大学野球投手における下肢関節の力学的仕事量と投球速度との関係

蔭山 雅洋¹⁾ 鈴木 智晴¹⁾ 杉山 敬¹⁾ 和田 智仁²⁾ 前田 明²⁾

Masahiro Kageyama¹, Chiharu Suzuki¹, Takashi Sugiyama¹, Tomohito Wada² and Akira Maeda²: The relationship between the mechanical power of the lower limbs and ball velocity in university baseball pitchers. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 60: 87-102, June, 2015

Abstract : The purpose of this study was to clarify the relationship between ball velocity and the mechanical power of the lower limbs during pitching motion in 30 collegiate baseball pitchers. 3-dimensional positions of 37 reflective markers attached to the subject were tracked by an optical motion capture system (Mac3D System) with 12 cameras. The ground-reaction forces (GRF) of the pivot and stride legs during pitching were determined using 2 multicomponent force plates. Pitching motion was assessed in terms of the joint torques, joint torque powers and work done by each of joint in the lower limbs using a three-dimensional motion system. The joint torques of the hip, knee, and ankle were calculated using inverse-dynamics computation of a musculoskeletal human model (nMotion muscular 1.51). Pitching motion was divided into 2 phases: phase 1 was defined as the time taken from the knee of the stride leg reaching maximal height (MKH, 0%time) to the stride foot making contact with the ground (SFC, 100%time), and phase 2 was defined as the time taken from SFC to the ball being released (REL, 200%time).

These studies revealed that the positive work resulting from hip abduction ($r=0.401$) and knee extension ($r=0.355$) of the pivot leg (Phase 1) was positively correlated with ball velocity ($p<0.05$). The positive work resulting from hip adduction ($r=0.359$) and knee extension ($r=0.409$) of the stride leg (Phase 2) was positively correlated with ball velocity ($p<0.05$). In addition, the pitched ball velocity was positively correlated with pivot hip abduction torque at 74-94%time, pivot hip internal rotation torque at 76-89%time, stride hip adduction torque at 96-114%time, stride hip adduction torque power at 108-114%time, stride knee extension torque at 101-131%time, stride knee extension angular velocities at 158-189%time, and stride knee extension torque power at 156-174%time ($p<0.05$).

These results indicate that a pitcher with high pitched ball velocity can generate hip abduction and knee extension power of the pivot leg, and that these are increased by hip abduction and hip internal rotation torque when moving the body forward before stride foot contact. In addition, it is suggested that high-ball-velocity pitchers can generate hip abduction and knee extension torque in order to stabilize the body just after stride foot contact, and that these are increased by the knee extension power for increasing trunk rotation and trunk twisting from the first half to the middle of the second phase.

Therefore, the present results indicate that pitchers with a higher ball velocity can generate greater mechanical power of the lower limbs for increasing the energy of trunk rotation and the arm.

Key words : pitching motion, kinetics, joint torque, 3-dimensional motion analysis technique, mound
キーワード : 投球動作, キネティクス, 関節トルク, 3次元動作分析法, マウンド

1) 鹿屋体育大学大学院
〒891-2393 鹿児島県鹿屋市白水町1番地
2) 鹿屋体育大学
〒891-2393 鹿児島県鹿屋市白水町1番地
連絡先 前田 明

1. Graduate School of Education, National Institute of
Fitness and Sports in Kanoya
1 Shiromizu, Kanoya, Kagoshima 891-2393
2. National Institute of Fitness and Sports in Kanoya
1 Shiromizu, Kanoya, Kagoshima 891-2393
Corresponding author amaeda@nifs-k.ac.jp

I. 緒 言

野球では、投手が果たす役割は大きく、投手の能力として、どれだけ速い球を投げることができるかは、勝敗を左右するうえで重要な要素の1つとなる(稲尾・吉村, 2001; 功力, 1991). 野球の投球動作では、下肢のはたらきは、投球速度を高めるうえで重要な役割をもつため、下肢の動きは指導上の着眼点として重要性が指摘されてきた(荒木, 2003; 松尾ほか, 2010; Myers and Gola, 2000; 高橋, 2006; 与田, 2005). 例えば、元プロ野球投手と熟練指導者の投球動作の指導に関する知識を整理および分類した研究(松尾ほか, 2010)によると、投球速度の向上には、「踏込脚膝の最大高から踏込脚接地時までの軸脚への加重」と「踏込脚接地からボールリリースまでにかけての踏込脚への加重」といった下肢動作が重要であることが指摘されている. また投球動作は、下肢によって生み出された力、エネルギー、速度などがタイミングよく順次に加算・伝達されて末端へ伝わり、末端のエネルギーや速度を大きくできるという運動連鎖の原則が成り立つ(阿江・藤井, 2002, pp. 13-14; Kneiblum and Barthels, 1985). このように、下肢のはたらきは、大きい投球速度を獲得するうえで、重要な役割を果たしていると言える.

投球速度に関わる投球動作中の下肢のはたらきに関しては、投球動作中の地面反力の計測やキネマティクス・キネティクス分析を通して検討されてきた. アメリカ人の高校生と大学生の投手7名を対象に投球動作中の両脚に作用する地面反力を計測した研究(Mac Williams et al., 1998)によると、軸脚および踏込脚に作用する投球方向への前後成分の最大値は、ボール速度と相関性の高いボールリリース時の手首の速度と高い相関関係を示したと報告されている. そして、投球速度の高速者(138.2 ± 2.2 km/h)と低速者(119.5 ± 3.2 km/h)の投球動作を比較した研究(Matsuue et al., 2001)によると、高速者の約80%は、リリース直前に、踏込脚の膝関節が伸展を行ったの

