

中学野球選手のステップ脚 股関節動作に関する生体力学的分析

Biomechanical analysis of the effect of the stride leg on the hip joint in youth baseball players

内田智也*¹, 大久保吏司*², 古川裕之*¹
松本晋太郎*¹, 小松 稔*¹, 野田優希*¹
石田美弥*¹, 佃美智留*¹, 藤田健司*¹

キー・ワード : Pitching motion, Three-dimensional motion analysis, Joint torque power
投球動作, 三次元動作解析, 関節トルクパワー

【要旨】 【緒言】 中学野球選手の投球動作におけるステップ脚股関節運動を三次元動作解析装置により分析した。【方法】 中学野球選手の投手 31 名の投球動作を三次元動作解析装置で解析した。解析項目はステップ脚股関節の矢状面・前額面・水平面上の関節角速度・関節トルク・関節トルクパワーとした。【結果】 矢状面上の筋出力は Late Cocking 期 (L.C.期) から Acceleration 期 (Acc 期) の前半では伸展筋群の遠心性筋活動, Acc 期の後半から Ball Release までの区間では伸展筋群の求心性筋活動であった。前額面上の筋出力は, L.C.期は内転筋群の求心性筋活動, Acc 期は外転筋群の遠心性筋活動であった。水平面上の筋活動は, L.C.期では外旋筋群の遠心性筋活動, Acc 期では内旋筋群の遠心性筋活動であった。【考察】 L.C.期は内転筋群の筋活動により, 骨盤を前方回旋させることが重要であること及び伸展筋群および外旋筋群の遠心性筋活動により, 体幹および投球側上肢の動作を支持するための筋活動が求められると考えられた。Acc 期の前半は伸展筋群・外転筋群・内旋筋群の遠心性筋活動により, 下肢関節動作を制御することがパフォーマンスの向上に寄与するものであると推察された。

はじめに

野球選手の投球動作に関する生体力学的研究は投球側の上肢関節の動きを分析したものが多く報告されてきたが¹⁻³⁾, 近年は投球動作中の下肢関節・体幹動作が上肢関節に及ぼす影響を検討した報告も散見される⁴⁻⁶⁾。

また, 投球障害を有する選手には股関節の可動域制限が認められることがあり, そのスクリーニングテストとして股関節屈曲位での内旋可動域を測定することが多い^{7,8)}。過去の報告でも, ステップ脚股関節の内旋可動域の制限が Foot Contact 以降の骨盤回旋動作の不良に繋がるとされてお

り⁹⁾, 制限因子である殿筋群や短外旋筋群の柔軟性低下は不良な投球動作の一因になり得ると考えられる。

しかし, Milewski らは若年野球選手の投球動作における股関節動作を分析した報告の中で, 矢状面および前額面上の動作では大きな角度変化がみられたものの, 水平面上の動作における角度変化は少なく, 内外旋方向の可動域制限よりも屈伸および内外転方向の可動域制限が不良な投球動作の原因になり得ると述べている¹⁰⁾。

近年, 投球動作のフォロースルー時の姿勢を再現した動作の可動域を測定することや柔軟性・筋力・協調性など様々な要素を複合的に評価する Functional Movement Screen が投球障害のスクリーニングテストとして有用であるとする報告も散見されることから^{11,12)}, 従来行われてきた関節可

*1 藤田整形外科・スポーツクリニック

*2 神戸学院大学総合リハビリテーション学部

動域測定のみならず投球動作に必要な機能を考慮したスクリーニングテストを実施することも重要である。

また、投球障害のリハビリテーションにおいて、投球動作の修正を図る際には、下肢関節機能に着目したトレーニングを行うことも多いが、その内容及び方法は投球動作に結び付くものであること、なお且つその根拠は科学的に示されているものであることが求められる。

したがって、投球障害のスクリーニングテストの項目や選手に介入する際のトレーニング方法を検討するためにはFC以降のステップ脚の股関節動作を明確に提示する必要があるが、Milewskiらの報告は関節トルクなどの運動力学的なパラメーターは用いられていない¹⁰⁾。また、運動力学的なパラメーターも用いてステップ脚の下肢関節動作を分析した報告は大学生などスキルの高い選手を対象にしたものが多く、若年者でも同様の特徴を示すか明らかでない^{13~15)}。

