

野球の投手における繰り返しの全力投球後の下肢筋機能の変化

水川 大海¹⁾ 中田 開人¹⁾ 三島 隆章^{1,2)}

Hiromi MIZUKAWA¹, Kaito NATAKA¹ and Takaaki MISHIMA^{1,2}: Changes in lower limb muscle function after repeated maximum effort of pitches in baseball pitchers.

和文抄録：

野球投手の投球数増加に伴う下肢筋機能の変化を検討した研究は少ない。投球動作は左右非対称であることから、筋機能低下の要因は軸脚と踏込脚では異なる可能性がある。そこで本研究は、投手における投球数増加による下肢筋機能の経時的変化を明らかにすることを目的とした。被験者は、硬式野球部に所属する男子大学生投手6名であった。試合を模した投球課題を実施し、投球課題の直前、直後、1日後および2日後に膝関節伸展筋群の等尺性最大随意性収縮（MVC）、力の立ち上がり率、主観的筋痛の程度を測定した。測定の結果、MVCが軸脚においては直後のみ、踏込脚においては直後から1日後まで、有意な低値を示した（ $P < 0.05$ ）。本研究の結果より、投球動作を反復することで両脚の膝関節伸展筋群に筋疲労が発生することが明らかとなった。また回復過程の違いから、異なる要因によって筋疲労が発生していることが示唆された。

Key words: pitching fatigue, muscle fatigue, stride leg

キーワード: 投球疲労, 筋疲労, 踏込脚

1. 緒言

野球の投球動作において上肢の動きは非常に高速であり、ボールリリース時の肩甲上腕関節の角速度は7,000 °/sにもおよぶ（Fleisig et al., 1995）。このような投球動作を複数イニングにわたり繰り返すことで身体に大きな負荷が加わるため（Fazarale et al., 2012）、適切な休息と回復を考慮しなければ、疲労が蓄積されていく可能性がある（Lyman et al., 2002）。投球時の上肢痛はオーバーストレスと関連しており、肩および肘の障害発生リスクが高くなる可能性が示されている（Yang et al., 2014）。したがって、投球動作の反復に伴う疲労は、主に上肢に着目して検討されている

（Jaipal et al., 2012; Escamilla et al., 2007; 岩佐ほか, 2011）。一方、投球動作は主に下肢と体幹によって発生したトルクを上肢に効率よく伝える運動連鎖が重要であることから（Chalmers et al., 2017）、投球動作の反復に伴う下肢機能の変化も検討する必要がある。

Murray et al. (2001) は実際の試合における投球動作の変化を検討した結果、非投球側脚である踏込脚の膝関節伸展角度が最初のイニングと比較して最終イニングにより屈曲位となることを示した。また、平山ほか（2010）は大学生投手を対象に投球数の増加に伴う下肢関節の力学的仕事量の変化を検討した結果、踏込脚の股関節伸展トルクの絶対仕事および負仕事は有意に減少することを

1) 大阪体育大学大学院スポーツ科学研究科
〒590-0496 大阪府泉南郡熊取町朝代台1-1

2) 大阪体育大学体育学部
〒590-0496 大阪府泉南郡熊取町朝代台1-1

1. Graduate School of Sport and Exercise Sciences, Osaka University of Health and Sport Sciences

1-1, Asashirodai, Kumatori, Sennnan, Osaka 590-0496

2. School of Health and Sport Sciences, Osaka University of Health and Sport Sciences

1-1, Asashirodai, Kumatori, Sennnan, Osaka 590-0496

示した。さらに、Erickson et al. (2016) は青年中期投手を対象として投球数の増加に伴う投球動作の変化を検討した結果、肩関節の動作に変化が認められなかった一方で、ボールリリース時の膝関節屈曲角度が増加することを示した。著者はこの結果について、投球数の増加によって上肢よりも下肢が疲労しやすい可能性があるとして述べている。