に対し、低速者の約40%は膝関節が屈曲を行ったことから、踏込脚の膝関節が伸展する動作が投球速度の高速者の特徴であると報告されている. さらに、野球の投球動作における下肢の関節トルクおよび関節トルクパワーを算出し、下肢の役割を検討した研究(島田ほか, 2000)では、軸脚は各関節の伸展トルクを発揮し、踏込脚は股関節の伸展トルクを発揮することにより、体幹や投球腕を支持していると報告されている. 野球のピッチング動作においては、軸脚の股関節トルクによって生み出された力学的エネルギーが下胴および上胴を経由し、さらに踏込脚接地後に上胴が前回旋することで生じた投球腕の関節力により、投球腕各部位およびボールに伝達される(島田ほか, 2004)と報告されている. このように、投球動作中の下肢は、体幹や上肢を支えるうえで重要なはたらきをなしており、投球速度が大きい投手は、下肢によって生み出されたエネルギーを末端部へと伝達させる能力に優れていると考えられる. しかしながら、投球動作中の力学的仕事量と投球速度の関係を検討した研究(島田ほか, 2000, 2004)では、平地における投球動作を計測しており、投球動作中の力学的仕事量がマウンドでの投球動作に反映されるかは不明である. また投球速度に影響する投球動作中の力学的仕事量を検討した研究(平山ほか, 2008, 2010; 島田ほか, 2000)では、踏込脚接地時からリリース時までの加速局面を分析対象としており、踏込脚接地までの軸脚の力学的仕事量は定かではない. さらには、野球投手の投球動作中における下肢の力発揮およびパワー発揮が投球速度にどのように影響しているかわからない. そのため、本研究ではフォースプラットフォームを設置できるように、マウンドの規格と類似した簡易マウンドを作成し、投球動作中における下肢の各関節のトルク、トルクパワー、力学的仕事量を手掛かりに野球投手に対する投球速度を高めるための基礎的資料を得ることとした.

そこで本研究は、大学野球投手を対象に、投球動作中における軸脚および踏込脚における下肢関節の力学的仕事量と投球速度との関係について明

らかにすることとした。

II. 方 法

1. 被検者

被検者は、男子大学生野球投手30名（右投手25名および左投手5名，年齢 19.6 ± 0.9 歳，身長 177.4 ± 5.2 cm，体重 73.9 ± 10.7 kg，投球速度 127.1 ± 6.4 km/h）を対象とした．本研究は鹿屋体育大学倫理審査小委員会に倫理審査申請書を提出して承諾を受けた．被検者には，事前に本研究の目的や測定内容，測定時の危険性について説明し，書面にて実験参加の同意を得た．

2. 実験

2.1. 投球試技

測定に先立ち，被検者にはストレッチを含むウォーミングアップを十分に行わせた後，簡易マウンド（後述）にて投球練習を行わせた．投球練習終了後，休息を挟み，被検者の疲労感がないことを確認した後に，被検者には18.44 m先の的に対して，ストレート10球の全力投球を行わせた．そのなかで，投球速度が最も大きかった試技を分析の対象とした．

2.2. 投球動作の測定とデータ処理

実験は，室内にて簡易マウンドを設置し，18.44 m先の的に投球を行わせた．マウンドは，

公認野球規則（日本プロフェッショナル野球組織ほか，2014）によると，本塁の高さよりも25.4 cm高いところにあり，投手板の前方15.2 cmの地点から，本塁に向かって182.9 cmの地点まで，約 4.8° の傾斜とされている．そのため，本研究で使用した簡易マウンドは，投手板から踏込脚（右投手は左脚，左投手は右脚）が接地した際のつま先までの距離を，高さ15 cm，ストライド幅180 cm，傾斜角 4.8° と想定し作成した（Figure 1）．また2台のフォースプラットフォームは，水平面上に平行に設置した．なお簡易マウンドは，設営の都合上，実際のマウンドより5.4 cm高いものとなった．それゆえ，的も5.4 cm高く設置した．そして，投球中および投球終了後に，被検者の落下を防止するため，簡易マウンドの周りには，簡易マウンドと同じ高さの干渉台を設置した．なお，本研究では右投手の場合は，右脚を軸脚，左脚を踏込脚とした（左投手の場合は逆とした）．

測定は光学式3次元動作解析システム（Mac3D, Motion Analysis社製）の12台の専用高速度カメラEagleと2台のフォースプラットフォーム（Z15907, Kistler社製）を使用した．投球速度は，スピードガン（Z2M-1035, Mizuno社製）を用いて計測した．スピードガンは測定誤差が少ない投球方向に配置（宮西ほか，2000）し，照準を被検者のボールリリース位置に向けて

Figure 1. Experimental setup.

測定を行った。

光学式3次元動作解析システムによる測定 (Figure 1) では、身体部位37点に反射マーカー (直径 13 mm) を貼付し、撮影速度毎秒500コマ、シャッタースピード毎秒2000コマで身体各部位の3次元座標を計測した。Mac3Dのキャリブレーションによるカメラ12台の較正点の実測3次元座標値と算出された3次元座標値の平均誤差は、1.0 mm 以下であった。身体部位37点は、頭部5点 (頭頂、頭部前部、頭部後部、左右の耳珠点)、上肢10点 (左右の肩峰、肘外側、手首内果、手首外果、第3中手指節関節)、体幹部6点 (胸骨上縁、胸骨下縁、右肩甲骨下郭、左右の上前腸骨棘、仙骨)、下肢16点 (左右の大転子、大腿骨外側上果、大腿骨内側上果、外果、内果、踵後部、第3中足骨頭、第5中足骨頭) とした。

身体各部位の3次元座標は、Mac3D モーションキャプチャーシステムの制御ソフトウェア (Cortex 1.1.4.368, Motion Analysis 社製) を用いて、DLT法 (Direct Linear Transformation method) により算出した。また身体各部位の3次元座標は、数値解析ソフトウェア (MATLAB R2010b, The Math Works) を用い、遮断周波数 13.4 Hz による位相ずれなしの4次の Butterworth 型デジタルフィルタによって平滑化を行った (Fleisig et al., 1999)。投球動作中の両脚に作用する地面反力は、フォースプラットフォームにより計測し、専用アンプを介して、サンプリング周波数 2000 Hz でパーソナルコンピュータに取り込んだ。なお、3次元座標と地面反力のデータは、光学式3次元動作解析システムに付属する A/D ボードを介して同期した。そして、これらのデータから各関節の角度、角速度、トルクおよびトルクパワーを算出した。静止座標系は、ピッチャープレートからホームプレートに向かうベクトルを Y 軸、鉛直方向のベクトルを Z 軸、Y および Z 軸に垂直で3塁方向へ向かうベクトルを X 軸とした。

