投球動作のステップ脚における接地位置の違いが肩関節の負荷に与える影響
－平地とマウンドの比較－

法所 遼汰^{1*}, 淵本 隆文²

Variations in shoulder loading due to differences in the site of stepping
foot contact during baseball pitching
- Comparison between flat ground and mound conditions -

Ryota Hosho^{1*} and Takafumi Fuchimoto²

¹医療法人清翠会牧整形外科病院, 〒536-0008 大阪府大阪市城東区関目6-15-30 (*Medical Corporation Seisukai Maki Orthopedic Hospital, 6-15-30 Sekime, Joto-ku, Osaka, Osaka 536-0008, Japan*)

²大阪体育大学, 〒590-0496 大阪府泉南郡熊取町朝代台1-1 (*Osaka University of Health and Sport Sciences, 1-1 Asashiro-dai, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-0496, Japan*)

Received: February 19, 2019 / Accepted: August 16, 2019

Abstract This study examined variations in shoulder loading due to differences in the site of stepping foot contact during baseball pitching, while comparing flat ground and mound conditions. Measurement was performed, involving 10 right-handed pitchers who belonged to university baseball clubs, under original flat ground and mound conditions. Pitching movements were classified into 3 categories: [normal], [narrow], and [outside]. Through 3-dimensional motion analysis using a motion capture system, the following results were obtained: 1. The pitching velocity was significantly higher in the [normal] compared with [narrow] and [outside] conditions and under the mound compared with flat ground condition. 2. The peak torque of the shoulder internal rotation was markedly lower in the [narrow] compared with [normal] condition. There were no significant differences between the [normal] and [outside] conditions or between the flat ground and mound conditions. 3. The posterior, superior, and inferior shearing forces, as well as the proximal traction force, which influence the humeral head of the shoulder, were markedly greater in the [normal] compared with [narrow] and [outside] conditions. The anterior and posterior shearing forces and proximal traction force were significantly greater under the mound compared with flat ground conditions. Based on the results, the internal rotation torque of the shoulder, as well as the shearing and traction forces influencing the humeral head of the shoulder, may vary due to differences in the site of stepping foot contact during baseball pitching and between flat ground and mound conditions. The former may also be useful to prevent pitching-related shoulder injuries.

Jpn J Phys Fitness Sports Med, 68(6): 397-406 (2019)

Keywords : throwing shoulder injuries, 3-dimensional motion analysis, internal rotation torque, shearing forces

緒 言

野球選手に多い障害の一つとして、投球障害肩がある。近年、動力学的な視点から投球動作中に発生する肩関節の負荷について検討されており、投球障害肩との関連性についても報告されている¹⁻⁴⁾。Fleisig et al.¹⁾は、最大外旋位直前に危険度の高い瞬間があり、肩関節では67

Nmの内旋トルクと310 Nの前方剪断力が生じると報告している。宮西ら⁵⁾は、フォロースルー期に肩関節が内転・内旋位になると同時に、上腕骨頭が上方に移動する力によって肩峰下インピンジメント症候群が引き起こされる可能性があるとし唆している。そして、投球障害肩は後期コッキング期（足底接地から肩関節最大外旋位）から加速期（肩関節最大外旋位からボールリリース）にかけて生じる肩関節外旋および内旋運動に伴って症状を呈することが多い^{6,7)}ことから、投球動作中に発生する肩関

*Correspondence: hou09p037@yahoo.co.jp

節の負荷の中でも、特に肩関節内旋トルクの値が肩関節の負荷を示す指標の一つとして挙げられる⁸⁾。

一方で、投球障害肩が発生する原因の一つとして、下肢から生じる運動連鎖が上手く行われないことが言われている⁷⁾。松尾ら⁹⁾は、肩関節や肘関節の障害予防のためには、着地からボールリリースにかけてのステップ脚への加重といった下肢動作が重要であると述べている。Davis et al.¹⁰⁾は、ステップ脚が開いて接地することで体幹の回旋が早くなると、過度な肩関節水平伸展が生じ、肩関節の傷害につながると報告している。また、ステップ脚が狭い位置では、投球フォームが不安定となることや体幹の異常な運動が引き起こされることが言われている^{11,12)}。投球動作は全身運動であると言われており⁶⁾、下肢の並進運動の後に身体各部分の回転や回旋運動が顕著となる¹³⁾。このことから、投球動作中に発生する肩関節の負荷は、下肢の運動の影響を受けると推察され、それを定量的に検討することで投球障害肩の予防につながる知見が得られると考えられる。しかしながら、投球動作におけるステップ脚の接地位置を変えることに対し、動力学的な視点から検討した研究は上記以外に見当たらない。そこで本研究の前段階として、平地にてステップ幅およびステップ方向を変えることが肩関節の負荷に与える影響について検討した結果、ステップ幅を通常よりも狭くした位置とステップ方向を通常よりも外側にした位置において、通常と同等の負荷が生じることが示唆された¹⁴⁾。本研究では、より実践に近付けるために、自作の平地とマウンドを使用し、投球動作を行わせた。そして、平地とマウンドの環境要因、ステップ脚の接地位置を通常的位置、通常よりも狭い位置、通常よりも外側の位置に分けた動作要因の違いにより、肩関節における上腕骨頭に作用する剪断力および牽引力と肩関節内旋トルクがどのような影響を受けるのかを検証しようとした。