筋疲労とは最大張力もしくは最大パワーが低下する状態、あるいは筋が一定の張力もしくは一定のパワーを継続して発揮できなくなる現象である (Allen et al., 2008)。筋疲労とそれに伴う張力の回復過程は、筋の収縮様式の違いによって異なることが知られている。不慣れな伸張性収縮もしくは遠心性収縮 (eccentric contraction; ECC) は短縮性収縮もしくは求心性収縮 (concentric contraction; CON) と比較して、張力の回復に時間を要する (James et al., 2008; Souron et al., 2018)。スポーツ活動において、ECCはスプリントからの急激な減速や方向転換動作などによって引き起こされることが知られている (Howatson, & Milak, 2009)。

Yanagisawa, et al. (2018) は反復投球後の下肢筋機能の変化を検討している。対象は大学生投手であり、試合を模した反復投球を行った結果、投球後に等尺性股関節外転 ($P = 0.009$, $d = 0.41$) および内転筋力 ($P = 0.001$, $d = 0.47$) が減少することを示した。しかしながら、彼らの研究では両側での測定であった。投球は左右非対称な動作であり、特に踏込脚の大腿直筋を含む下肢筋群は接地前から減速期にかけて伸張性の力発揮となることから (Campbell et al., 2010)、投球動作の反復に伴う筋疲労についてより詳細に理解するためには軸脚と踏込脚の筋機能を経時的に測定する必要がある。

本研究では、大学生男子野球選手を対象に最大努力での投球を反復させ、投球後の下肢筋機能の経時変化を検討することを目的とした。本研究によって投球動作の反復に伴う筋機能の変化を明らかにすることは、投手のコンディショニングやトレーニングプログラム作成に役立つと考えられる。我々は、投球動作の反復によって踏込脚の膝関節伸展筋群の筋機能が長期的に低下すると仮説

を立てた。

II. 方法

1. 被検者

被験者は硬式野球部に所属する男子大学生投手6名であった (年齢: 21.2 ± 1.1 歳, 身長: 176.3 ± 5.6 cm, 体重: 73.2 ± 4.1 kg)。被験者において投球時にボールを持つ手、すなわち利き手は、右手が3名、左手が3名であった。なお、被験者が所属するチームは関西の大学野球連盟の1部リーグのチームであり、被験者は公式戦に出場していないレギュラー選手以外の選手であった。また、本実験はシーズンオフの時期(2月中旬から3月上旬)に実施しており、被験者は週あたり2回のレジスタントトレーニングを行っていた。被験者には、実験当日から48時間後までの実験期間中に激しい運動や投球に類似した運動、アルコールの摂取を制約した (Souron et al., 2018)。実験に先立ち、被験者には実験の意義、目的および実験に伴う危険性について説明し、参加の同意を得た。また本研究は、大阪体育大学研究倫理審査部会の承認を得た後に実施した (承認番号: 20-36)。

2. 実験プロトコル

実験は3日間にわたって行い、各被験者は各日ほぼ同一の時刻に測定を開始した。初日はまず、実験室にて基礎特性として身長および体重の測定を行った。身長は身長計 (SY-OA, NAVIS, 吉田製作所)、体重は体組成計 (MC-780A-N, タニタ社製) を用いて測定を行った。その後、引き続き実験室にて膝関節伸展筋群の筋機能および主観的筋痛の程度の測定を行った。膝関節伸展筋群における筋機能の測定項目は等尺性最大随意性収縮 (maximal voluntary contraction; MVC) および力の立ち上がり率 (rate of force development; RFD) であり、主観的筋痛の程度の測定にはビジュアルアナログスケール (VAS) を用いた。膝関節伸展筋群の筋機能およびVASの測定後、屋内練習場に移動して投球課題を行った。さらに、投球課題終了直後に実験室に戻り、再び膝関節伸展筋群の筋機能およびVASの測定を行った。投球課題終了