2.3. データ算出項目と方法

本研究では、各関節の角度、角速度、トルク

は、先行研究 (Kouchi et al., 2000 ; Nakamura et al., 2005 ; Yamane et al., 2005 ; Yamane and Nakamura, 2003) を基に作成された筋骨格モデル動作解析ソフト (nMotion muscular 1.51, nac 社製) を用い算出した。筋骨格モデル動作解析ソフトは、光学式3次元動作解析システムから得られた3次元座標と地面反力のデータから計算されるものである。以下に、身体各部分および関節の座標系の定義、身体重心座標、関節の角度、角速度、トルクの算出方法について示す。

2.3.1. 身体各部分および関節の座標系の定義

本研究では、各関節角度は、モーションキャプチャーデータから得られた3次元座標を用い、人体モデルの逆運動学 (Yamane and Nakamura, 2003) によって計算した。そのため、筋骨格モデル動作解析ソフト (nMotion muscular 1.51, nac 社製) をもとに、身体部分を53の剛体リンクモデル (link-segment model) と仮定した。すべてのセグメントは、両側の上腕部、前腕部 (橈骨側、尺骨側)、手部、大腿部、下腿部 (腓骨側、脛骨側)、膝蓋骨、つま先、後足部、そして、頭部、胸骨、鎖骨、肩甲骨、頸部 (第1頸椎から第7頸椎)、胸部 (第1胸椎から第12胸椎)、腰部 (第1腰椎から第5腰椎) とした。そして、関節座標系の設定 (Figure 2) は、各セグメントの関節中心を原点とし、x 軸、y 軸、z 軸と定義した。

本研究では、解剖学的な可動域制限に基づき、股関節では屈曲伸展、内外転および内外旋角度を、膝関節では屈曲伸展および内外旋角度を、足関節では底背屈、内外転および内外反と定義した。各関節の角度定義は、日本整形外科学会ならびに日本リハビリテーション医学会が1995年に制定した「関節可動域表示ならびに測定法」に則った。関節の角度における符号の正負については、股関節では屈曲、内転および内旋を正、伸展、外転および外旋を負、膝関節では屈曲および内旋を正、伸展および外旋を負、足関節では底屈、内転および内反を正、背屈、外転および外反を負とした。

Figure 2. Definition of coordinate system fixed at the hip, knee and ankle joints.

2.3.2. 身体重心座標の算出

各セグメントの質量、セグメント長、重心位置、主慣性モーメントは、“AIST 人体寸法データベース1997—98” (Kouchi et al., 2000) を用い、モーションキャプチャーデータから得られた三次元座標から算出した。各セグメントの質量、セグメント長、重心位置、主慣性モーメントは、被検者の年齢、性別、身長、体重の基本パラメータから推定された。人体寸法データベースは、産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センターによって計測された日本人成年男子110名分の特徴的な49か所の寸法と体重の計50個のパラメータを使用した。

2.3.3. 下肢の関節角速度、関節トルクの算出

角速度は、算出された下肢の各関節の角度を時間微分することで算出した。また本研究では、モーションキャプチャーデータから得られた3次元座標および地面反力データから、逆動力学計算法 (Nakamura et al., 2005; Yamane et al., 2005) に基づき、投球動作中の下肢の関節トル

クを算出した。関節トルクは、一般的なニュートンオイラー法 (Newton-Euler inverse dynamics algorithm) による運動方程式 (Orin et al., 1979) を用いて、以下の式から算出した。

$$\tau = M\ddot{\theta} + c - \sum_{i=1}^{Nc} J_{ci}(\theta)^T F_{ci}$$

τ : 関節トルク

θ : 関節角度

$\dot{\theta}$: 関節角速度

$\ddot{\theta}$: 関節角加速度

M : セグメント質量

c : コリオリ力・求心力

J_{ci} : 接地している関節におけるヤコビ行列

F_{ci} : 接地している関節にかかる床反力 (力とモーメント)

$\sum_{i=1}^{Nc} J_{ci}(\theta)^T$: 接地している関節におけるヤコビ行列の転置行列

関節の角速度およびトルクにおける符号の正負については、股関節では屈曲、内転および内旋を正、伸展、外転および外旋を負、膝関節では屈曲、内旋を正、伸展、外旋を負、足関節では底屈、内転、内反を正、背屈、外転、外反を負とした。なお、膝関節の内外反は解剖学的には運動がほとんど生じない (日本整形外科学会, 1995; 日本リハビリテーション医学会, 1995) とされているので、関節角速度および関節トルクパワーについては割愛した。

2.3.4. 下肢の関節トルクパワーの算出

関節トルクパワーは、得られた各関節の関節トルクと関節角速度の内積とした。

2.3.5. 下肢の力学的仕事量の算出

投球動作中の各関節における関節トルクによる力学的仕事量は、関節トルクパワーを数値積分して算出した。力学的仕事を解釈する場合、関節トルクパワーの大きさの他に、その時の各関節のトルクおよび角速度を考慮する必要がある (阿江・藤井, 2002, pp. 89-96)。例えば、股関節の伸展トルク (−) を示した場合、屈曲角速度 (+) を示せば、関節トルクパワーは負となるが、この場

合はその関節の伸筋群がエキセントリックな筋活動によってパワーを発揮していると解釈される。そのため、本研究では関節トルクパワーが正の場合を正仕事、負の場合を負仕事に分けて算出し、正仕事および負仕事の絶対値の和を絶対仕事とした。