方 法

被験者 被験者は、体育大学の硬式野球部に所属する投

手の中でも、最高球速が130 km/h以上の右投げ男子10名(年齢 20.3 ± 1.1 歳, 身長 176.1 ± 5.8 cm, 体質量 73.4 ± 8.8 kg)で、過去に肩関節障害の既往のない者とした。本研究は大阪体育大学倫理委員会の承認を得た(承認番号17-10)。なお、被験者には、事前に本研究の目的や測定内容および測定時の危険性について説明し、同意を得た。

自作の平地床およびマウンド 本研究は、自作の平地床とマウンドを使用して行った。平地床に関しては、市販の構造用合板にスポーツタイプの人工芝(ユニチカ社製)を貼付し作成した(Fig. 1)。マウンドに関しては、公認野球規則¹⁵⁾に定められている通りに、投手板の前方15.2 cmの地点から、本塁に向かって182.2 cmの地点まで、30.5 cmにつき2.5 cm下がる傾斜をつけ、市販の構造用合板と木材を組み合わせて作成した。またマウンドの表面には、平地床と同様の人工芝を貼付した(Fig. 1)。

実験手順 測定は屋内に自作の平地床とマウンドを設置して行い、測定した動作はセットポジションからの投球動作とした。

動作条件の規定は、平地床とマウンドのそれぞれにテープを貼ることによって行った(Fig. 2)。平地床に関して、まず基準点を定め、基準点を通る基準線①を設定した。次に、基準点から基準線①に垂直となる基準線②を引いた。そして、被験者には、軸脚となる右足関節(内果と外果を結ぶ線の中点)が基準点上に位置し、爪先が基準線①上に位置するセットポジションの姿勢をとらせた。マウンドに関しても平地と同様に設定したが、基準線①は投手板の前縁とし、その中心を基準点とした。また、投手板への右足の置き方は被験者自身が最も投げやすいように調整し、条件間で変化がないよう規定した。

次に、的の位置を設定するために、まず被験者全員に平地床およびマウンドにてネットへの投球を1試投ずつ行わせた。この際被験者には、基準線②の方向の18.44 m先にホームベースがあることを想定させ、ホームベー

Fig. 1 The original flat ground and mound conditions used in pitching. For the flat ground, a sports type artificial turf was stuck on a commercially available plywood for construction. Mounds were made by combining commercially available structural plywood and wood as stipulated in the official certification of baseball.

ス上の中央でベルトの高さ（床から約70 cm）に向かってボールを投げることをイメージさせ、基準点から4.6 m先に設置したネットに向かって硬式の野球ボールを全力で投げさせた。そして、ボールリリース時のボールの座標値（以下、ボールリリース位置）およびボール速度を算出し、ボールリリース位置からホームベース上に向かう軌跡の間で、4.6 m先のネットを通過する位置を算出し、そこに的（0.3 m四方）を設置した（Fig. 3）。

動作条件は、平地とマウンドのそれぞれに対し、[通常] [狭い] [外] の3条件とした。[通常] は、被験者が最も投げやすい方法で行った。[狭い] では、基準線②上に基準点からの距離が下肢長（右上前腸骨棘と右脛骨内果を結ぶ線）の130%になる地点に印をつけ、その印上にステップ脚である左足関節が接地するように投げさせた（Fig. 2）。一方で、[通常] におけるステップ幅の平均値は、平地では下肢長の $162 \pm 7\%$ 、マウンドでは下肢長の $175 \pm 9\%$ であった。なお、下肢長の平均値は 87 ± 4 cmであった。[外] では、基準線②から左に 15° 回転させた線を基準点から引き、その線上にステップ脚である左足関節が接地するように投げさせた（Fig. 2）。[狭い] および [外] の条件は、被験者が主観的に投げ難いと感じない範囲で決定した。なお、疲労やウォーミングアップ効果による影響を考慮し、試技の順序は被験者毎に変えた。

動作の分析には、9 台の光学式3次元自動動作分析装置（VICON社製）を使用し、サンプリング周波数は250 Hzとした。反射マーカは、投球側の第3中手骨頭、投球側の橈・尺骨茎状突起、投球側の上腕骨内・外側上顆、投球側の肩関節前・後面、両側の肩峰、胸骨上縁、第7頸椎棘突起、両側の肋骨下端、両側の上前腸骨棘、両側の上後腸骨棘、両側の足関節内・外果、両側の踵部、ボー

ル（両側）の計25点に貼付した（Fig. 4）。マーカ番号をFig. 4に示した点1から点25で表すと、右肩関節中心は点6と点7の midpoint, 右肘関節中心は点4と点5の midpoint, 右手関節中心は点2と点3の midpoint と定義した。そして、計測点の座標成分毎に最適遮断周波数を決定し、4次のButterWorthを用いて得られた三次元座標を平滑化した。最適遮断周波数は、Winter¹⁶⁾の方法を用いて決定した。計測点の最適遮断周波数の範囲は7-25 Hzであり、ボール中心の鉛直成分の周波数が最も高く（25 Hz）、左上前腸骨棘の鉛直成分が最も低かった（7 Hz）。このようにして得られた三次元データを基に、逆動力学解析を行い、運動学および運動力学的データを算出した¹⁷⁾。なお、ボール加速時にボールが手に作用する力を外力として計算に用いた。また試技前に、[狭い] と [外] の条件を設定した線上に反射マーカを配置させ、設定した線上の座標値を得ることで、ステップ脚の接地位置と設定した線との誤差を確認した。なお、実験場面ではステップ脚の踵（縦は足長の後ろ1/3、横は靴幅）が5 cm幅のテープ上に位置し、ボールが的に命中した試技を成功試技として採用した。