から直後の筋機能の測定までの時間は5分程度であった。なお、24時間後および48時間後は、実験室において膝関節伸展筋群の筋機能およびVASの測定を行った。

3. 投球課題

被検者は十分なウォームアップ後に投球課題を実施した。投球課題はすべて屋内練習場で行い、被検者はマウンドから18.44 m離れた捕手に最大努力で投球を行った。投球時の球種はストレートに統一した。被検者には1球ごとに投球速度のフィードバックを行い、投球課題を通じて最大投球速度を維持するように指示した。被験者は15球を投球するプロトコルを1イニングとし、9イニング計135球の投球を行った。なお、各投球間およびイニング間の休息時間はそれぞれ、15秒間と6分間であった。投球課題時における測定項目は投球速度であった。投球速度は、キャッチャーの後方からスピードガン (Stalker soro 2, Stalker Sport, USA) を使用して測定した。イニングごとに平均投球速度を算出し、分析の対象とした。

4. 測定項目

1) MVC

MVCは、両脚の膝関節伸展筋群で測定した。被検者は椅子に座り、膝関節を90°に屈曲して、胴体の動きを抑え安定性を保つために椅子と胴体をベルトで固定した。張力計(ストレインアンプ, TSA-110, 竹井機器)は測定脚の足関節上部に、地面と平行になるように固定した。十分なウォーミングアップの後、MVCの測定を2回行った。収縮時間は約3秒であり、被験者にはグリップを持ち、合図と同時に最大努力で素早く力発揮するように指示した。なお、1回目のMVCと2回目のMVCの測定は、疲労の影響を受けないために3分間の休息を設けた。張力計によって測定されたトルク値は、Power Lab (8SP, ADInstruments) を介してパーソナルコンピュータ上のソフトウェア (LabChart, ADInstruments) に記録された。記録された値は大腿骨外側上顆から足部固定部の中心までの距離で補正し、最大値を後の分析に供した。なお、投球時にボールを持つ手と同じ脚を軸脚、

ボールを持つ手の反対側の脚を踏込脚とした。

2) RFD

MVCの測定時に、RFDの測定も併せて行った。RFDの算出は、Peñailillo et al. (2015)の方法に従って行った。7.5 Nmを上回った時点を筋収縮の開始時点として、最大値、0-50 ms, 0-100 ms, 0-200 msおよび100-200 msの区間の平均勾配を算出した。なお、RFDの最大値は、1 ms単位で算出されたトルクの変化量が最大となった時点の傾きとした。

3) VAS

主観的筋痛の程度の評価にはVASを用いた。用紙に100 mmの直線を引き左端に“痛み無し”，右端に“想像できる最大の痛み”と記入した。被験者には踏込脚と軸脚それぞれの大腿部前面について、痛みの程度が直線上のどこに位置するかを記入させ、1 mm単位で記録した。

5. 統計処理

すべての結果は、平均 ± 標準偏差で示した。統計解析には、統計分析ソフトウェア (IBM SPSS Statistics 27) を用いた。投球速度、膝関節伸展筋群の筋機能およびVASの経時的変化の検討には反復測定分散分析を用いた。有意な主効果が認められた場合にはBonferroni修正法を用いて事後検定をおこなった。投球速度の変化と膝関節伸展筋群の筋機能の変化との関係性を明らかにするために、1イニングと比較した9イニングの投球速度の変化率と、投球課題前後の膝関節伸展筋群の筋機能の変化率について、Pearsonの積率相関係数を算出した。なお、有意水準は5%未満とした。

III. 結果

1. 基本特性

被検者の投球課題前における各変数の測定値は、表1の通りであった。投球速度は1イニングの投球速度の平均値を示した。また、MVCおよび各区間のRFDは軸脚と踏込脚ごとに投球課題前の値を示した。

表1 1イニングにおける平均投球速度および投球課題前における下肢筋機能

測定項目	測定結果
投球速度 (km/h)	124.6 ± 6.9
踏込脚	
MVC (Nm)	272.2 ± 42.4
RFD (Nm/s)	
peak	2382.6 ± 406.4
0-50ms	1970.3 ± 341.6
0-100ms	1332.9 ± 261.9
0-200ms	983.2 ± 171.9
100-200ms	662.9 ± 169.7
軸脚	
MVC (Nm)	259.0 ± 31.0
RFD (Nm/s)	
peak	2222.3 ± 441.1
0-50ms	1817.2 ± 371.7
0-100ms	1323.3 ± 308.6
0-200ms	948.5 ± 170.5
100-200ms	642.7 ± 88.0

平均±標準偏差

MVC : maximal voluntary contraction.