2.4. 動作の局面分け

本研究では、Fleisig et al. (1999) にない、投球動作を2つの局面に分けた (Figure 3)。第1局面は、踏込脚の膝関節が最も高く上がった時点 (以下「MKH 時」と略す) から踏込脚が接地する (以下「SFC 時」と略す) までとし、第2局面は、SFC 時からボールリリース (以下「REL 時」と略す) までとした。各局面については、要した時間をそれぞれ100%とし、3次のスプライン関数を用いて、全てのデータを規格化した。つまり、各局面の規格化時間は、MKH が0%, SFC が100%, REL が200%となっている。規格化したデータは、1%毎に平均値を求めた。なお、関節トルクおよび関節トルクパワーは、体重あたりの相対値として算出した。

3. 統計処理

基本統計量は平均値±標準偏差 (SD) により示した。本研究では、下肢関節の角速度、トルク、トルクパワーと投球速度との関係を検討する

ため、これらの各局面の時系列データの規格化時間1%ごとに、ピアソンの積率相関係数を算出した。また下肢関節の力学的仕事量と投球速度との関係を検討するため、ピアソンの積率相関係数を算出した。本研究では、すべての検定において有意水準を5%未満とした。なお、すべての検定は統計処理ソフト IBM SPSS Statistics 19 (IBM 社製) を用いた。

Ⅲ. 結 果

1. 股関節

Figure 4 は、軸脚と踏込脚の股関節における関節トルク、関節角速度、関節トルクパワーの変化、およびそれらの項目と投球速度との有意な相関関係を示した地点をそれぞれ動作局面別に示したものである。軸脚の内転 (+) 外転 (-) トルクは、74—94, 102—152, 179—191%time ($r = -0.557 \sim -0.365$) において、投球速度と有意な負の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。軸脚の内旋 (+) 外旋 (-) トルクは、76—89%time ($r = 0.379 \sim 0.428$) において、投球速度と有意な正の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。軸脚の屈曲 (+) 伸展 (-) トルクは、0—5, 10—18, 21—25, 69—77%time ($r = 0.364 \sim 0.394$) において、投球速度と有意な正の相関関係 ($p < 0.05$) を示

Figure 3. Phases of pitching motion.

Figure 4. Changes in torques, angular velocities and torque power on hip joint of pivot and stride legs.

した．軸脚股関節における関節トルクパワーは、内転（+）外転（-）のトルクパワーでは93—96%time ($r=0.381-0.415$)，屈曲伸展のトルクパワーでは67—76%time ($r=0.409-0.460$)において、投球速度と有意な正の相関関係 ($p<0.05$) を示した．また内転（+）外転（-）のトルクパワーでは110—151%time ($r=-0.515-0.367$)において、投球速度と有意な負の相関

関係 ($p<0.05$) を示した．

また踏込脚における関節トルクは、内転（+）外転（-）トルクでは、96—114%time ($r=0.450-0.547$)，屈曲（+）伸展（-）トルクでは、109—125%time ($r=0.373-0.412$)において、投球速度と有意な正の相関関係 ($p<0.05$) を示した．踏込脚における内転（+）外転（-）の角速度は82—83%time ($r=0.370, 0.374$)に

において、投球速度と有意な正の相関関係 ($p < 0.05$) を、内旋 (+) 外旋 (-) の角速度は 77%time ($r = -0.375$) において、投球速度と有意な負の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。踏込脚の関節トルクパワーは、内転 (+) 外転 (-) トルクパワーでは、108—114%time ($r = 0.366$ — 0.377)、内旋 (+) 外旋 (-) トルクパワーでは、174—176%time ($r = 0.379$ — 0.592) において、投球速度と有意な正の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。

2. 膝関節

Figure 5 は、軸脚と踏込脚の膝関節における

関節トルク、関節角速度、関節トルクパワーの変化、および投球速度との有意な相関関係を示した地点をそれぞれ動作局面別に示したものである。軸脚における膝関節の屈曲 (+) 伸展 (-) トルクは、0—4%time ($r = -0.409$ — -0.373) において、投球速度と有意な負の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。また踏込脚における膝関節の屈曲 (+) 伸展 (-) トルクは、73—77%time ($r = 0.363$ — 0.424) においては投球速度と正の相関関係 ($p < 0.05$) を、33—34%time ($r = -0.363$ — -0.361) および 101—131%time ($r = -0.518$ — -0.364) においては投球速度と有意な負の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。膝関節の内転 (+) 外転 (-)

トルクは、軸脚では105—148 % time ($r = -0.468 - -0.367$)において投球速度と負の相関関係 ($p < 0.05$) が、踏込脚では99—105 % time ($r = 0.367 - 0.390$)において投球速度と正の相関関係 ($p < 0.05$) が示された。膝関節の内旋 (+) 外旋 (-) トルクは、軸脚では66—84 % time ($r = -0.463 - -0.362$)、踏込脚では149—171 % time ($r = -0.445 - -0.362$)において、投球速度と有意な負の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。

軸脚における屈曲 (+) 伸展 (-) の角速度は、98—112 % time ($r = 0.361 - 0.532$)において、投球速度と有意な正の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。また屈曲 (+) 伸展 (-) の角速度は、軸脚では159—177 % time ($r = -0.398 - -0.364$)、踏込脚では132, 158—189 % time ($r = -0.553 - -0.373$)において、投球速度と有意な負の相関関係 ($p < 0.05$) が示された。

屈曲 (+) 伸展 (-) のトルクパワーは、軸脚では104—107 % time ($r = 0.361 - 0.374$)、踏込脚では58—61 % time, 76—77 % time, 101 % time, 103—104 % time, 156—174 % time ($r = 0.363 - 0.508$)において、投球速度と有意な正の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。また軸脚における内旋 (+) 外旋 (-) のトルクパワーは、65—70 % time ($r = -0.454 - -0.380$)において、投球速度と有意な負の相関関係 ($p < 0.05$) が示された。

3. 足関節

Figure 6 は、軸脚と踏込脚の足関節における関節トルク、関節角速度、関節トルクパワーの変化、投球速度との有意な相関関係を示した地点をそれぞれ動作局面別に示したものである。足関節の底屈 (+) 背屈 (-) トルクは、軸脚では0—4 % time ($r = -0.390 - -0.366$)、踏込脚では85 % time ($r = -0.399$)、89—97 % time ($r = -0.424 - -0.363$)、99—106 % time ($r = -0.576 - -0.365$)において、投球速度と有意な負の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。また踏込脚における足関節の底屈 (+) 背屈 (-) トルクは、189—200 % time ($r = 0.363 - 0.387$)において、投球