また、本研究で用いた静止座標系は基準点を原点とした右手系の直交座標系であり、X軸の正は投球方向に対して右方向、Y軸の正は投球方向、Z軸の正は鉛直上方向とした（Fig. 3）。

運動座標系の定義 本研究では、宮西^{17,18)}によるモデルに基づき、肩関節における上腕骨頭に作用する関節間力および肩関節の上腕骨に作用する関節トルクを求めた。宮西^{17,18)}の方法では、肩関節の運動座標系は上腕を基準として定義していた。本研究では、肩関節における上腕骨頭に作用する関節間力および肩関節の内旋トルクの算

Fig. 2 Pitching movements were provided. It was provided by putting a tape on each of flat ground and mound conditions.

Fig. 3 Setting on the target, experimental landscape.
The target was set on the net 4.6 m ahead.

出を行うために、体幹と上腕の長軸を基準とした運動座標系を定義した (Fig. 5)。

体幹を基準とした運動座標系では、胸骨上縁と第7頸椎棘突起を結ぶ線の中点から左右肋骨を結ぶ線の中点へ向かうベクトルを基準軸 (Z軸) とし、胸骨上縁と第7頸椎棘突起を結ぶ線の中点から右肩関節中心へ向かうベクトルとZ軸のベクトルの外積から、これらに直交するベクトル (X軸) を求めた。そして、X軸方向を示すベクトルとZ軸方向を示すベクトルから残る1軸 (Y軸) を決定した。右上腕および右肩関節における運動座標系では、右肘関節中心から右肩関節中心へ向かうベクトルを基準軸 (Z軸) とし、右肩関節中心から右肩関節前面へ向かうベクトルとZ軸のベクトルの外積から、これらに直交するベクトル (X軸) を求めた。そして、X軸方向を示すベクトルとZ軸方向を示すベクトルから残る1軸 (Y軸) を決定した。右前腕および右肘関節における運動座標系では、右手関節中心から右肘関節中心へ向かうベクトルを基準軸 (Z軸) とし、右肘関節中心から右内側上顆へ向かうベクトルとZ軸のベクトルの外積から、これらに直交するベクトル (X軸) を求めた。そして、X軸方向を示すベクトルとZ軸方向を示すベクトルから残る1軸 (Y軸) を決定した。右手および右手関節における運動座標系では、右第3中手骨頭から右手関節中心へ向かうベクトルを基準軸 (Z軸) とし、右手関節中心から右尺骨茎状突起へ向かうベクトルとZ軸のベクトルの外積から、これらに直交するベクトル (X軸) を求めた。そして、X軸方向を示すベクトルとZ軸方向を示すベクトルから残る1軸 (Y軸) を決定した。

ボール速度の算出と的の設置位置の決定 ボール速度 (V_b) は、リリース直後から0.02 s (5フレーム) 後までの平均速度とした。

的の設置位置は次のようにして決定した。まず、通常

投げの練習投球におけるボールリリース時のボールの座標値 (x, y, z) とボールリリース時の水平 y 方向のボール速度 (V_y) を測定した。次にそのボールリリース位置から y 方向速度 V_y のボールが投げられた場合に、目標とする仮想のホームベース上位置 (0, 18.44, 0.7) をボールが通過する三次元座標上での放物線軌道を算出した。そして、その軌道における y 方向4.6 m地点に的の中心を合わせて設置した。

データの算出項目

A) 動作の局面分け

本研究における投球動作の局面は、足底接地から肩関節最大外旋位をコッキング期、肩関節最大外旋位からボールリリース時点までを加速期、ボールリリース時点以降をフォロースルー期とした¹⁹⁾。足底接地は、ステップ脚である左踵部のZ座標が最低値付近で静止した時点とした。また、ボールリリース時点は、第3中手骨頭とボール中心との距離が、各被験者の第3指の指長 (第3中手骨頭から第3指の指先) とボール半径 (4 cm) との和を超えた最初の時点とした。なお、ボールリリース時点を経験として、ボールリリース時点より前はマイナス、ボールリリース時点より後はプラスの時間で示した。

B) 肩関節における関節間力と内旋トルク、肘関節における内反トルク

肩関節における上腕骨頭に作用する関節間力と内旋トルクは次のように算出した。体幹における運動座標系にて、X軸方向に作用する関節間力を前方・後方剪断力、Z軸方向に作用する関節間力を上方・下方剪断力として算出した。また、上腕における運動座標系にて、Z軸方向に作用する関節間力を近位牽引力、Z軸回りに作用する関節モーメントを肩関節内旋トルクとして算出した。前腕における運動座標系にて、X軸回りに作用する関節モーメントを肘関節内反トルクとして算出した。

