。ここで、球速と相関のあるのは肘屈曲トルク，肩近位関節間力，肘近位関節間力，特に投球障害との関連が指摘されている肩内旋トルクと肘内反トルクは，球速とは相関しないか相関は強くないといわれている^{41)46)~48)}。そして，競技レベルが上がれば，肩関節および肘関節に加わる力とトルクは大きくなる⁴⁹⁾。しかし，身長や体重を利用してそれらを規格化すると，必ずしも競技レベルの高い投手だけが

●手術後

鏡視下腱板修復術 (arthroscopic rotator cuff repair ; ARCR) の術後リハビリテーションは、病期を考慮した治療が重要と考える。スポーツ選手のARCR術後対応において競技復帰をめざす上で、競技特性を念頭に置いて早期より治療を施していく。まず、当院でのARCR術後の経過を装具固定期、装具除去移行期、機能訓練前期、機能訓練後期の4期に分けて紹介する (図3)。

装具固定期 (術後1～3週)

装具固定期から術後のリハビリテーションを開始する。この時期の第一目標は日常生活動作 (activities of daily living ; ADL) の獲得であり、スポーツ選手も同様である。

術翌日からリハビリテーションを開始する。装具装着時期の治療目的は徹底した疼痛コントロールを行うことであり、医師からの投薬、注射や物理療法を併用した炎症の抑制が施され、装具のポジショニング指導、装具装着の自立や日常生活指導 (食事・就寝方法) を行う。装具装着訓練は術前から開始し、術後1日目に再指導する。目的は修復腱板に負担をかけず肩関節や肩甲帯の過度な筋緊張を抑制するためであり、個々に応じて過緊張にならないポジショニングをベルトで調節し、装具の位置を設定する。ARCRはやや外転位で縫合するため、装具の外転角度が大きく設定されており、大断裂など損傷が広範囲に及ぶものは、装具の外転角度を広めに設定することもある。

前日	手術	術後1日	1週	3週	4～5週	12週	6か月	10か月
術前評価		装具固定期		装具除去移行期		機能訓練期		
						前期	後期	
		疼痛管理 ・装具装着* ・スパズム除去 ・良肢位指導		3～4週目安に装具除去		腱板エクササイズ (自動→抵抗運動)	積極的抵抗運動 ・inner muscle ・outer muscle	オーバーヘッド動作開始
		ROMエクササイズ		筋力強化 等尺性→等張性		協調運動強化	機能的トレーニング	→
		腱板エクササイズ (無負荷：等尺性運動)		ROMエクササイズ		日常生活復帰トレーニング	機能的トレーニング 上肢負荷位など	→
	ADL指導					スポーツ復帰トレーニング	→	

*：術前から訓練を開始し、術後1日目に再指導する。

図3 腱板断裂修復術後のプロトコル

半年でROM full, 1年で筋力80%↑をめざす。

復帰の目安：デスクワーク (1か月)、軽作業 (3か月)、重労働 (6か月)、競技復帰 (10か月)

手術部位への治療は、まず術後炎症による頸部・肩甲骨周囲・上腕・前腕筋の筋緊張コントロールを行う。同時に、患部外への対応は体幹から下肢にわたってアプローチし、肩甲胸郭関節の自動運動を患側上肢につなげていく。また、肩甲上腕関節の愛護的な関節可動域訓練は重要で、過負荷にならない自動介助運動を施し、疼痛に配慮しながら挙上や内外旋の可動域訓練を実施する。術後早期から患部の保護を考えて、患部や患部外へのアプローチが将来のhigh performanceへとつながっていく。

装具除去移行期 (術後3~4週)