投球障害のリスクファクターには柔軟性の低下のみならず下肢関節の筋力不足や投球動作中の不十分な筋出力も含まれていることから¹⁶⁾、運動力学的な側面から投球動作中に求められる下肢関節機能を再考することは投球障害の予防およびリハビリテーションにおける介入方法の科学的根拠を示す一助になり得ると考えられる。

以上のことから、本研究は投球動作における下肢関節動作を再考するための基礎データを提示するべく、中学野球選手の投球動作に対する生体力学的な分析を行い、FC以降のステップ脚股関節動作の役割を明らかにすることを目的とした。

対象および方法

対象は当院が主催するメディカルチェックに参加した中学野球選手の投手35名であった。除外基準は左投げ、疼痛により全力投球困難なもの、肩関節・肘関節の手術歴があるもの、サイドスロー・アンダースローのものとした。全ての対象者の保護者及び指導者に本研究の目的、個人情報保護等について口頭及び文書で説明し、文書にて同意を得た。なお、本研究は藤田整形外科・スポーツクリニック倫理委員会の承認を得て行われた。

投球動作の測定は屋内実験室で行い、上方に6台、下方に4台の合計10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 (MAC3D system: Motion Analysis 社製) 及び床反力計 (Kistler 社製) を用いて行った。測定環境およびマーカー貼付位置等は先行研究に準じて行った¹⁷⁾。

データ解析はモーション・キャプチャー・システムによって得られたデータから筋骨格モデル動作解析ソフト nMotion (nac 社製) で被験者の身体寸法に合わせてスケーリングされた筋骨格モデルを作成し、逆運動学解析を行いモデルの各身体部位の座標位置や各関節角度を算出した。さらに、逆動力学解析を行い、床反力計から得られた外力データから、筋骨格モデルの関節トルク (Joint Torque: JT) を算出した。

次に、nMotion から抽出された関節角度を時間微分することで関節角速度 (Joint Angular Velocity: JAV) を算出し、JT と JAV の内積から関節トルクパワー (Joint Torque Power: JTP) を算出した。

そして、ステップ脚股関節の矢状面 (屈曲—伸展)・前額面 (内転—外転)・水平面上 (内旋—外旋)の運動方向の JAV・JT・JTP を抽出し、各選手の FC から BR の 時間軸 を 100% (単位: %pitch) として正規化し、全ての対象者の平均値を算出した。それぞれの符号は股関節では屈曲・内転・内旋を正、伸展・外転・外旋を負とし、JT および JTP は体重で除した値を解析に使用した。

JTP の解釈として、阿江らは JTP などのパラメーターを動作と関連付けて解釈する場合には、大きさの他にその正負を考慮する必要があると述べている。たとえば、股関節では JAV が正 (屈曲角速度の増大)、JT が負 (伸展トルクの発揮) であれば、それらの内積により JTP は負となるが、この場合には、股関節伸展筋群が遠心性筋活動によりパワーを発揮していると解釈することが出来ると述べていることから、本研究でも同様の解釈をすることとした。

結果

これから示す結果は、全対象者の平均値を示したものである。なお、グラフ上の実線はピッチングサイクルにおける各対象者の投球側肩関節最大外旋位 (Maximum External Rotation: MER) の平均値 55%pitch の時点を示している (図 1)。