C) 肩関節における関節角度

肩関節における肩関節外旋、水平屈曲、外転の関節角度は次のように算出した。肩関節外旋角度は、胸骨上縁と第7頸椎棘突起を結ぶ線の中点と両側の肋骨下端を結ぶ線の中点を結んだ線を基本軸、右手関節中心と右肘関節中心を結ぶ線を移動軸として、なす角度とした。肩関節水平屈曲角度は、両側の肩峰を結ぶ線を基本軸、右肩関節中心と右肘関節中心を結ぶ線を移動軸として、なす角度とした。肩関節外転角度は、胸骨上縁と第7頸椎棘突起を結ぶ線の中点と両側の肋骨下端を結ぶ線の中点を結んだ線を基本軸、右肩関節中心と右肘関節中心を結ぶ線を移動軸として、なす角度とした。なお、肩関節最大外旋位およびボールリリース時の関節角度とした。

Fig. 4 Position of reflection marker.

The reflection marker was affixed to a total of 25 points of the body and the ball.

Fig. 5 Motor coordinate system of trunk and upper limb.
 In order to calculate the internal rotation torque and joint reaction force on the shoulder, a motion coordinate system based on the long axis of the trunk and upper arm was defined.

統計処理 各測定項目について、環境（平地・マウンドの2水準、対応あり）と動作（通常・狭い・外の3水準、対応あり）を要因とした二元配置分散分析を行い、交互作用が有意であった場合、単純主効果の検定を行った。多重比較はボンフェローニ法で行った。統計処理は、IBM SPSS Statistics21を使用し、有意水準は5%とした。

結 果

ボール速度 ボール速度は平地における[通常],[狭い],[外]の順に、 33.8 ± 2.4 m/s, 32.1 ± 1.6 m/s, 32.2 ± 1.9

m/s, マウンドにおける[通常],[狭い],[外]の順に、 34.7 ± 2.5 m/s, 32.5 ± 1.8 m/s, 33.0 ± 1.8 m/sであった（Table 1）。その中で、環境および動作の主効果が有意であり、マウンドは平地よりも、[通常]は[狭い]および[外]よりも有意に高い値を示した（Table 1）。

肩関節における関節間力と内旋トルク、肘関節における内反トルク 肩関節における上腕骨頭に作用する関節間力のピーク値において、前方剪断力は環境および動作の主効果が有意であり、マウンドは平地よりも、[通常]は[外]よりも有意に高い値を示した（Table 1）。後方剪断力は環境および動作の主効果が有意であり、マウンドは平地よりも、[通常]は[狭い]および[外]よりも有意に高い値を示した（Table 1）。上方剪断力は動作の主効果が有意であり、[通常]は[狭い]および[外]よりも有意に高い値を示した（Table 1）。下方剪断力は動作の主効果が有意であり、[通常]は[狭い]および[外]よりも有意に高い値を示した（Table 1）。近位牽引力は、環境および動作の主効果とそれぞれの交互作用が有意であった。マウンドは平地よりも、[通常]は[狭い]および[外]よりも有意に高い値を示した。また単純主効果の検定では、[通常]および[外]において、マウンドは平地よりも有意に高い値を示した（Table 1）。

肩関節内旋トルクおよび肘関節内反トルクのピーク値において、動作の主効果が有意であり、[通常]は[狭い]

よりも有意に高い値を示した (Table 1).

足底接地および肩関節最大外旋位, 肩関節間力と肩関節内旋トルクのピーク値の出現時点 足底接地の出現時点 (足底接地からリリースまでの時間) において, 動作の主効果が有意であり, [通常] が [狭い] よりも有意に低い値を示した (Table 2). 一方で, 最大外旋位, 肩関節間力と肩関節内旋トルク, 肘関節内反トルクのピーク値の出現時点には, 各条件間で有意な差は認められなかった (Table 2).

肩関節における関節角度 ボールリリース時の肩関節外旋, 水平屈曲, 外転角度は [通常] が [外] よりも有意に高い値を示した (Table 3). その他の関節角度に, 有意差は認められなかった.

考 察

ボール速度 本研究におけるボール速度は, マウンドでの [通常] が 34.7 m/s で最高, 平地での [狭い] が 32.1 m/s で最低であった. 大学生を対象とした屋外のマウンドにて行われた先行研究において, ボール速度は 38.0 m/s²⁰⁾, 38.3 m/s¹⁾ が計測されており, 本研究の値は屋外のマウンドでの計測値より低かった. 一方で, 平地にて行われた先行研究では, ボール速度は 29.2 m/s¹⁷⁾ を計

測しており, 本研究の方がボール速度は高かった. また本研究では, 環境を平地とマウンドに, ステップ位置を [通常] [狭い] [外] に分けている. それぞれの条件内で比較すると, マウンドは平地よりも, [通常] は [狭い] と [外] よりも, ボール速度が有意に高い値を示した. 蔭山ら²¹⁾ は, マウンドでの投球は平地よりもストライド長を大きくすることによって投球速度を増大させていると報告している. ボール速度の結果から, 平地はマウンドと比較して, [狭い] と [外] は [通常] と比較して, ストライド長が小さいことでボール速度も低くなっていると考えられた.