速度と有意な正の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。足関節の内転 (+) 外転 (-) トルクは、軸脚では63—91 % time ($r = -0.532 - -0.369$)において、踏込脚では74—76 % time ($r = -0.458 - -0.376$) および170—200 % time ($r = -0.474 - -0.368$)において、投球速度と有意な負の相関関係 ($p < 0.05$) が示された。足関節の内反 (+) 外反 (-) は、軸脚では0—2, 7—37, 75—90 % time ($r = -0.365 - -0.481$)において、投球速度と正の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。

底屈 (+) 背屈 (-) の角速度は、軸脚では171—178 % timeにおいて投球速度と有意な負の相関関係を示し、踏込脚では153—180 % time ($r = 0.371 - 0.499$)において、投球速度と有意な正の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。内転 (+) 外転 (-) の角速度は、軸脚では31—36 % time ($r = 0.369 - 0.387$)において、投球速度と有意な正の相関関係 ($p < 0.05$) を示し、踏込脚では46—49 % time ($r = -0.421 - -0.395$)において、投球速度と有意な負の相関関係 ($p < 0.05$) が示された。軸脚における内反 (+) 外反 (-) の角速度は、63—67 % time ($r = 0.361 - 0.437$)において、投球速度と有意な正の相関関係 ($p < 0.05$) を、168—176 % time ($r = -0.372 - -0.361$)において、投球速度と有意な負の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。また踏込脚は、78—79 % time ($r = 0.428, 0.429$)において、投球速度と有意な正の相関関係 ($p < 0.05$) を、151—171 % time ($r = -0.593 - -0.374$)において、投球速度と有意な負の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。

底屈 (+) 背屈 (-) のトルクパワーは、軸脚では58—64 % time ($r = 0.365 - 0.445$)、踏込脚では146—178 % time ($r = 0.366 - 0.575$)において、投球速度と有意な正の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。また内転 (+) 外転 (-) のトルクパワーは、軸脚では57—68 % time ($r = 0.367 - 0.513$)において、投球速度と有意な正の相関関係 ($p < 0.05$) を、踏込脚では157—167 % time ($r = -0.371 - 0.435$)において、投球速度と有意な負の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。

Figure 6. Changes in torques, angular velocities and torque power on ankle joint of pivot and stride legs.

4. 投球動作中の下肢の力学的仕事量

Figure 7は、各局面における軸脚および踏込脚の股関節、膝関節、足関節による力学的仕事量を示し、正、負、絶対仕事量と投球速度の有意な相関関係であった項目の相関係数を示したものである。軸脚における力学的仕事量は、第1局面では、膝関節の絶対仕事量 ($1.35 \pm 0.55 \text{ J/kg}$)、股関節の正仕事量 ($2.08 \pm 0.73 \text{ J/kg}$)、足関節の正

仕事量 ($0.93 \pm 0.33 \text{ J/kg}$) が投球速度と有意な正の相関関係 ($p < 0.05$) を示し、膝関節の負仕事量 ($-0.74 \pm 0.27 \text{ J/kg}$) が投球速度と有意な負の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。また第2局面では、軸脚股関節の負仕事量 ($-0.50 \pm 0.26 \text{ J/kg}$) は、投球速度と有意な負の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。一方、踏込脚における力学的仕事量は、第2局面において、膝関節 ($0.30 \pm 0.20 \text{ J/kg}$) およ

Figure 7. Mechanical works calculated from the joint torque power of pivot and stride leg.

び足関節 (0.12 ± 0.10 J/kg) の正仕事は投球速度と有意な正の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。

Figure 8 は, Figure 7 のデータをもとに, 軸脚および踏込脚の各関節における力学的仕事量を詳細に示し, その力学的仕事量と投球速度の有意な相関関係であった項目の相関係数を示したものである。なお, 投球速度と有意な相関関係を示した下肢の力学的仕事量 (Figure 7) は, 軸脚では第1局面が主に, 踏込脚では第2局面に示されたことから, 軸脚は第1局面の力学的仕事量を, 踏込脚は第2局面の力学的仕事量を示した。軸脚における正仕事は, 股関節の外転 (1.00 ± 0.59 J/kg), 膝関節伸展 (0.52 ± 0.31 J/kg), 足関節の背屈 (0.00 ± 0.01 J/kg) において, 投球速度と有意な正の相関関係 ($p < 0.05$) を, 股関節外旋 (0.01 ± 0.01 J/kg) および足関節の外反 (0.00 ± 0.00 J/kg) においては投球速度と有意な負の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。また軸

脚における負仕事は, 股関節の伸展 (-0.20 ± 0.24 J/kg) および足関節の底屈 (-0.11 ± 0.08 J/kg) において, 投球速度と正の相関関係 ($p < 0.05$) を示し, 膝関節の外旋 (-0.12 ± 0.07 J/kg) においては投球速度と負の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。

踏込脚における正仕事は, 股関節の内転 (0.18 ± 0.09 J/kg) および外転 (0.03 ± 0.04 J/kg), 膝関節の伸展 (0.29 ± 0.20 J/kg), 足関節の底屈 (0.09 ± 0.08 J/kg) において, 投球速度と正の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。また踏込脚における負仕事は, 足関節の外反 (-0.01 ± 0.01 J/kg) において, 投球速度と正の相関関係 ($p < 0.05$) を示し, 膝関節の外旋 (-0.04 ± 0.02 J/kg) において, 投球速度と負の相関関係 ($p < 0.05$) を示した。

Figure 8. Relationships between the detailed mechanical works and ball velocity.