この時期の目的は装具を除去できる機能獲得である。当院の装具除去は表1の5点が基準である。

装具除去時期は断裂サイズや疼痛の程度などにより個人差はあるが、小・中断裂

は術後3~4週で完全除去ができるように、大断裂や広範囲断裂で追加処置が施された場合は術後6週に遅延することもある。関節可動域訓練は、装具除去を念頭に置いた肩甲上腕関節の内転・内旋可動域の獲得を主に、外旋可動域の拡大を進める。また、肩甲帯安定性を目標に肩甲骨の各方向に自動介助運動を行う(図4)。運動強度は求心性から等尺性運動、遠心性運動へと、関節に与えるストレスは等尺性収縮から求心性収縮、遠心性収縮へと移行していく。

表1 装具除去基準

- 安静時痛や睡眠を妨げる夜間痛がない
- 安楽姿勢を妨げるほどの著しい筋スパズムがない
- 著しいアライメント異常がない
- 顕著な肩甲上腕関節内転・内旋制限がない
- 就寝時の良肢位保持が可能



図4 肩甲骨運動

- A: 挙上。
B: 下制。
C: 内転。

4 メディカルリハビリテーション

● 肩鎖関節の構造

肩鎖関節は関節包・関節円板と肩鎖靭帯で形成され、これを烏口鎖骨靭帯（菱形靭帯・円錐靭帯）が補強している（図4）⁸⁾。また、三角筋前部線維と僧帽筋上部線維を結んでいる筋膜線維が肩鎖関節を覆い、肩鎖関節の安定性に寄与している。

それ以外にも、胸鎖乳突筋が鎖骨の頭側に、大胸筋鎖骨部線維、鎖骨下筋が鎖骨の尾側に付着しバランスをとっている⁹⁾。

● 肩鎖靭帯・烏口鎖骨靭帯の機能

肩鎖靭帯の機能は、肩鎖関節の前後方向（特に後方移動・後方回旋）の安定性維持である。烏口鎖骨靭帯は、①肩甲骨の懸垂、②鎖骨と肩甲骨間の緩衝作用、③肩甲骨の回旋時に鎖骨を牽引し回旋させることである¹⁰⁾。

つまり、肩運動時の鎖骨の回旋は、靭帯による受動的な運動であり、挙上・後退や下制・前方牽引に合わせて生じる¹¹⁾。鎖骨は上肢と体幹の距離を調整している、その運動（挙上・下制、後退、前方牽引、前方回旋・後方回旋）は胸鎖関節を軸に生じる。よって、肩鎖関節は可動性が少なく、肩甲骨運動の支点（上方回旋・下方回旋、前傾・後傾、内旋・外旋）となる^{9) 10) 12)}。

