

原著

## 投球動作における3次元動作解析による運動学的検討

笹村 聡<sup>1)</sup>, 片山 訓博<sup>2)</sup>, 稲岡 忠勝<sup>2)</sup>, 有光 一樹<sup>1)</sup>,  
前田 隼佑<sup>3)</sup>, 岩見 一洋<sup>4)</sup>, 山田 義久<sup>5)</sup>

### Three-dimensional kinematic study on pitching motion

Satoshi Sasamura<sup>1)</sup>, Kunihiro Katayama<sup>2)</sup>, Tadakatsu Inaoka<sup>2)</sup>,  
Kazuki Arimitsu<sup>1)</sup>, Shunsuke Maeda<sup>3)</sup>, Kazuhiro Iwami<sup>4)</sup>, Yoshihisa Yamada<sup>5)</sup>

#### 要 旨

本研究の目的は、高校野球投手の投球動作中の上腕加速度に下肢・体幹運動が及ぼす影響について明らかにすることである。高校野球投手11名を対象として、ポータブル3次元動作解析装置（noraxon社製、マイオモーション）を用いて投球動作の解析を行った。その結果、体幹回旋角速度は投球側上腕の合成加速度と相関した。先行研究では体幹回旋角速度はボール速度と相関しており、このことから合成加速度を分析指標として用いる妥当性が示された。次に投球時の下肢・体幹の関節角度範囲を独立変数とし、投球側上腕の合成加速度を従属変数とした重回帰分析では、股関節回旋角度範囲と、胸部回旋角度範囲が合成加速度と有意に関連した。以上の結果から下肢・体幹から起こる運動連鎖が投球側上腕の合成加速度へ及ぼす影響が明らかとなった。ポータブル3次元動作解析装置による投球の動作解析は、指導者の目視による確認やビデオフィードバックによる指導効果をより確実にし、投球の効率改善と投球障害の予防につながる可能性がある。

キーワード：投球動作，運動分析，3軸合成加速度

#### Abstract

The purpose of this study is to clarify the influence of lower extremity and trunk motions on upper arm acceleration in pitching motion of high school baseball pitcher. Motion analysis of throwing was performed examining 11 high school baseball pitchers using portable 3D motion analysis system (Myomotion made by noraxon).

As a result, the trunk rotation angular velocity was correlated with the synthetic acceleration of the upper arm on the throwing side. In the prior study, the core rotation angular velocity was correlated with the ball velocity, which indicated

- 
- 1) 高知リハビリテーション専門職大学 作業療法学専攻  
Division of Occupational Therapy, Kochi Professional University of Rehabilitation
- 2) 高知リハビリテーション専門職大学 理学療法学専攻  
Division of Physical Therapy, Kochi Professional University of Rehabilitation
- 3) 沖縄赤十字病院 リハビリテーション科  
Department of Rehabilitation, Okinawa Red Cross Hospital
- 4) 田中整形外科 リハビリテーション科  
Department of Rehabilitation, Tanaka Orthopedic Hospital
- 5) もりもと整形外科・内科 リハビリテーション科  
Department of Rehabilitation, Morimoto Orthopedic Clinic

the usefulness of using the synthetic acceleration as an index of analysis.

Furthermore, in the multiple regression analysis did show with the joint angle range of the lower extremities and trunk at pitching as the independent variable and the resultant acceleration of the upper arm on the pitching side as the dependent variable, the hip joint rotation angle range and the chest rotation angle range significantly explain the resultant acceleration. Taken together to results of this study, it is clear that the movement chain arising from the lower limbs and trunk has an influence on the synthetic acceleration of the throwing upper arm.

This indicated that motion analysis of pitching with a portable 3D motion analysis device can make sure that the instructional effect of visual confirmation and video feedback of the instructor is more effective, which may lead to the improvement of throwing efficiency and the prevention of throwing disorder.