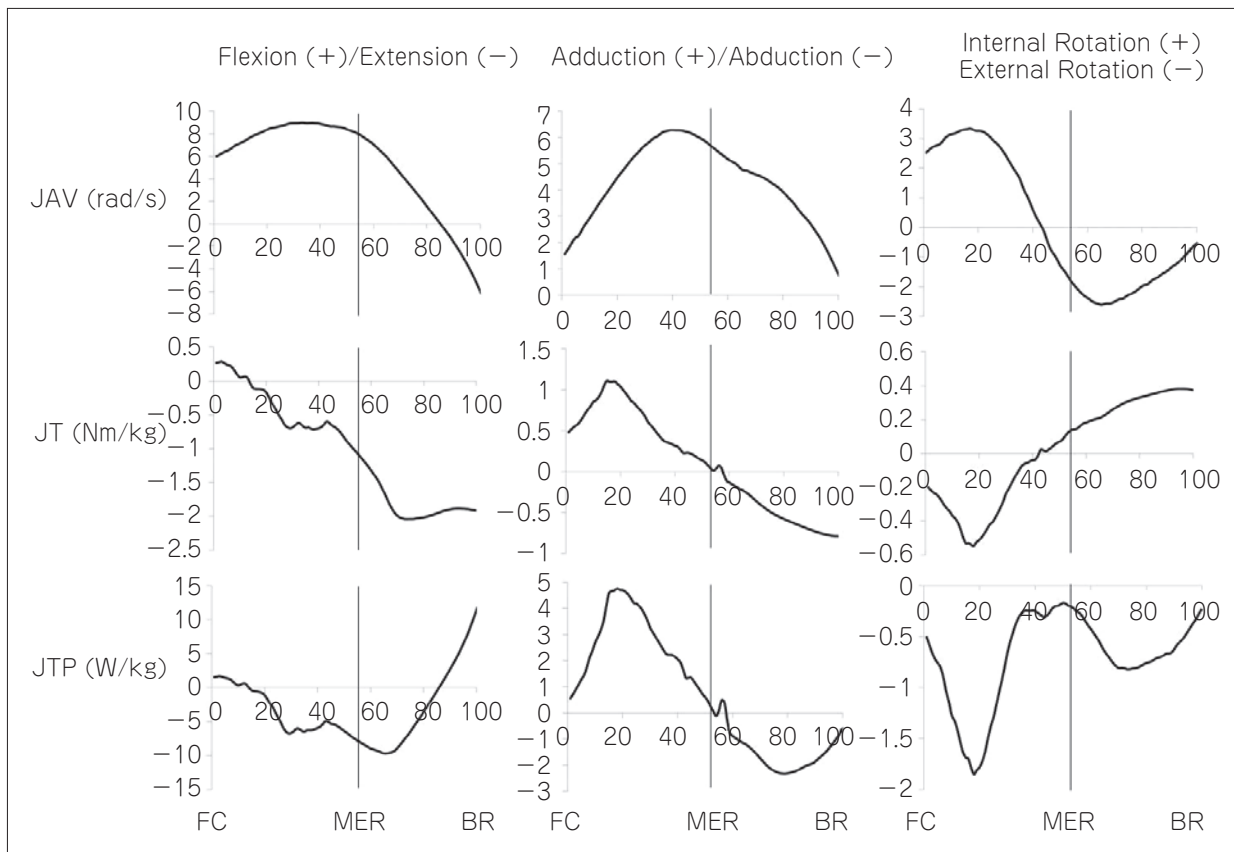


図1 各運動方向における JAV, JT, JTP の推移

1. 矢状面上の運動 (屈曲—伸展)

JAV は FC 直後から、屈曲角速度が増大していき、Late Cocking 期の後半である $32.0 \pm 13.0\%$ pitch で最大値を示した。Acceleration 期では徐々に屈曲角速度を減少させていき、Acceleration 期の後半は伸展角速度を増大させていた。なお、伸展角速度は BR の局面で最大値を示していた。

JT では、ほぼ全ての区間で伸展トルクの発揮がみられ、Acceleration 期である $70.0 \pm 26.9\%$ pitch でピークを迎えていた。

JTP は FC 直後の軽度の正パワーの発揮がみられたが、約 20% pitch 以降は負パワーの発揮がみられた。そして、Acceleration 期の後半から BR にかけて正パワーを増大させる推移であった。すなわち、Late Cocking 期から Acceleration 期前半の筋出力は伸展筋群の遠心性筋活動であり、Acceleration 期後半から BR までの区間の筋出力は伸展筋群の求心性筋活動であったことが示された。