Ⅳ. 考 察

1. 力学的仕事量の算出値について

本研究における投球動作中の踏込脚の力学的仕事量 (Figure 7) は、平地を用いた先行研究 (島田ほか, 2000, 2004) よりも大きく、簡易マウンドを用いた先行研究 (平山ほか, 2010) と同等の値であった^{注)}。地球上で運動を行う場合、ヒトは必ず重力を受けている。この重力によるエネルギーを重力の位置エネルギーといい、高いところにある物体は、低いところにある物体よりも大きなエネルギーを持つことになる。このことから、マウンド上における投球動作中の踏込脚の力学的仕事量は、平地よりも大きくなると考えられる。つまり、先行研究 (島田ほか, 2000, 2004) と結果が異なったことは、マウンド上で行ったという測定方法の違いが影響していると示唆される。

また本研究では Figure 7 のデータをもとに、各関節の仕事量と投球速度との関連性を詳細に検討したところ、軸脚では股関節の外転および膝関節の伸展による正仕事、踏込脚では股関節の内転、外転、膝関節の伸展および足関節の底屈による正仕事、投球速度と有意な正の相関関係を示した (Figure 8)。これらの結果は、投球速度が大きい投手は、体幹部や上肢へのエネルギーを大きくするために、下肢の力学的仕事量を大きくしていると示唆するものといえる。

以下では、投球速度と関連する軸脚および踏込脚における下肢のキネマティクスおよびキネティクスについて議論する。

2. 軸脚の役割について

軸脚における股関節の正仕事は、投球速度と有意な正の相関関係を示し (Figure 7)、詳細な力学的仕事量は、股関節の外転および膝関節の伸展

による正仕事は、投球速度と有意な正の相関関係を示した (Figure 8). このことは、投球速度が大きい投手は、股関節の外転および膝関節の伸展によるパワー発揮を大きくしていることを意味している. 投球動作中の軸脚は、体幹などを捕手方向に移動する、いわゆる「体重移動」を生み出すための重要な役割を担っている (高橋, 2006). 島田ほか (2000) によると、軸脚の役割は、ストライド局面では伸展トルクを発揮して身体を支持し、捻り局面では股関節の伸展トルクにより、下胴を回旋させ、体幹の捻りを生み出す働きをしていると報告されている. また Campbell et al. (2010) によると、投球動作中の下肢における腓腹筋、内側広筋、大殿筋、大腿二頭筋の筋放電量は、最大随意収縮がそれぞれ75%, 68%, 73%, 48%と高い筋活動を示したと報告されている. このことは、軸脚における股関節の伸展動作で発揮される大殿筋や大腿二頭筋、外転動作で発揮される大殿筋、膝関節の伸展動作によって発揮される内側広筋によって活動する筋群が影響していると推察される. これらの先行知見を踏まえると、軸脚は股関節の外転および膝関節の伸展による力発揮によって、投球方向への「体重移動」行っていると考えられる.

軸脚股関節の内外転トルクは、踏込脚接地にかけて外転トルクを示し、踏込脚接地直前に投球速度と有意な負の相関関係を示した (Figure 4). また軸脚股関節の内外旋トルクは、第1局面の中盤から踏込脚接地直前にかけて内旋トルクを示し、踏込脚接地直前に投球速度と有意な正の相関関係を示した (Figure 4). これらの結果は、投球速度が大きい者は踏込脚接地直前に、軸脚股関節の外転動作および内旋動作による力発揮をしていることを意味している. 投球速度の高速者 (134.6 ± 2.9 km/h) と低速者 (119.9 ± 2.9 km/h) の投球動作を比較した研究 (Kageyama et al., 2014) によると、軸脚に作用する進行方向の地面反力の最大値が出現する時点 ($87.6 \pm 6.4\%$ time) での体幹の角度 (3 塁側からみた角度) において、高速者 ($16.7 \pm 2.9^\circ$) は、低速者 ($12.0 \pm 4.3^\circ$) と比較すると軸脚側に傾いていることが

報告されている. このことを踏まえると、投球速度が大きい投手は、体幹を軸脚側に傾けながら、股関節の外転および内旋による力発揮によって維持し、投球方向へ上体が突っ込まないような抑制する働きを行っていると考えられる.

したがって、投球速度が大きい投手は、股関節の外転および膝関節の伸展による力学的仕事量を増大させており、踏込脚接地直前に股関節の外転および内旋による力発揮を行うことで、投球方向へ上体が突っ込まないように体幹を軸脚側に維持しながら、投球方向への体重移動を行っていると思われる.

3. 踏込脚の役割について

踏込脚における膝関節の正仕事は、投球速度と有意な正の相関関係を示し (Figure 7), 詳細な力学的仕事量は、股関節の内転および膝関節の伸展による正仕事は、投球速度と有意な正の相関関係を示した (Figure 8). このことは、投球速度が大きい投手は、股関節の内転および膝関節の伸展によるパワー発揮を大きくしていることを意味している. 投球動作中の踏込脚の役割は、軸脚によって得られた体重移動を支えるために重要である (高橋, 2006) とされている. 島田ほか (2000) は、踏込脚は投球局面 (本研究の第2局面) では、股関節伸展筋群のエキセントリックな筋収縮により伸展トルクを発揮して体幹を支持するとともに、前期コッキング局面 (本研究の第2局面の前半) では股関節の内転トルクにより下胴の前回旋を維持する働きをしていると報告している. また先に引用した Campbell et al. (2010) によると、加速局面 (本研究における第2局面) における踏込脚の内側広筋の高い筋活動は、膝関節の位置を制御・固定する一方で、踏込脚股関節は体幹を力強く回転するために重要な役割を持つと報告されている. これらの先行知見より、踏込脚は身体の制御・固定を行うとともに、体幹の回旋動作および捻転動作を行うために、股関節の内転と膝関節の伸展によるパワー発揮を大きくしていると考えられる. さらに股関節の内外転トルクは、踏込脚接地前後において内転トルクを示して

おり、投球速度と有意な正の相関関係を示した (Figure 4). また膝関節の屈曲伸展トルクは、踏込脚接地直後において伸展トルクを示しており、投球速度と有意な負の相関関係を示した (Figure 5). これらの結果を踏まえると、投球速度が大きい投手は、軸脚によって得られた体重移動を支持するために、踏込脚接地前後に股関節の内転および膝関節の伸展による力発揮を行っていると思われる。