Key words: pitching motion, motion analysis, 3-axis resultant acceleration

### 【はじめに】

近年スポーツトレーニングでは、さまざまな方法で動作解析が進んでいる。身体動作や活動量の計測・分析をトレーニングの指標や選手の評価に用いることは、競技レベルの向上を図る上で有効であるとされる<sup>1)</sup>。Murrayら<sup>2)</sup>は、メジャーリーグ投手において投球数の増加に伴って膝関節屈曲角度が増加し、投球腕の肩関節水平内転トルクが減少することを明らかにした。国内においても宮下ら<sup>3)</sup>は、投球動作の反復による下肢動作の再現性低下が上肢の投球障害を誘発すると指摘している。そのため、投球動作のトレーニングにおいて、体幹・下肢動作の重要性は一般的な理解を得ていると考えられる。

Zaremskiら<sup>4)</sup>は、骨格の未熟な若年投手における肩の障害の原因を、疲労、不適切な生態力学、過度の使用にあると結論づけている。またLymanら<sup>5)</sup>の9歳から14歳迄の467名を対象としたコホート研究では、投球数と肘・肩の痛みは有意に関連し、複数リーグでの選手活動や多量の投球、変化球、腕の痛みや疲労が続く中での投球が青年投手の肩や肘の痛みの要因であることを明らかにした。そして、リスクを減らすために投球数制限を提唱し、痛みと投球メカニズムのさらなる評価が必要と述べている。こういったように、年齢・シーン別に動作解析及び投球障害の予防に関する知見が集積されつつある。そのため、国内の高校野球投手の投球動作について、先行研究と同様に詳細な分析を行なう必要があると考えられた。

一方で、投球動作に対するバイオメカニクス視点での研究は、投球メカニズムの解明に焦点があり、専門的な力学量や指標を用いるため研究の精度が高くとも、指導やコーチングの資料とすることに困難さがあるとされる<sup>6)</sup>。加えて、投球動作における下肢・体幹の動作は重視されながらも、上肢との連続性をキネティック的に検討した研究は多くない。このことから、ポータブル3次元動作解析装置により得られる結果を選手にフィードバックする意義は高いと考えられた。投球動作中の肩関節内旋と体幹回旋の角速度が、ボール速度を有意に予測する事が実証されているが<sup>7)</sup>、平面軸のない複合運動を行う肩関節と上腕に、センサーを常に同方向に装着することは困難であり、動作の一部のみを捉えている可能性を除外しきれない。そのため本研究の分析変数とする加速度は、投球側上腕に取り付けるセンサーの取り付け向きに依存しないよう、加速度X、Y、Zの3軸の合成値を用いる。これにより、投球動作中の体幹・下肢の運動が投球側上腕に及ぼす影響について、より直接的に関連を見いだせると考えられる。

今回、高校野球投手を対象に、投球動作における下肢・体幹の関節角度範囲と投球側上腕加速度との関連を分析することを目的とし、そこから得られた知見について報告する。

## 【対象および方法】

## 1. 対象

被験者は、A県の高等学校硬式野球部に所属する男子投手11名である。右投げ8名、左投げ3名でいずれの被験者もオーバースローでの投球であり、平均年齢 $16.5 \pm 0.5$ 歳、平均身長 $175.6 \pm 4.2$ cm、平均体重 $68.0 \pm 6.1$ kgであった（表1）。

表1 投手の属性値

ID	年齢	投球側上肢	身長(cm)	体重(kg)
1	17	右	177.4	67.9
2	17	右	174.8	63.4
3	17	右	180.1	72.7
4	17	右	179.5	72.4
5	16	右	173.8	66.6
7	16	右	168.3	67.2
8	16	右	176.2	63.9
9	16	左	172.3	72.5
11	17	左	169.9	80.0
12	16	左	178.1	57.7
13	16	右	180.8	63.8
平均±SD	$16.5 \pm 0.5$	-	$175.6 \pm 4.2$	$68.0 \pm 6.1$