2. 前額面上の運動 (内転—外転)

JAV は FC から BR まで全ての局面で内転角速

度が生じており、Late Cocking 期の後半である $40.5 \pm 17.1\%$ pitch にそのピークを迎えていた。

JT は MER を境に符号が逆転しており、Late Cocking 期は内転トルク、Acceleration 期は外転トルクによる筋発揮がみられた。

JTP では Late Cocking 期は正パワーの発揮があり、Acceleration 期は負パワーの発揮がみられた。すなわち、今回の解析区間では全ての局面で内転角速度が生じていたことから、Late Cocking 期の筋出力は内転筋群の求心性筋活動であり、Acceleration 期の筋出力は外転筋群の遠心性筋活動であったことが示された。

3. 水平面上の運動 (内旋—外旋)

JAV は約 40% pitch までは内旋角速度、それ以降は外旋角速度が生じていた。

JT も符号が入れ替わる時点は JAV と同じ区間であり、約 40% pitch の時点までは外旋トルク、それ以降は内旋トルクによる筋発揮がみられた。

JTP は全ての区間で負パワーの発揮がみられた。これらのことから、Late Cocking 期の筋出力は外旋筋群の遠心性筋活動、Acceleration 期の筋

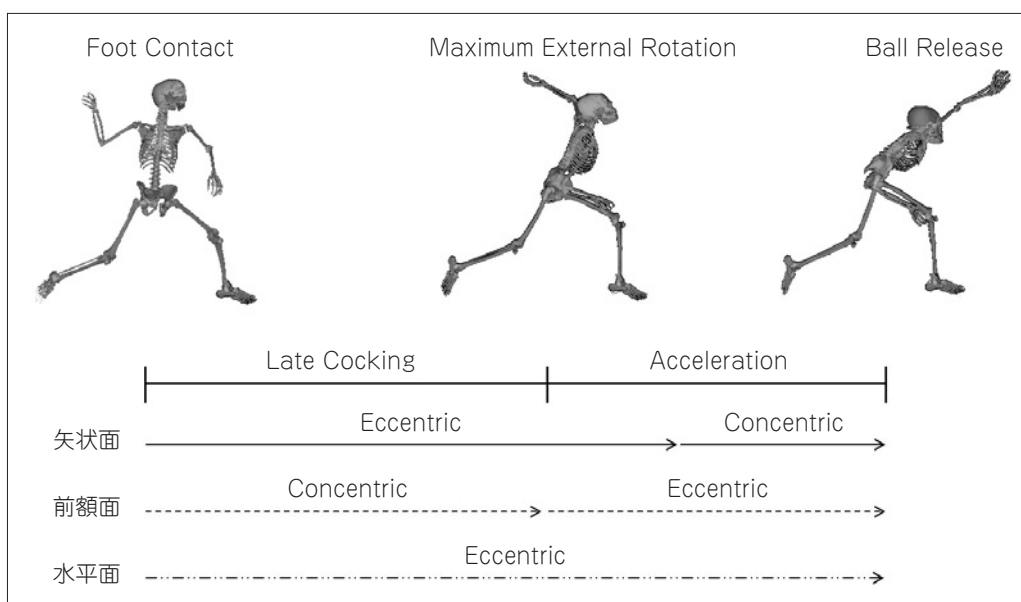


図2 ステップ脚股関節の各運動方向における筋活動

出力は内旋筋群の遠心性筋活動が生じていたことが示された。

■ 考 察

Late Cocking 期の下肢関節動作の特徴として、Matsuo らはパフォーマンスの高い高速度群は低速度群と比較して FC 以降の膝関節屈曲角速度が小さいこと、膝関節屈曲角度変化が少ないことを挙げている¹⁹⁾。また、ステップ脚の大腿四頭筋の筋出力が弱い選手は遠心性筋力不足に起因する不安定なステップ動作によって運動連鎖が破綻し、それを代償するべく上肢の振りによって球速を発揮する投球動作を呈していたことが報告されており、FC 直後の膝関節は大腿四頭筋の遠心性筋活動により固定されていることが理想的であると考えられる¹⁶⁾。