肩関節における内旋トルク, 肘関節における内反トルク

投球動作中に発生する肩関節における関節トルクは, 特に内旋トルクのピーク値が投球障害肩に影響していると報告されており, その値は 67 Nm¹⁾, 78 Nm⁸⁾ を示している. 本研究における値は, マウンドでの [通常] にて, 73 Nm とほぼ同等の値を記録しており, ピーク値は先行研究と同様に最大外旋位の手前 (−0.05 から −0.043 s 後) で出現した (Table 2). 中村ら²²⁾ が, ストレートはカーブより有意にボール速度が高く, 肩関節内旋トルクはカーブよりストレートの方が高いと報告していることから, ボール速度と肩関節内旋トルクは関係していると考えられる. そして, 本研究における肩関節内旋トルク

Table 1. Peak value of ball speed, joint torque and joint shearing force.

		normal	narrow	outside	significant difference
ball speed (m/s)	flat ground	33.8 ± 2.4	32.1 ± 1.6	32.2 ± 1.9	** : mound>flat, normal>outside
	mound conditions	34.7 ± 2.5	32.5 ± 1.8	33.0 ± 1.8	*** : normal>narrow
anterior shearing force (N)	flat ground	274 ± 37	263 ± 28	252 ± 19	* : mound>flat, normal>outside
	mound conditions	280 ± 34	265 ± 23	262 ± 22	
posterior shearing force (N)	flat ground	478 ± 105	434 ± 91	432 ± 88	* : normal>outside
	mound conditions	501 ± 104	444 ± 82	452 ± 93	** : mound>flat, normal>narrow
superior shearing force (N)	flat ground	103 ± 40	78 ± 42	76 ± 47	* : normal>outside
	mound conditions	102 ± 47	48 ± 48	70 ± 43	** : normal>narrow
inferior shearing force (N)	flat ground	453 ± 131	404 ± 101	389 ± 78	* : normal>outside
	mound conditions	481 ± 111	399 ± 83	395 ± 78	** : normal>narrow
proximal traction force (N)	flat ground	692 ± 125	647 ± 115	624 ± 113	** : mound>flat, normal>narrow • outside
	mound conditions	726 ± 135	652 ± 115	642 ± 111	normal • outside : mound>flat
shoulder internal rotation (N • m)	flat ground	72.4 ± 13	67.0 ± 11	68.2 ± 10	** : normal>narrow
	mound conditions	73.0 ± 15	66.9 ± 9.8	69.0 ± 9.8	
elbow varus (N • m)	flat ground	73.2 ± 14	66.8 ± 13	69.7 ± 11	* : normal>narrow
	mound conditions	75.9 ± 15	66.6 ± 9.1	70.7 ± 9.5	

The pitching velocity was significantly higher in the [normal] compared with [narrow] and [outside] conditions and under the mound compared with flat ground condition. The peak torque of the shoulder internal rotation was significantly higher in the [normal] compared with [narrow]. The peak torque of the elbow varus was significantly higher in the [normal] compared with [narrow]. The posterior, superior, and inferior shearing forces, as well as the proximal traction force, which influence the humeral head of the shoulder, were markedly greater in the [normal] compared with [narrow] and [outside] conditions. The anterior and posterior shearing forces and proximal traction force were significantly greater under the mound compared with flat ground conditions.

average ± standard deviation * : p<0.05, ** : p<0.01, *** : p<0.001

Table 2. The time of foot contact and the appearance time of maximum external rotation, peak torque and peak shearing force in the shoulder joint.

		normal	narrow	outside	significant difference
foot contact (s)	flat ground	-0.141 ± 0.039	-0.162 ± 0.031	-0.151 ± 0.033	** : normal > narrow
	mound conditions	-0.131 ± 0.026	-0.162 ± 0.035	-0.146 ± 0.026	
shoulder maximum external rotation (s)	flat ground	-0.061 ± 0.003	-0.063 ± 0.003	-0.063 ± 0.003	
	mound conditions	-0.060 ± 0.003	-0.062 ± 0.002	-0.062 ± 0.003	
anterior shearing force (s)	flat ground	-0.094 ± 0.011	-0.097 ± 0.011	-0.093 ± 0.013	
	mound conditions	-0.090 ± 0.010	-0.092 ± 0.011	-0.088 ± 0.013	
posterior shearing force (s)	flat ground	0.068 ± 0.004	0.068 ± 0.005	0.071 ± 0.004	
	mound conditions	0.068 ± 0.003	0.067 ± 0.003	0.069 ± 0.002	
superior shearing force (s)	flat ground	-0.092 ± 0.024	-0.099 ± 0.027	-0.089 ± 0.030	
	mound conditions	-0.085 ± 0.016	-0.100 ± 0.021	-0.087 ± 0.026	
inferior shearing force (s)	flat ground	0.024 ± 0.005	0.024 ± 0.004	0.027 ± 0.005	
	mound conditions	0.024 ± 0.003	0.023 ± 0.004	0.027 ± 0.003	
proximal traction force (s)	flat ground	0.002 ± 0.005	0.001 ± 0.005	0.002 ± 0.004	
	mound conditions	0.002 ± 0.004	0.001 ± 0.004	0.001 ± 0.005	
shoulder internal rotation (s)	flat ground	-0.046 ± 0.003	-0.046 ± 0.003	-0.047 ± 0.003	
	mound conditions	-0.046 ± 0.003	-0.047 ± 0.003	-0.046 ± 0.003	
elbow varus (s)	flat ground	-0.038 ± 0.005	-0.037 ± 0.005	-0.037 ± 0.006	
	mound conditions	-0.038 ± 0.005	-0.037 ± 0.006	-0.037 ± 0.005	