SD : standard deviation

## 2. 方法

## 1) 実験環境と測定機器

測定場所は、練習グラウンドのブルペンとした。測定機器は、高速動作中の詳細な身体運動を特定するため、ポータブル3次元動作解析装置noraxon社製myo motion system MR3.10（以下、マイオモーション）を用いた。マイオモーションは、身体各部に装着する慣性センサーにより、選択した部位の角度変化を連続して定量化することが可能である。また計測値を無線レーザーに送信するため、空間のキャリブレーションを要さず計測環境の自由度が高いシステムである。

慣性センサーは、投球側上腕、上部体幹、下部体幹、骨盤、踏み込み脚大腿、下腿、足部の7カ所に付属の弾性ストラップにて固定した。さらに動作中

のセンサーのずれを回避するため、サージカルテープで固定し、投球動作に支障がないかは被験者に確認した。センサーにより、体幹では、腰部屈曲／伸展、側屈、回旋、胸部屈曲／伸展、側屈、回旋を、下肢では、股関節屈曲／伸展、内外転、回旋、膝関節屈曲／伸展、足関節底背屈、足関節内／外返し及び内／外転の解剖学的関節角度及び加速度を測定した。各関節角度の正の値は、屈曲、外転、外旋、背屈を示し、体幹胸部・腰部の正の値は右回旋と右側屈で計測される。計測する関節キャリブレーションは自然立位で行った。サンプリング周波数は100Hzとし、データは全て移動平均法によるスムージングを行った。

## 2) データの収集と統計学的処理

投手は測定前にウォーミングアップをしたのち、ブルペンで捕手に向かって3球の直球を投球させた。解析対象は2球目の動作とし、解析区間は、Fleisigら<sup>8)</sup>の投球相における加速期である肩関節最大外旋時点から、加速期終了時点のボールリリースまでとした。当該区間の各関節の角度と加速度を計測し、関節角度範囲を代表値とし、加速度は最大値を採用した。次に解析区間の終点における3軸センサーの加速度X、Y、Zの値から以下の式により投球側上腕に掛かる合成加速度を求めた。

$$a = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

## 3) 3軸合成加速度の妥当性の検討

3軸合成加速度の妥当性は、解析区間の関節角度範囲の最大値を微分し、各関節運動の角速度（単位：deg/s）を算出した後、投球側上腕にかかる合成加速度との回帰分析により検討した。

## 4) 下肢・体幹の運動が投球側上腕におよぼす影響

投球動作中の各関節角度範囲と合成加速度を対数変換により正規化した。下肢・体幹の各log関節角度を独立変数、log合成加速度を従属変数として投入し、ステップワイズ重回帰分析を行った。独立変数の投入基準は0.05、削除基準を0.10とした。一連の統計処理には、統計ソフトH A D 16.0を用い有意

水準は5%未満とした。

3. 倫理的配慮

ヘルシンキ宣言に基づき,対象者には研究の目的,データの利用,個人情報の権利などについて説明した上,同意のもとに実施した。

【結果】

1. 各変数の集計

解析区間の所要時間は平均 $0.05 \pm 0.02$ 秒であった。各関節角度範囲と合成加速度の集計を表2に,グラフを図1~4に示す。

表2 各関節角度範囲の集計

	平均値	中央値	標準偏差	最小値	最大値
解剖学的関節角度 (度)					
腰部屈曲/伸展	10.12	4.98	11.40	1.76	39.15
腰部側屈	5.24	1.95	8.91	0.02	31.23
腰部回旋	4.32	1.77	7.52	1.05	26.75
胸部屈曲/伸展	5.21	2.79	5.05	0.02	16.87
胸部側屈	6.07	3.24	9.21	0.16	33.08
胸部回旋	8.15	4.64	12.05	0.17	43.00
股関節屈曲/伸展	12.25	4.71	18.94	0.66	66.96
股関節内外転	10.28	6.63	15.81	0.38	56.6
股関節回旋	3.50	2.40	2.47	0.94	8.69
膝関節屈曲/伸展	11.63	7.41	11.76	0.54	41.00
足関節底背屈	8.32	2.69	10.95	0.63	35.45
足関節内/外返し	5.10	3.53	5.11	0.31	15.54
足関節内/外転	3.33	2.71	3.52	0.75	13.05
合成加速度(m/s <sup>2</sup> )	5570.24	5341.18	3106.45	1376.32	9855.74