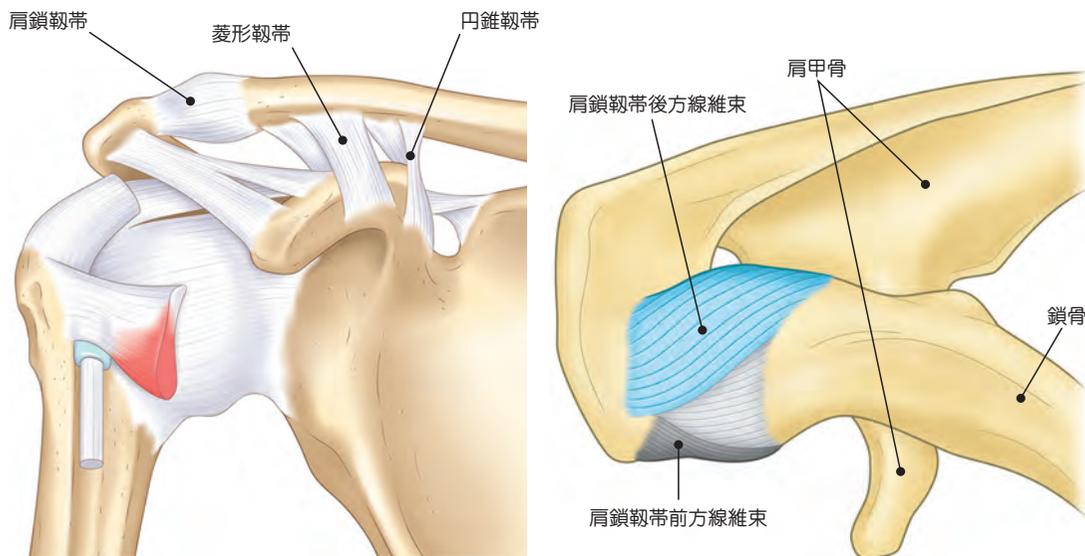


図4 肩鎖靭帯・烏口鎖骨靭帯

肩鎖靭帯の機能は、鎖骨の前後方向（特に後方移動・後方回旋）の安定性維持である。

烏口鎖骨靭帯の機能は、①肩甲骨の懸垂、②鎖骨と肩甲骨間の緩衝作用、③肩甲骨の回旋時に鎖骨を牽引し回旋させることである。

（文献8より改変引用）



図6 僧帽筋中部エクササイズ

A：肘屈曲位。

B：肘伸展位でアームを長くする。

肩甲骨の運動はわかりにくい。Aのように、肩甲骨を最終域まで誘導し、患者に保持させる。またはBのように末梢(手)から軸圧を加えるなど、工夫すると患者は運動方向がわかりやすい。



図7 僧帽筋下部エクササイズ

A：側臥位。上肢の挙上運動に合わせ肩甲骨内転・下制・上方回旋を誘導する。

B：腹臥位。Aと同様に上肢挙上運動に合わせ肩甲骨を誘導するが、僧帽筋の自覚的に収縮が得られにくい場合は、①上肢挙上後、②起始停止を離すように誘導するとよい。

機能が低下することで肩甲骨が内下方転位し、僧帽筋上部線維や肩甲挙筋、大・小菱形筋といった肩甲骨挙上筋に持続的な過緊張が生じているためと考えられる。前鋸筋や僧帽筋中部・下部線維の筋力を改善し、肩甲骨の固定性を高めることが重要である(図5~7)。

が完全骨折になったタイミングで“acute pain”として発症する例があるとされている^{5)~7)}。急性発症例においても、よく問診すると、実際には数週間～数カ月前から肩周囲に違和感を感じていた(あるいは一時的な痛みがあったがすぐに改善した)というような前駆症状がある場合が多く、いわゆる“acute on chronic onset”であることが多い⁶⁾⁷⁾。

●理学所見(身体機能評価)

主訴としては肩甲骨内側部や肩後方の痛みを訴えることが多いが、細かく触診すると、斜角筋(特に中斜角筋)や鎖骨上窩(腕神経叢)にも圧痛を認める患者がほとんどである。また肩甲骨周囲筋の機能低下を認めることが多く、筆者は、elbow push test (EPT)、腹臥位挙上テスト、肩甲骨内転テストを用いて肩甲骨周囲筋の機能評価を行っている(3 **メディカルリハビリテーション**参照)。

急性期症状の肩甲骨や肩後方の痛みは受傷後1~2週程度で軽減されることが多い。一方、肩甲骨周囲筋の機能は受傷後4~6週程度で正常化することが多く、筆者はこれらの機能の改善をスポーツ活動復帰の目安としている。過去の報告でも受傷後4~6週でスポーツ活動の復帰としている報告が散見される^{6)~9)}。

また、本骨折患者にみられる身体所見として、下肢の柔軟性低下、体幹(胸椎)の回旋可動性低下が挙げられる。オーバーヘッドスポーツにおける下肢・体幹・肩甲胸郭関節での運動連鎖を考えたときに、下肢の柔軟性低下・体幹の可動性の低下が生じると肩甲胸郭関節(肩甲骨)などで過剰な代償が生じる可能性がある。このことが前鋸筋や斜角筋を介して第1肋骨への負荷につながった可能性も考えられ、再発防止のためにはこれらの機能改善も必要と考えている。