The time of foot contact was significantly shorter in the [normal] compared with [narrow]. On the other hand, there were no significant differences in the appearance time of maximum external rotation, peak torque and peak shearing force among stepping conditions.

average ± standard deviation ** : p < 0.01,

Table 3. Joint angle in the shoulder joint.

		normal	narrow	outside	significant difference
MER					
external rotation angle (°)	flat ground	167 ± 21	166 ± 19	161 ± 18	
	mound conditions	168 ± 18	168 ± 17	161 ± 18	
horizontal flexion/extension angle (°)	flat ground	2.6 ± 5.6	2.5 ± 6.0	2.7 ± 6.2	
	mound conditions	3.1 ± 5.6	2.6 ± 5.9	1.6 ± 5.9	
abduction angle (°)	flat ground	103 ± 8.1	105 ± 7.4	103 ± 6.8	
	mound conditions	104 ± 5.6	105 ± 8.2	103 ± 6.6	
BRL					
external rotation angle (°)	flat ground	60 ± 9.0	57 ± 9.3	52 ± 9.0	** : normal>outside
	mound conditions	60 ± 7.0	58 ± 9.0	51 ± 9.0	
horizontal flexion angle (°)	flat ground	9.1 ± 8.5	7.2 ± 8.0	4.5 ± 8.2	* : normal>outside
	mound conditions	9.4 ± 7.2	6.6 ± 7.1	4.2 ± 7.2	
abduction angle (°)	flat ground	108 ± 5.9	106 ± 6.2	103 ± 5.4	** : normal>outside
	mound conditions	108 ± 5.0	105 ± 4.6	102 ± 4.5	

The external rotation angle at BRL was significantly higher in the [normal] compared with [outside] conditions. The horizontal flexion angle at BRL were significantly higher in the [normal] compared with [outside] conditions. The abduction angle at BRL was significantly higher in the [normal] compared with [outside] conditions.

average ± standard deviation * : p < 0.05, ** : p < 0.01

MER: maximum external rotation BRL: ball release

のピーク値は、[狭い] が [通常] よりも有意に低い値を示した (Table 1). この要因として、[狭い] は [通常] と比較すると、ストライド長が小さいことに伴い、ボール速度が低かったためと考えられた。また、平地とマウンドや [通常] と [外] では差が認められなかった。宮永

ら²³⁾ は、踏み出した足が極端にオープンに着地した場合は、腰の回転が早く起こりすぎると報告している。また、投球時に生じる体幹の回旋が遅いと肩関節内旋トルクは低くなると言われている⁸⁾。このことから、[外] では早期の腰の回転に伴い体幹の回旋が早くなり、肩関節内

旋トルクが高くなりやすいと考えられた。そのため、本研究における平地や「外」ではボール速度が低いにも関わらず、マウンドや「通常」と同じぐらい肩関節内旋トルクが高くなり、肩関節内旋トルクによる肩関節への負荷が生じていると考えられた。また肩関節内旋トルクのピーク値は、全ての条件において加速期（最大外旋位からボールリリースの間）に出現していた（Table 2）。後期コッキング期（足底接地から最大外旋位）から加速期にかけて生じる肩関節外旋運動は、身体の前位部に対して遠位部が遅れる現象によって生じると言われている^{7,13)}。本研究の結果にて、「外」は「通常」よりも肩関節最大外旋位およびボールリリース時の肩関節外旋角度が低いことから、肩関節外旋運動が生じ難くなり、ボール速度の割に肩関節内旋トルクが増大することで肩関節外旋から内旋への切り替えを行っていると考えられる。また、蔭山ら²¹⁾の報告によると、投球動作中における身体重心の合成速度は、平地はマウンドよりも低くなる。そのため、並進運動に関して、平地はマウンドよりも不利であると考えられる。これらにより、「外」や平地では身体の開きを早くすることで、より回転運動を利用して動作を遂行していると考えられた。

他方で、投球動作中に発生する肘関節内反トルクは、肩関節の外旋運動が影響していると報告されており¹³⁾、Fleisig et al.¹⁾は肩関節内旋トルクの値が67 Nmに対し、肘関節内反トルクの値は64 Nmとほぼ同等の値を示している。本研究における値は、マウンドでの「通常」にて、肩関節内旋トルクの値が73 Nmに対し、肘関節内反トルクの値は76 Nmと同等の値を記録した。そのため、肩関節と肘関節に生じる負荷は、関連している可能性があると考えられた。

肩関節における関節間力 次に、肩関節における上腕骨頭に作用する関節間力について考える。この関節間力は、前方・後方・上方・下方の剪断力と近位の牽引力に分けられる。まず前方剪断力について、マウンドが平地よりも、「通常」が「外」よりも、有意に高い値を示した（Table 1）。ボール速度も同様の結果を示していることから、ボール速度が高い方が前方剪断力による負荷は生じやすい可能性が考えられた。一方で、「狭い」は「通常」と比較して有意な差が認められなかったことから、ボール速度が低い割に、「通常」と同じぐらいの前方剪断力による肩関節への負荷が生じていると考えられた。また、前方剪断力のピーク値は、全ての条件において、足底接地から最大外旋位の間で出現していた（Table 2）。後期コッキング期から加速期に発生しやすい肩関節前面の疾患として、前方関節唇損傷や腱板腱部損傷があり、上腕骨頭が肩甲骨関節窩に対し前方に変位することが発生要因の一つと言われている⁶⁾。このため、前方剪断力は肩関節前