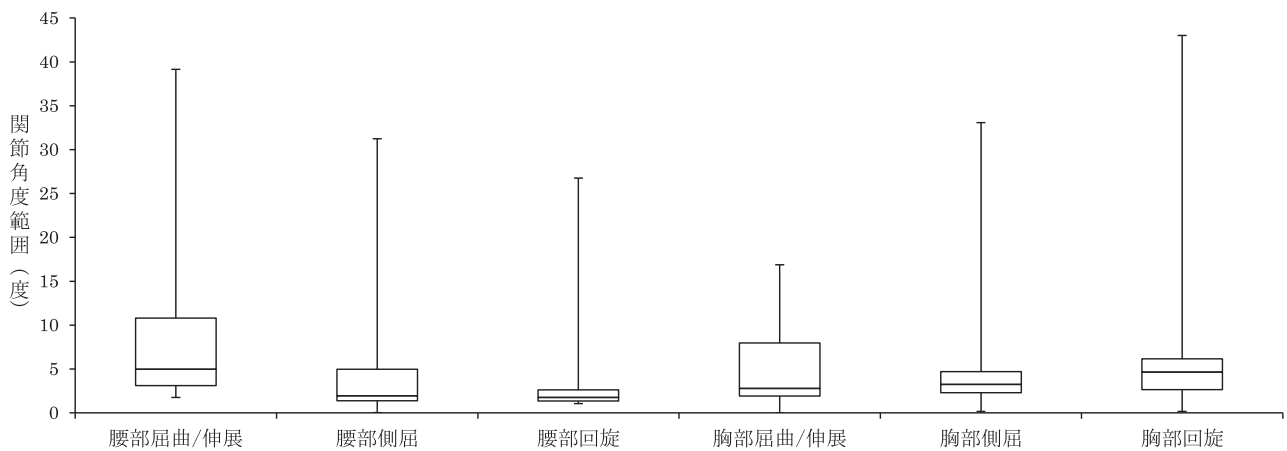


図1 体幹胸腰部の関節角度範囲

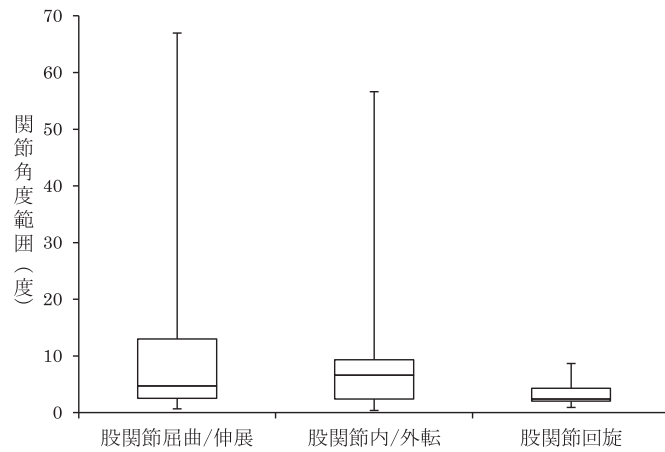


図2 踏み込み脚の股関節角度範囲

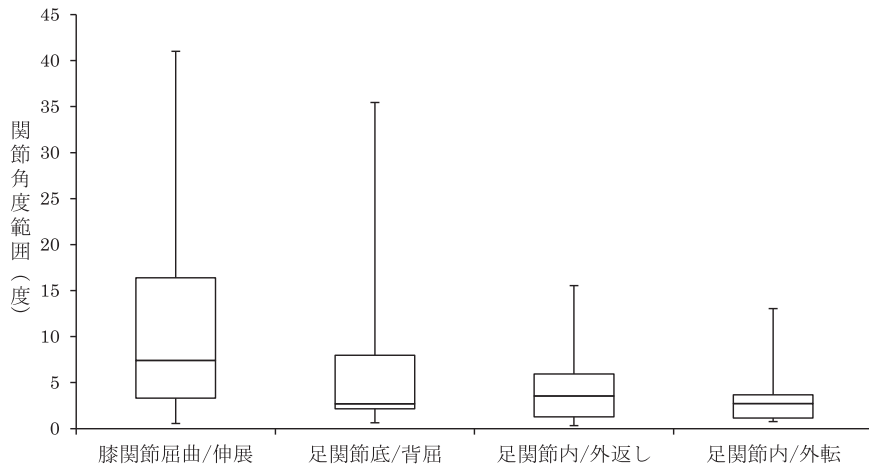


図3 踏み込み脚の膝・足関節角度範囲

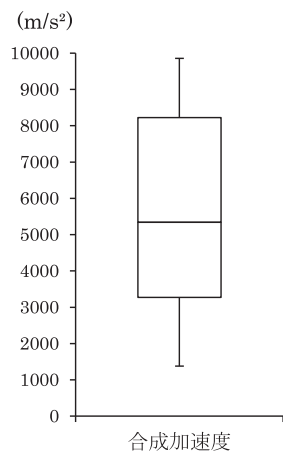


図4 投球側上腕の合成加速度

2. 3軸合成加速度の妥当性の検討

各関節角速度と合成加速度の単回帰分析の結果

は、次の通りであった。腰部回旋角速度は、 $R^2 = 0.446$  ( $p = 0.025$ ) と正の傾きで合成加速度を有意に予測した。股関節外転は、 $R^2 = 0.527$  ( $p = 0.011$ ) と負の傾きで有意に合成加速度を予測した (表3, 図5)。

3. 関節運動範囲と投球側上腕に掛かる合成加速度

投球側上腕に掛かる合成加速度に対し、各関節運動角度範囲を独立変数とした重回帰分析では、有意の変数は、 $\log$ 股関節回旋角度範囲が  $\beta = -1.232$  ( $p = 0.001$ )、 $\log$ 胸部回旋角度範囲が  $\beta = 0.648$  ( $p = 0.030$ ) であった。股関節回旋の実測値は平均  $3.50 \pm 2.47^\circ$ 、胸部回旋は  $3.50 \pm 2.47^\circ$  とわずかな回旋角度範囲ではあるが上腕の合成加速度を有意に予測した ( $R^2 = 0.774$ ,  $p = 0.003$ ) (表4)。

表3 関節角速度と合成加速度の単回帰分析

	合成加速度	95%下限	95%上限	VIF
腰部回旋角速度 (deg/s)	0.668 *	0.107	1.229	1.000
$R^2$	0.446 *			
VIF : Variance Inflation Factor				* $p < 0.05$

	合成加速度	95%下限	95%上限	VIF
股関節外転角速度 (deg/s)	-0.726 *	-1.245	-0.207	1.000
$R^2$	0.527 *			
VIF : Variance Inflation Factor				* $p < 0.05$