さらに、ステップ脚の股関節動作の役割として、大学野球選手を対象とした報告では、FC 直後に内転トルクを発揮することで骨盤を前方回旋させることや内転方向への力発揮が投球速度を増大させることが述べられており、Late Cocking 期では膝関節が固定されたステップ脚上で股関節内転動作により骨盤が前方に回旋する動作が重要であると考えられる^{14,15)}。

本研究でも同様に、Late Cocking 期における前額面上の運動では、FC 以降は全ての区間で内転角速度が生じており、JTP は正パワーの発揮が

あったことから、内転筋群の求心性筋活動が生じていたと考えられ、中学野球選手も FC 直後は内転筋群の筋活動により、骨盤を前方回旋させることが重要であることが示唆された(図2)。さらに、Late Cocking 期における矢状面上・水平面上の運動では伸展筋群および外旋筋群の遠心性筋活動がみられたことから、伸展筋群および外旋筋群は骨盤の回旋に伴う体幹および投球側上肢の動作を制御するための筋活動が求められると考えられた(図2)。

以上のことから、FC 以降のステップ脚股関節動作は見かけ上の印象から内旋を主としたものであると捉えられることも多いが、過去の報告でも内転可動域が重要であるとされてきた通り²⁰⁾、実際は内転筋群の求心性筋活動による「内転」が主となり、骨盤の前方回旋が生じていることを改めて強調したい。

ところが、今回のように国内の報告では内転動作の重要性を示すものは散見されるが、海外の報告では Milewski¹⁰⁾ のように内転動作の重要性を強調する報告は少ない。これは、メジャーリーガーのような米国を中心とした投手と日本人投手の投法の違いによるものである可能性があるが、これらの違いを医学会誌で論じられたものは我々が渉猟し得た限りみられない。そのため、全ての選手に今回の特徴が適応されるか否かは明らかではないのが実状であり、さらなる検討が求められる課

題であると考えられる。

次に、Acceleration 期における下肢関節動作の着眼点として「膝の横割れ」と表現されるステップ動作が挙げられる²¹⁾。これは、MER 以降の下肢関節動作を制御することが出来ず、ステップ脚の膝が外側に変位する下肢関節動作のことを示し、体幹の非投球側方向への側方傾斜などの不良な投球動作を誘発し、上肢関節に過剰な力学的負荷を与えると考えられている²¹⁾。

本研究における Acceleration 期の筋出力は伸筋群・外転筋群・内旋筋群の遠心性筋活動であった。島田らはこの局面では、肘関節の伸展や肩関節の内旋などによってボールへ力学的エネルギーが伝達されると報告しており、その土台となる下肢関節動作を制御することはパフォーマンスの向上に寄与するものであると推察される。すなわち、三方向全ての運動方向で遠心性の筋活動がみられたことから(図2)、Acceleration 期では身体重心の変位を制御するための筋活動が求められ、殿筋群の筋出力の低下は下肢関節動作の安定性を低下させる一因になることが示唆された。

最後に、BR の局面では、矢状面上の運動が特徴的であり、JAV ではそれまで生じていた屈曲角速度が伸展角速度に、JTP では負パワーから正パワーに転じており、ステップ脚股関節の伸展筋群の求心性筋活動を高めることで BR の局面を迎えていたことが示された(図2)。

この局面では、膝関節伸展の筋出力が体幹の回旋動作および捻転動作を増大させることや球速の速い選手は BR 時の膝関節伸展角速度が高値を示したことが報告されている^{15,19)}。つまり、BR の局面では Acceleration 期に身体重心の変位を制御するために固定していたステップ脚の膝関節を伸展させることにより上肢関節に力学的エネルギーを伝達させていたと考えられ、本研究の結果で示された股関節伸展筋群の求心性筋活動はステップ脚の膝関節伸展動作に連動した筋活動であったことが推察される。