面の軟部組織により、上腕骨頭が前方へ牽引される力によって発生すると考えられた。今回の結果を、生成される力の観点から考えると、マウンドよりも平地、「通常」よりも「外」の条件の方が投球障害肩は発生し難いことになる。しかし、ボールリリース時の肩関節水平屈曲角度は、「通常」が「外」よりも有意に高い値を示した。中村ら²⁾はボールリリース時の肩関節水平屈曲角度は10°前後が最も肩関節の負荷が少ないと報告している。本研究は、「通常」が9°と同等の値を認めていたが、「外」はそれよりも低い値であった。そのため、投球フォームに関しては「外」よりも「通常」の条件の方が投球障害肩は発生し難いことになる。

後方剪断力については、マウンドが平地よりも、「通常」が「狭い」と「外」よりも有意に高い値を示した。ボール速度も同様の結果を示しており、ボール速度が高い方が上肢の振りは速くなるため、その分の制動力が必要であるためではないかと考えられた。今回の結果を、発生する力の観点から考えると、マウンドよりも平地の方が、「通常」よりも「狭い」と「外」の方が投球障害肩は発生し難いと考えられる。また、後方剪断力のピーク値は、全ての条件において、ボールリリース以降に出現していた（Table 2）。ボールリリース以降の時期には、肩関節内旋運動に伴い、上腕の末梢端は肩関節よりも前方に位置し、肩関節後方の筋群は肩関節の前方への剪断力に対抗するために重要な役割を果たしている²³⁾。また、同時期に発生しやすい肩関節後面の疾患として、後方関節包炎や棘下筋炎があり⁶⁾、後方剪断力は前方へ向かう上腕を肩関節後面の軟部組織が後方へ引っ張ることによって発生すると考えられる。

上方剪断力については、「通常」が「狭い」と「外」よりも有意に高く（Table 1）、ボール速度による影響が大きいのではないかと考えられた。下方剪断力については、「通常」が「狭い」と「外」よりも有意に高い値を示した（Table 1）。ボール速度も同様の結果を示しており、ボール速度が高い方が上肢の振りは速くなるため、その分の制動力が必要であるためではないかと考えられる。また、下方剪断力のピーク値は、全ての条件において、ボールリリース以降の時期を示していた（Table 2）。ボールリリース直後は、肩関節内転および内旋運動に伴い、上腕の中枢端は肩関節に対して上方へ移動しようとするため、下方剪断力は上腕の中枢端が上方へ移動しようとするのを下方へ引っ張ることによって発生すると考えられた。今回の結果を、発生する力の観点から考えると、「通常」よりも「狭い」と「外」の方が投球障害肩は発生し難いと考えられた。

近位牽引力については、「通常」が「狭い」と「外」よりも、マウンドが平地よりも有意に高い値を示した（Table 1）。ボール速度も同様の結果を示しており、ボー

ル速度が高い方が上肢の振りが速くなるためではないかと考えられた。また、近位牽引力のピーク値は、全ての条件において、ボールリリース直後の時期を示していた (Table 2)。このことから、近位牽引力はボールリリース直後に上腕が遠位へ引っ張られるのを引き戻すことによって発生すると考えられた。

〔通常〕と〔狭い〕の肩関節における関節角度は、変化がみられなかった。一方で、後方・上方・下方の剪断力と近位牽引力は、〔通常〕が〔狭い〕よりも有意に高い値を示した。この結果を臨床に応用すると、リハビリテーションの場面で段階的に負荷を上げていく際には、ステップ幅を〔狭い〕位置から始めて徐々に広げていくことで、肩関節への負荷が小さい動作から段階的に進め、障害予防に役立つと考えられた。

結 論

本研究の目的は、平地とマウンドにおいて投球動作のステップ脚における接地位置の違いが、肩関節の負荷に与える影響を検討することで、投球障害肩の予防に役立つ知見を得ることであった。その結果、以下の知見が得られた。

- ①ボール速度は、〔通常〕が〔狭い〕と〔外〕よりも、マウンドが平地よりも有意に高い値を示した。
- ②肩関節内旋トルクのピーク値は、〔狭い〕が〔通常〕よりも有意に低い値を示した。一方で、〔通常〕と〔外〕や平地とマウンドでは有意差が認められなかった。
- ③肩関節の上腕骨頭に作用する後方・上方・下方の剪断力と近位牽引力は、〔通常〕が〔狭い〕と〔外〕よりも有意に高い値を示した。一方で、前方・後方の剪断力と近位牽引力は、マウンドが平地よりも有意に高い値を示したが、上方・下方の剪断力と〔狭い〕の近位牽引力には有意差が認められなかった。