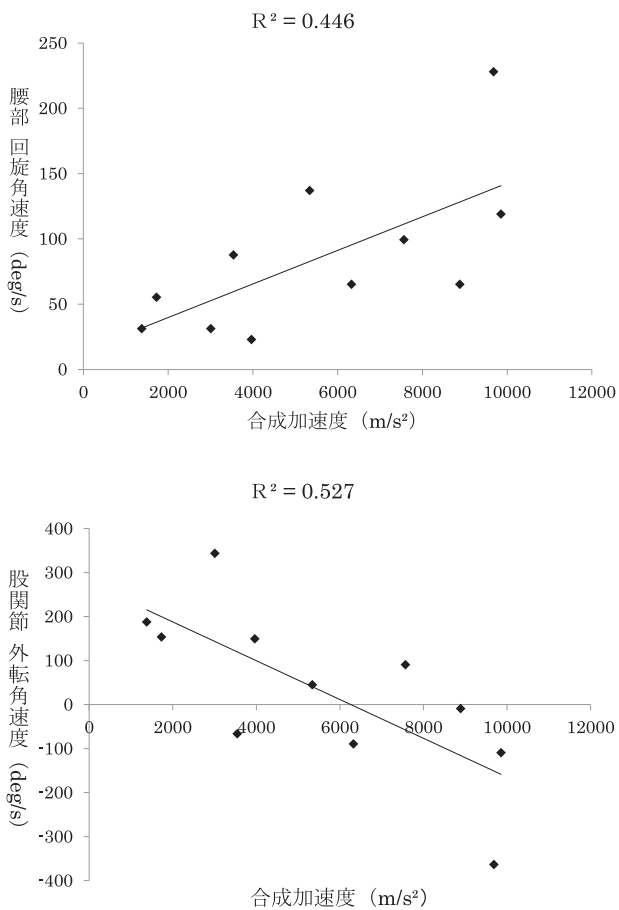


図5 関節角速度と合成加速度の単回帰分析

【考察】

本研究では、高校野球投手の投球動作における3次元動作解析を行うことで、上腕加速度に対する下肢・体幹の運動が及ぼす影響について検討した。解析区間である肩最大外旋位からボールリリースまでに要した時間は、平均 $0.05 \pm 0.02$ 秒と、先行研究<sup>9)</sup>の $0.03 \sim 0.04$ 秒とほぼ同じ数値であり、本研究の対象者は他研究と比較しても投球の技術に大きな差異はなく、分析対象に値すると考えられた。

1. 下肢・体幹の関節運動角速度と投球側上腕に掛かる合成加速度の関係

下肢・体幹の運動角速度のうち、腰部回旋角速度が投球側上腕に掛かる合成加速度を有意に説明した ( $R^2 = 0.446$ )。これは齋藤ら<sup>7)</sup>による、投球時の体幹回旋角速度がボールスピードと相関 ( $R^2 = 0.506$ )を示した報告と同様の結果であったと考えられる。したがって、本研究において上腕の合成加速度を分析に用いることは妥当と考えられた。股関節外転角速度は、投球側上腕に掛かる合成加速度と有意に負の関連を認めた ( $R^2 = 0.527, p = 0.0114$ )。これは、ボールリリースまでのわずかな時間に、踏み込み脚

表4 log関節角度範囲とlog合成加速度の重回帰分析結果

	合成加速度log	95%下限	95%上限	VIF
股関節回旋log	-1.232 **	-1.798	-0.666	2.135
胸部回旋log	0.648 *	0.081	1.214	2.135
$R^2$	0.774 **			
VIF : Variance Inflation Factor				** $p < 0.01, * p < 0.05$



の股関節外転に伴う骨盤と体幹の回転軸に働く thrustが生じることで、投球側上腕に貢献する運動連鎖の力の伝達が減じたものと推察できる。以上の結果により、投球側上腕に掛かる合成加速度を分析に用いることは、下肢体幹から起こる運動伝達を表す指標として有用であると考えられた。

## 2. 下肢・体幹の運動が投球側上腕におよぼす影響

下肢・体幹の運動が投球側上腕におよぼす影響として投球側上腕に掛かる合成加速度を検討した重回帰分析の結果では、log股関節回旋角度範囲 ( $\beta = -1.232, p = 0.001$ ), log胸部回旋角度範囲 ( $\beta = 0.648, p = 0.030$ ) であった。解析区間の胸部回旋角度範囲は、実測値で最小 $0.17^\circ$  から最大 $43.00^\circ$  の範囲であり、可動範囲が大きいくほど合成加速度は増加した。これは、腰部回旋角速度が投球側上腕の合成加速度に寄与することと同様の運動連鎖との関連と考えられた。