しかしながら、BR は「リリースポイントを前方(本塁側)に持っていきなさい」という指導用語が用いられることから FC 以降に骨盤の前方回旋および前傾、すなわちステップ脚股関節の内転・内旋・屈曲の複合動作を意識させることが重要であるとされており、そのような動作では BR まで股関節伸展筋群の遠心性筋収縮が生じていると考

えられる。

したがって、本研究の結果が「良好」な投球動作なのか、上肢関節優位の投球動作が特徴的とされる中学野球選手の特徴であるかは現段階では論じることが出来ない。そのため、今後は動作解析に同期した筋電図解析などを行うことや様々なカテゴリーの選手を対象とした解析を行うことで、年代別の特徴も検討する必要があると考えられた。

■ 本研究の限界

測定環境が室内実験室であり、実際のマウンド上での投球を行っていないことである。マウンドからの投球と平地からの投球において、股関節および膝関節動作に差がなかったことは報告されているものの¹⁰⁾、結果に少なからず影響を与えた可能性は否定できない。さらに、今回は関節角度および床反力計から得られる外的データから逆動力学解析を行うことで関節トルクが導かれ、その結果から筋出力を推察する方法に基づいており、今回の結果は上肢関節や対側下肢関節など様々な影響を受けて算出されたものであることを理解しておく必要がある。

それらの限界を考慮した上で、今回のデータが投球障害のリハビリテーションや野球選手のトレーニング指導に関わる医療従事者が指導内容を計画する一助となることを期待したい。

利益相反

本論文に関連し、開示すべき利益相反はなし。

文 献

- 1) Werner, SL, Gill, TJ, Murray, TA, Cook, TD, Hawkins, RJ. Relationships between throwing mechanics and shoulder distraction in professional baseball pitchers. *Am J Sports Med.* 2001; 29: 354-358.
- 2) Anz, AW, Bushnell, BD, Griffin, LP, Noonan, TJ, Torry, MR, Hawkins, RJ. Correlation of torque and elbow injury in professional baseball pitchers. *Am J Sports Med.* 2010; 38: 1368-1374.
- 3) Fleisig, GS, Leddon, CE, Laughlin, WA, Ciccotti, MG, Mandelbaum, BR, Aune, KT, Escamilla, RF, MacLeod, TD, Andrews, JR. Biomechanical performance of baseball pitchers with a history of ulnar collateral ligament reconstruction. *Am J Sports*