3 **メディカルリハビリテーション**

第1肋骨疲労骨折は稀な骨折であるが、野球・テニス・水泳・ウエイトリフティングなどオーバーヘッドスポーツでの報告^{9)~12)}が散見される。臨床症状としては、第1肋骨の疲労骨折でありながら、肩甲骨周囲の痛みを主訴とすることが多いという特徴がある。典型例では、肩甲骨周囲の違和感などの前駆症状があり、徐々に症状が増悪し医療機関を受診するという経過をたどるが、時に急性増悪する場合もある^{5)~7)}。これらのことから問診においては受傷機転・疼痛部位・発症までの経過などを聴取する必要がある。

第1肋骨周囲の解剖学的な位置関係は図1, 3を参照。第1肋骨は、中央部には鎖骨下動脈溝、鎖骨下静脈溝があるが、特に鎖骨下動脈溝が薄く解剖学的な脆弱部といわれている。この前後には前斜角筋、中斜角筋の付着部が、外側部には前

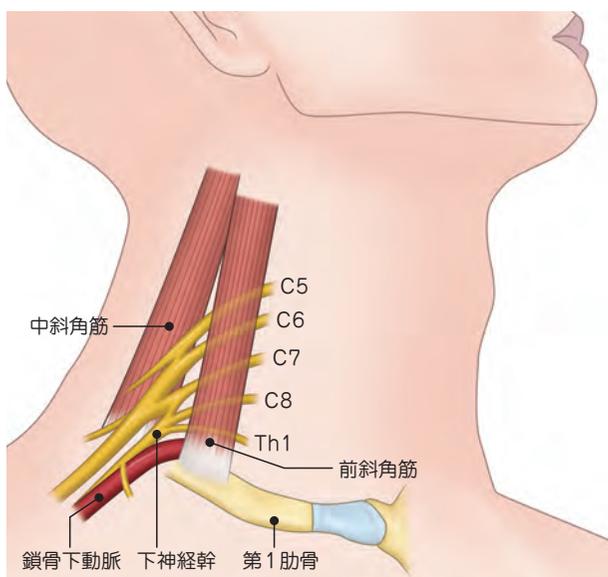


図3 第1肋骨周囲の解剖学的位置関係

鋸筋上部線維の付着部があり、それぞれの筋が同時に収縮すると鎖骨下動脈溝に剪断力が生じることになり、このような動作の繰り返しで本骨折が生じると報告されている³⁾⁴⁾。そのため、リハビリテーションにおいてはこれらの筋に対するアプローチが必要となる。

また、本骨折で肩甲骨周囲に疼痛が出現する要因としては、解剖学的な位置関係からC8、Th1神経根症状の関連が考えられている。C8、Th1神経根は下神経幹を形成し、第1肋骨上を走行しているため、骨折部が刺激となりC8、Th1領域である肩甲骨周囲への関連痛をきたしているとの報告がある¹³⁾。そのため、第1肋骨上を走行している腕神経叢に対する評価・治療も必要であると考えている。

また、再発例の報告¹⁴⁾もあるため、再発予防として下肢・体幹・肩甲帯の機能改善や、競技特性に則した動作への介入も必要である。本骨折患者は、下肢・体幹・肩甲帯の可動性が低下していたり、これらの協調運動が稚拙であることが多く、運動連鎖を考慮した全身の評価も必要となる(表1)。

ここでは、特に本骨折の報告が多い野球選手のリハビリテーションを中心に紹介する。

表1 基本的な評価項目

問診
<ul style="list-style-type: none"> 主訴 現病歴 など
視診
<ul style="list-style-type: none"> 肩甲骨の静的アライメント 肩甲骨の動的アライメント
触診
<ul style="list-style-type: none"> 第1肋骨周囲 肩甲骨周囲
可動性評価
<ul style="list-style-type: none"> 肩甲上腕関節 肩甲骨 胸腰椎 下肢
筋出力評価
<ul style="list-style-type: none"> 腱板 肩甲骨周囲筋