踏込脚膝関節の伸展角速度は、158–189%time において、投球速度と有意な負の相関関係を示し、踏込脚膝関節の伸展トルクパワーは、156–174%time において、投球速度と有意な正の相関関係が認められた (Figure 5). Matsuo et al. (2001) によると、高速者は約 8 割の投手が加速局面の約 60% 付近 (本研究の 160%time) から踏込脚膝関節の伸展を行っていたのに対し、低速者は約 4 割の投手が膝関節の屈曲を行っていたと報告されている。また膝関節の伸展動作は、体幹の前方への回旋動作と同時に起こること (Escamilla et al., 1998) が報告されている。そして、この時点では、体幹の回旋動作 (Escamilla et al., 2001; Fleisig et al., 1999; 蔭山ほか, 2014; Matsuo et al., 2001; Stodden et al., 2001; 高橋ほか, 2005) や捻転動作 (蔭山ほか, 2014; 宮西・櫻井, 2009) が投球速度に影響することが述べられている。さらに、投球速度はボールへ伝えられる手関節の関節パワーによって生み出されているものの、それらの多くは体幹や肩関節の運動によって生み出されるエネルギーに起因している (宮西ほか, 1997) ことが報告されている。これらの先行知見より、投球速度の大きな投手は、加速局面の中盤において、踏込脚膝関節の伸展動作を伴いながら、大きな体幹の前傾、回旋および捻転の動作を行っており、これらの動作によって末端部へのエネルギーを増大させていると考えられる。つまり、投球速度が大きい投手は、第 2 局面の中盤において、体幹の回旋動作と捻転動作を増大させるために、踏込脚膝関節の伸展によるパワー発揮を大きくしていることが示唆される。

よって、投球速度が大きい投手は、第 2 局面の序盤では軸脚によって得られた体重移動を支持するために、踏込脚接地前後に股関節内転および膝関節伸展の力発揮を行い、第 2 局面の中盤から終盤にかけては体幹の回旋動作と捻転動作を増大させるために、膝関節の伸展動作によるパワーを大きくしていると考えられる。

V. ま と め

本研究は、大学野球投手を対象に、投球動作中における軸脚および踏込脚における下肢関節の力学的仕事量と投球速度との関係について明らかにすることとした。その結果、投球動作中の下肢の力学的仕事量は、絶対仕事では両股関節が膝関節や足関節よりも大きく、その中でも軸脚では正の仕事、踏込脚では負の仕事が大きかった。また各関節の仕事量と投球速度との関連性を詳細に検討したところ、軸脚では股関節の外転および膝関節の伸展による正仕事、踏込脚では股関節の内転および膝関節の伸展による正仕事、投球速度と有意な正の相関関係を示した。

これらの結果より、投球速度が大きい投手は、軸脚では股関節の外転および膝関節の伸展による力学的仕事量を増大させており、踏込脚接地直前に股関節の外転および内旋による力発揮を行うことで、投球方向へ上体が突っ込まないように体幹を軸脚側に維持しながら、投球方向への体重移動を行っていると思われる。一方踏込脚では、軸脚によって得られた体重移動を支持するために、第 2 局面の序盤では踏込脚接地前後に股関節内転および膝関節伸展の力発揮を行い、第 2 局面の中盤から終盤にかけては体幹の回旋動作と捻転動作を増大させるために、膝関節の伸展動作によるパワーを大きくしていると考えられる。

したがって、投球速度が大きい投手は、体幹部や上肢へのエネルギーを大きくするために、下肢の力学的仕事量を大きくしていることを示唆するものといえる。

注記

投球動作中における下肢の力学的仕事量に関する研究は、平地による投球動作（島田ほか、2000, 2004）と簡易マウンドによる投球動作（平山ほか、2010）において、踏込脚（本研究の第2局面）を中心に検討されている。力学的仕事量の算出方法については、島田ほか（2000）は、膝関節の内外反を除く、すべての下肢関節を（本研究と同様の手法）、平山ほか（2010）は股関節および膝関節の屈伸、足関節の底背屈を分析項目としている。このように、本研究の測定値は、先行研究とは測定方法（マウンドの有無による投球）や分析方法（各関節の自由度の定義）が異なるため、本研究と先行研究の結果を単純には比較できない。そのため、本研究では島田ほか（2000）および平山ほか（2010）のそれぞれの分析手法に合わせて、本研究の被検者11名（年齢 19.8 ± 1.0 歳、身長 178.2 ± 4.5 cm、体重 76.7 ± 10.9 kg、投球速度 121.0 ± 3.7 km/h）と比較した。なお、先行研究（島田ほか、2000）においては、投球速度の記述は最高速度を示した被検者の情報のみである。そのため、本研究では平山ほか（2010）が示している投手1名の投球速度（約121 km/h、1セット目）を基準に、 ± 5 km/hの投球速度のボールを投げるもの11名を採用した。

その結果、本研究における力学的仕事量の測定値は、平地によって行われた島田ほか（2000）よりも高く、簡易マウンドによって行われた平山ほか（2010）の範囲内であった。したがって、本研究における簡易マウンドによる力学的仕事量は、平山ほか（2010）と類似するため、測定値は妥当であると判断した。そして、マウンドでの力学的仕事量は、平地による投球動作によって示された島田ほか（2000）よりも大きいため、この要因に簡易マウンドによる段差が影響すると推察した。