- Med. 2015; 43: 1045-1050.
- 4) Aguinaldo, AL, Buttermore, J, Chambers, H. Effects of upper trunk rotation on shoulder joint torque among baseball pitchers of various levels. *J Appl Biomech.* 2007; 23: 42-51.
 - 5) Aguinaldo, AL, Chambers, H. Correlation of throwing mechanics with elbow valgus load in adult baseball pitchers. *Am J Sports Med.* 2009; 37: 2043-2048.
 - 6) Oyama, S, Yu, B, Blackburn, JT, Padua, DA, Li, L, Myers, JB. Effect of excessive contralateral trunk tilt on pitching biomechanics and performance in high school baseball pitchers. *Am J Sports Med.* 2013; 41: 2430-2438.
 - 7) 田中 稔. 投球障害の機能的&器質的病態と機能的アプローチ. *Bone joint Nerve.* 2013; 3: 747-756.
 - 8) 菅谷啓之. 上肢のスポーツ障害に対するリハビリテーション. *間接外科.* 2010; 29: 148-158.
 - 9) 尾関圭子, 加藤貴志, 中路隼人, 飯田博巳, 岩本賢, 塚田晋太郎, 岩堀裕介, 木村伸也. 股関節内旋可動域が投球動作における骨盤回旋運動に及ぼす影響. *愛知県理学療法学会誌.* 2010; 22: 74-75.
 - 10) Milewski, MD, Öunpuu, S, Solomito, M, Westwell, M, Nissen, CW. Adolescent baseball pitching technique: lower extremity biomechanical analysis. *J Appl Biomech.* 2012; 28: 491-501.
 - 11) 松井知之, 森原 徹, 東 善一, 瀬尾和弥, 平本真知子, 木田圭重, 高島 誠, 堀井基行, 久保俊一. 頸部・胸腰部・股関節回旋角度の左右差に着目した投球障害予測. *体力科学.* 2013; 62: 223-226.
 - 12) 内田智也, 松本晋太郎, 小松 稔, 野田優希, 石田美弥, 佃美智留, 中山良太, 武田雄大, 平川理映子, 武藤貢平, 大久保吏司, 古川裕之, 藤田健司. 中学野球選手における Functional Movement Screen と投球障害の関係. *体力科学.* 2016; 65: 237-242.
 - 13) 島田一志, 阿江通良, 藤井範久, 結城匡啓, 川村卓. 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.* 2004; 8: 12-26.
 - 14) 島田一志, 阿江通良, 藤井範久, 結城匡啓, 川村卓. 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.* 2000; 4: 47-60.
 - 15) 蔭山雅洋, 鈴木智晴, 杉山 敬, 和田智仁, 前田明. 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. *体育学研究.* 2015; 60: 87-102.
 - 16) 内田智也, 古川裕之, 松本晋太郎, 小松 稔, 野田優希, 石田美弥, 佃美智留, 大久保吏司, 藤田健司. 投球動作におけるステップ側下肢筋力と身体重心速度および肩関節内旋トルクの関係. *スポーツ傷害.* 2017 (in press); 22.
 - 17) 内田智也, 大久保吏司, 松本晋太郎, 小松 稔, 野田優希, 石田美弥, 佃美智留, 古川裕之, 藤田健司. 投球動作の Early Cocking 期における軸足股関節の運動学・運動力学的特徴. *日本臨床スポーツ医学会誌.* 2017; 25: 16-23.
 - 18) 阿江通良, 藤井範久. 第 12 講 関節トルクと関節パワー. In: *スポーツバイオメカニクス 20 講.* 第 1 版. 東京: 朝倉書店; 89-96, 2002.
 - 19) Matsuo, T, Rafael, FE, Glenn, SF, Steven, WB, James, RA. Comparison of kinematic and temporal parameters between different pitch velocity groups. *J Appl Biomech.* 2001; 17: 1-13.
 - 20) 宮下浩二, 小林寛和, 横江清司. 投球動作で要求される下肢関節機能に関する検討. *Journal of Athletic Rehabilitation.* 1999; 2: 65-72.
 - 21) 岩堀裕介. 成長期の投球障害への対応とアプローチ. *臨床スポーツ医学.* 2012; 29: 67-75.

(受付: 2017 年 12 月 11 日, 受理: 2018 年 5 月 14 日)

Biomechanical analysis of the effect of the stride leg on the hip joint in youth baseball players

Uchida, T.^{*1}, Okubo, S.^{*2}, Furukawa, H.^{*1}
Matsumoto, S.^{*1}, Komatsu, M.^{*1}, Noda, Y.^{*1}
Ishida, M.^{*1}, Tsukuda, M.^{*1}, Fujita, K.^{*1}

^{*1} Fujita Orthopaedic & Sports Clinic

^{*2} Department of Rehabilitation, Kobe Gakuin University

Key words: Pitching motion, Three-dimensional motion analysis, Joint torque power

[Abstract] The purpose of this study was to identify the effect of the function of the stride leg on the hip joint. The subjects were 31 male youth baseball pitchers. The pitching motion was analyzed using a 3-dimensional motion analysis system. The analysis parameters were the joint angle, the joint torque and the joint torque power of the stride leg at the hip joint in the sagittal, coronal and transverse planes. The pitchers demonstrated that the eccentric power of the muscles of extension and external rotation, and that the concentric power of the muscle of adduction in the late cocking phase. On the other hand, pitchers demonstrated that the eccentric power from all directions in the sagittal, coronal and transverse planes are in the acceleration phase. These results indicated that the function of the stride leg had to generate the rotational power of the pelvis for the home plate. The function in the acceleration phase was to stabilize the lower extremity, and that function contributed to improve the pitching performance.