以上のことから、ステップ脚における接地位置の違いおよび平地とマウンドの違いが、肩関節内旋トルクおよび肩関節における上腕骨頭に作用する剪断力と牽引力に影響することが定量的に明らかとなった。今回の結果より、負荷が加わる方向によっては、ボール速度が低い条件であってもボール速度が高い条件と同等の負荷が肩関節に生じることが分かった。その中でも、〔外〕では肩関節内旋トルクによる肩関節への負荷が、平地では上方・下方剪断力による肩関節への負荷が、ボール速度の割に大きくなることが分かった。今回の知見により、投球動作のステップ脚における接地位置の違いは、投球障害肩を予防するための着眼点の一つと考えられる。

利益相反自己申告：申告すべきものはなし

参 考 文 献

- 1) Fleisig GS, Andrews JR, Dillman CJ, Escamilla RF. Kinetics of baseball pitching with implications about injury mechanisms. *Am J Sports Med* 23: 233-239, 1995.
- 2) 中村康雄, 林 豊彦, 中村真理, 中溝寛之, 信原克哉, 加藤直, 飯塚大輔：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.
- 3) 車谷 洋, 村上恒二, 金子文成, 山崎和博：肩関節外旋筋群の疲労が肩関節へ与える力学的変化に関する研究－preliminary study－, 日本臨床スポーツ医学会誌, 15: 420-428, 2007.
- 4) 田中 洋, 立花 孝, 大井雄紀, 二宮祐樹, 駒井正彦, 信原克哉, 林 豊彦, 佐志隆士：投球動作のバイオメカニクスと運動連鎖 投球動作のバイオメカニクスと投球障害, 臨床スポーツ医学, 29: 47-54, 2012.
- 5) 宮西智久, 宮永 豊, 福林 徹, 馬見塚尚孝, 藤井範久, 阿江通良, 功力靖雄, 岡田守彦：投球動作における肘・肩関節の3次元動力学的研究－投球上肢の運動パターンと障害発生の可能性と関連－, 体力科学, 48: 583-596, 1999.
- 6) 信原克哉. 肩 その機能と臨床 第4版, 医学書院, 349-395, 2012.
- 7) 宮下浩二：投球動作のバイオメカニクスと運動連鎖 運動連鎖から見た投球動作, 臨床スポーツ医学, 29: 55-60, 2012.
- 8) Aguinaldo AL, Buttermore J, Chambers H. Effects of upper trunk rotation on shoulder joint torque among baseball pitchers of various levels. *J Appl Biomech* 23: 42-51, 2007.
- 9) 松尾知之, 平野裕一, 川村 卓：投球動作指導における着眼点の分類と指導者間の意見の共通性；プロ野球投手経験者および熟練指導者による投球解説の内容分析から, 体育学研究, 55: 343-362, 2010.
- 10) Davis JT, Limpisvasti O, Fluhme D, Mohr KJ, Yocum LA, Elattrache NS, Jobe FW. The effect of pitching biomechanics on the upper extremity in youth and adolescent baseball pitchers. *Am J Sports Med* 37: 1484-1491, 2009.
- 11) 川島 堅. 野球肩・野球ひじを治す本, 株式会社マキノ出版, 152, 2004.
- 12) 坂田 淳：投球動作の見方と修正, *Sportsmedicine* 167: 35-38, 2015.
- 13) 宮西智久. 野球のピッチング－キネティクス－, バイオメカニクス 身体運動の科学的基礎, 杏林書院, 268-277, 2004.
- 14) 法所遼汰, 西脇秀太朗, 淵本隆文：投球動作のステップ脚における接地位置の違いが肩関節の負荷に与える影響－平地での検討－, 大阪体育学研究, 56: 29-38, 2018.
- 15) 日本プロフェッショナル野球組織, 全日本野球協会. 公認野球規則2016 Official Baseball Rules, ベースボールマガジン社, 2: 200, 2016.
- 16) Winter DA. Biomechanics and motor control of human movement (2nd ed.). *John Wiley and Sons, Inc.*, 41-43, 1990.
- 17) 宮西智久：剛体リンク系における身体運動の3次元関節トルク算出法の実践, 仙台大学紀要, 30: 46-56, 1998.

- 18) 宮西智久, 藤井範久, 阿江通良, 功力靖雄, 岡田守彦: 野球の投球動作におけるボール速度に対する体幹および投球腕の貢献度に関する 3 次元的研究, *体育学研究*, 41: 23-37, 1996.
- 19) Jobe FW, Tibone JE, Perry J, Moynes D. An EMG analysis of the shoulder in throwing and pitching. A preliminary report. *Am J Sport Med* 11: 3-5, 1983.
- 20) Dillman CJ, Fleisig GS, Andrews JR. Biomechanics of pitching with emphasis upon shoulder kinematics. *J Orthop Sports Phys Ther* 18: 402-408, 1993.
- 21) 蔭山雅洋, 鈴木智晴, 藤井雅文, 中本浩揮, 和田智仁, 前田 明: 野球投手におけるマウンドと平地からの投球のバイオメカニクスの比較: 投球速度および投球動作中の下肢および体幹の動作に着目して, *体育学研究*, 61: 517-535, 2016.
- 22) 中村康雄, 林 豊彦: ストレートとカーブの投球動作の運動学・動力学解析, *同志社スポーツ健康科学*, 2: 38-46, 2010.
- 23) 宮永 豊: スポーツ科学・医学大辞典 スポーツ運動科学ーバイオメカニクスと生理学ー, 西村書店, 482-500, 2010.