対して、股関節回旋角度範囲は、実測値で最小 $0.94^\circ$  から最大 $8.69^\circ$  の範囲であり、角度範囲が大きいくほど合成加速度は減少した。肩関節最大外旋位からボールリリース時の加速相の終末にかけての腰部回旋範囲の大きさと、胸部回旋の角速度が必要な運動相における股関節回旋運動の残存が、上腕にかかる合成加速度を減じたと考えられた。以上より、ボールリリースまでの下肢・体幹の運動連鎖が重要であると考えられる。踏み込み脚の股関節がボールリリース時に動揺したことで、下肢・体幹の運動連鎖による力の伝達が阻害され、投球上腕の合成加速度に影響したと考えられた。股関節は自由度の高い構造のため、投球動作中の安定性は、筋肉の働きによるものが大きいと考えられる。そのため、合成加速度を高める、ひいては下肢・体幹の運動連鎖のエネルギーを効率的に肩関節に伝達するには、踏み込み脚が接地したのち、股関節が動的に安定する必要性があると考えられる。

Davisら<sup>10)</sup>は、適切な投球モーションが投球効率を高め、上肢の投球障害をも予防することを実証している。不適切な投球モーションが投球効率を下げ、投球障害に繋がるというその内容を鑑みれば、

踏み出し脚股関節の安定性を保ち、胸腰部が十分に素早く回旋することが、投球障害を予防する可能性があると考えられた。

マイオモーションにより、制約の少ない環境で高速かつ短時間の投球動作の解析を行えた。そして下肢・体幹の関節角度範囲が、投球側上腕の合成加速度に及ぼす影響が明らかとなった。本研究の結果を、身体運動の理解や指導の一資料とすることで投球動作を改善できる可能性がある。また全身の滑らかな運動が、投球側上腕の合成加速度の増加に寄与し、肩関節の傷害予防につながる可能性が示唆された。

## 【研究の限界および今後の展望】

今後は、撮影機器を精選し動画解析の精度を高める。また合成加速度を指標に用いることの再現性、妥当性についてより検証する必要がある。対象者数は重回帰分析の推奨標本数に達しておらず、過剰適合の恐れを排除しきれない。そして、対象者の年齢、身体状況、経験年数等のバイアスが結果に及ぼす影響を考慮すべきである。

そのため、結果の一般化およびトレーニングの指標とするには慎重を期し、その他の投球動作に関連する要因の探索によって、さらに研究を拡張したい。

## 【文献】

- 1) 岡田英史, 中村好孝・他: 加速度センサによる漕艇運動の身体動作と活動量の測定. 計測自動制御学会論文集31(2): 141-149, 1995.
- 2) Murray TA, Cook TD, et al.: The effects of extended play on professional baseball pitcher. Am J of Sports Med29(2): 137-142, 2001.
- 3) 宮下浩二, 小林寛和・他: 投球動作の反復による上肢および下肢関節運動の変化. 日本臨床スポーツ医学会誌12(3): 448-457, 2004.
- 4) Zaremski JL, Krabak BJ: Shoulder injuries in the skeletally immature baseball pitcher and recommendations for the prevention of injury. PM&R 4(7): 509-516, 2012.

- 5) Lyman S, Fleisig GS, et al. : Effect of pitch type, pitch count, and pitching mechanics on risk of elbow and shoulder pain in youth baseball pitchers. *Am J Sports Med* 30(4) : 463-468, 2002.
- 6) 山田 洋, 長尾秀行・他: 野球のピッチングにおける投法の違いが動作に与える影響. *東海大学スポーツ医科学雑誌*26 : 45-51, 2014.
- 7) 齋藤健治, 井上一彦・他: 加速度センサにより計測した野球投球時の体幹および前腕の運動と投球スピードの関係. *人間工学*48(1) : 40-47, 2012.
- 8) Fleisig GS, Andrews JR, et al. : Kinetics of baseball pitching with implications about injury mechanisms. *Am J Sports Med*23 (2) : 233-239, 1995.
- 9) Todd.s Ellenbecker, Kevin E.Wilk 【監訳】加賀谷善教, 鶴池柁叡: スポーツ障害「肩」の治療－評価からリハビリテーション, 競技復帰まで－, ナップ, 東京, 2018. pp19-33.
- 10) Davis JT, Limpisvasti O, et al. : The effect of pitching biomechanics on the upper extremity in youth and adolescent baseball pitchers. *Am J Sports Med*37 : 1484-1491, 2009.