今後は、マウンドと平地による投球動作の差異について、同一被検者で検討する必要があると言える。

文 献

- 阿江通良・藤井範久（2002）スポーツバイオメカニクス20講．朝倉書店，pp. 13-14, pp. 89-96.
- 荒木大輔（2003）トッププロに学ぶ野球上達テクニックピッチング，成美堂出版社．
- Campbell, B. M., Stodden, D. F., and Nixon, M. K. (2010) Lower extremity muscle activation during baseball pitching. *J. Strength. Cond. Res.*, 24(4), 964-971.
- Escamilla, R. F., Fleisig, G. S., Barrentine, S. W., Zheng, N., and Andrews, J. R. (1998) Kinematic comparisons of throwing different types of baseball pitches. *J. Appl. Biomech.*, 14, 1-23.
- Escamilla, R., Fleisig, G., Zheng, N., Barrentine, S., and Andrews, J. (2001) Kinematic comparisons of 1996 Olympic baseball pitchers. *J. Sports Sci.*, 19(9): 665-676.
- Fleisig, G. S., Barrentine, S. W., Zheng, N., Escamilla, R. F., and Andrews, J. R. (1999) Kinematic and kinetic comparison of baseball pitching among various levels of development. *J. Biomech.*, 32(12): 1371-1375.
- 平山大作・藤井範久・小池関也・阿江通良（2008）野球投球における投球数と動作キネティクスとの関係．バイオメカニズム学会編，バイオメカニズム19—身体機能の探求と支援—．慶應義塾大学出版会，pp. 91-102.
- 平山大作・藤井範久・小池関也・阿江通良（2010）野球投手の投球数の増加による下肢関節の力学的仕事量の変化．*体力科学*, 59(2): 225-232.
- 稲尾和久・吉村 正（2001）勝つための投球術 生まれ変わるピッチング．新生出版社．
- 藤山雅洋・岩本峰明・杉山 敬・水谷未来・金久博昭・前田明（2014）大学野球投手における体幹の伸張—短縮サイクル運動および動作が投球速度に与える影響．*体育学研究*, 59(1): 189-201.
- Kageyama, M., Sugiyama, T., Takai, Y., Kanehisa, H., and Maeda, A. (2014) Kinematic and kinetic profiles of the lower limbs during baseball pitching in collegiate baseball pitchers. *J. Sports Sci. Med.*, 13, 742-750.
- Kouchi, M., Mochimaru, M., Iwasawa, H., and Mitani, S. (2000) Anthropometric database for Japanese Population 1997-98. Japanese Industrial Standards Center (AIST, MITI).
- Kreighbaum, E. and Barthels, K. M. (1985) Biome-

- chanics: A qualitative approach for studying human movement (2nd ed.). Burgess Pub. Co., pp. 585-616.
- 功力功雄 (1991) アマチュア野球教本 I. ベースボールマガジン社, pp. 27.
- MacWilliams, B. A., Choi, T., Perezous, M. K., Chao, E. Y., and McFarland, E. G. (1998) Characteristic ground-reaction force in baseball pitching. *Am. J. Sports Med.*, 26: 66-70.
- Matsuo, T., Escamilla R. F., Fleisig, G. S., Barrentine S. W., and Andrews, J. R. (2001) Comparison of kinematic and temporal parameters between different pitch velocity groups. *J. Appl. Biomech.*, 17: 1-13.
- 松尾知之・平野裕一・川村 卓 (2010) 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.
- 宮西智久・藤井範久・阿江通良・功力靖雄・岡田守彦 (1997) 野球の投球動作における体幹および投球腕の力学的エネルギー・フローに関する 3 次元解析. *体力科学*, 46(1): 55-68.
- 宮西智久・向井正剛・川口鉄二・関岡康雄 (2000) スピードガンと画像計測によるボールスピードの比較. *仙台大学紀要*, 31: 72-77.
- 宮西智久・櫻井直樹 (2009) 野球の投・打動作の体幹捻転研究—SSC 理論に着目して—. *バイオメカニクス研究*, 13: 149-169.
- Myers, D. and Gola, M. (2000) *The Louisville slugger complete book of pitching*. McGraw-Hill.
- Nakamura, Y., Yamane, K., Fujita, Y., and Suzuki, I. (2005) Somatosensory computation for man-machine interface from motion-capture data and musculoskeletal human model. *IEEE Trans. Robot.*, 21(1): 58-66.
- 日本プロフェッショナル野球組織・日本野球連盟・日本学生野球協会・全日本大学野球連盟・日本高等学校野球連盟・全日本軟式野球連盟 (2014) 公認野球規則. ベースボールマガジン社, pp. 121-132.
- 日本整形外科学会 (1995) 関節可動域表示ならびに測定法. *日本整形外科学会誌*, 69: 240-250.
- 日本リハビリテーション医学会 (1995) 関節可動域表示ならびに測定法. *リハビリテーション医学*, 32: 207-217.
- Orin, D., McGhee, R., Vukobratovic, M., and Hartoch, G. (1979) Kinematic and kinetic analysis of open-chain linkages utilizing newton-euler methods. *Mathematical Biosciences*, 43: pp. 107-130.
- 島田一志・阿江通良・藤井範久・結城匡啓・川村 卓 (2000) 野球のピッチング動作における体幹および下肢の役割に関するバイオメカニクスの研究. *バイオメカニクス研究*, 4: 47-60.
- 島田一志・阿江通良・藤井範久・川村 卓・高橋佳三 (2004) 野球のピッチング動作における力学的エネルギーの流れ. *バイオメカニクス研究* 8(1): 12-26.
- Stodden, D., Fleisig, G., McLean, S., Lyman, S., and Andrews, J. (2001) Relationship of pelvis and upper torso kinematics to pitched baseball velocity. *J. Appl. Biomech.*, 17: 164-172.
- 高橋佳三 (2006) 投動作を助ける脚のはたらき. *体育の科学*, 56(3): 174-180.
- 高橋佳三・阿江通良・藤井範久・川村 卓・小池関也・島田一志 (2005) 球速の異なる野球投手の動作のキネマティクスの比較. *バイオメカニクス研究*, 9: 36-53.
- Yamane, K., Fujita, Y., and Nakamura, Y. (2005) Estimation of physically and physiologically valid somatosensory information. *IEEE Trans. Rob. Autom.*, pp. 2635-2641.
- Yamane, K., and Nakamura, Y. (2003) Natural motion animation through constraining and deconstraining at will. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, 9(3): 352-360.
- 与田 剛 (2005) トッププロに学ぶ野球上達テクニックピッチング. 成美堂出版社.

(平成26年7月7日受付)
(平成27年1月21日受理)