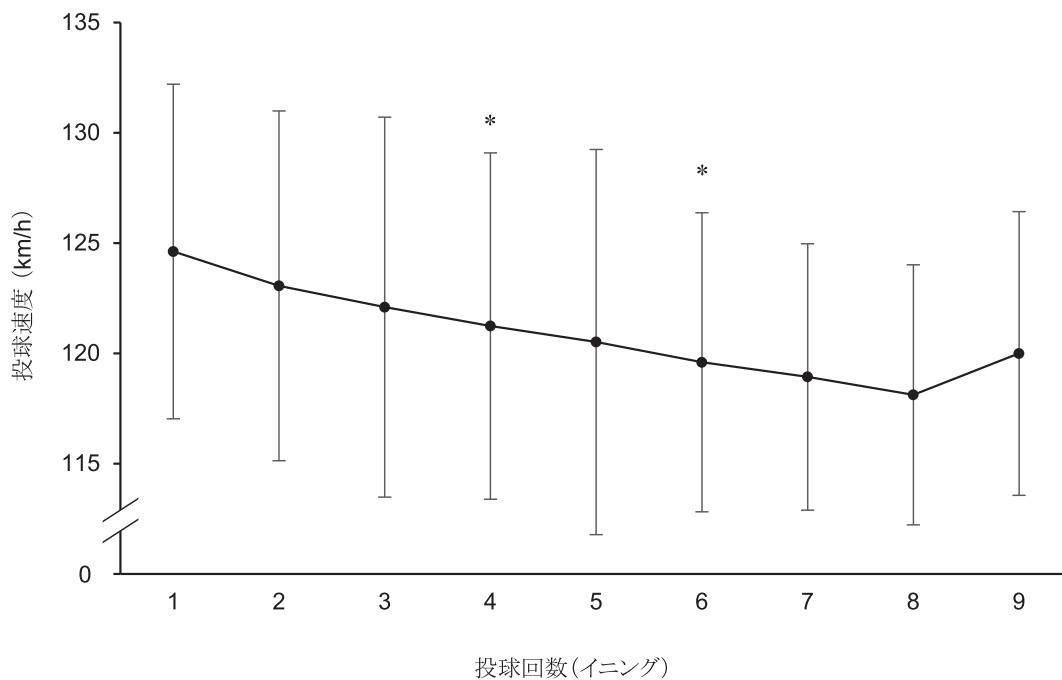
RFD : rate of force development.

2. 投球速度の変化

投球速度の変化は、図1の通りであった。各イニングの投球速度は、1イニングから9イニングまでそれぞれ、124.6 ± 7.6 km/h, 123.1 ± 7.9 km/h, 122.1 ± 8.6 km/h, 121.2 ± 7.9 km/h, 120.5 ± 8.7 km/h, 119.6 ± 6.8 km/h, 118.9 ± 6.0 km/h, 118.1 ± 5.9 km/h および 120.0 ± 6.4 km/h であった。投球速度について反復測定分散分析を行った結果、イニングに有意な主効果が認められた ($P < 0.05$)。そこで多重比較検定を行った結果、4イニングと6イニングが1イニングと比較して有意な低値を示した ($P < 0.05$)。

3. MVCの変化

MVCの経時的変化は図2の通りであった。踏込脚のMVCは投球前が272.2 ± 46.4 Nm, 投球直後が227.0 ± 39.3 Nm, 24時間後が226.5 ± 27.8 Nm, 48時間後が240.6 ± 55.9 Nmであった。また、軸脚のMVCは投球前が259.0 ± 33.9 Nm, 投球直後が229.2 ± 36.6 Nm, 24時間後が249.6 ± 42.2 Nm, 48時間後が247.5 ± 56.7 Nmであった。反復測定分散分析の結果、踏込脚、軸脚ともに有意な主効果が認められた ($P < 0.05$)。そこで、多重比較検定を行ったところ、投球前と比較して踏込脚では投球直後および24時間後が、軸脚では投

図1 各イニングの投球速度 *: $P < 0.05$. vs. 1イニング

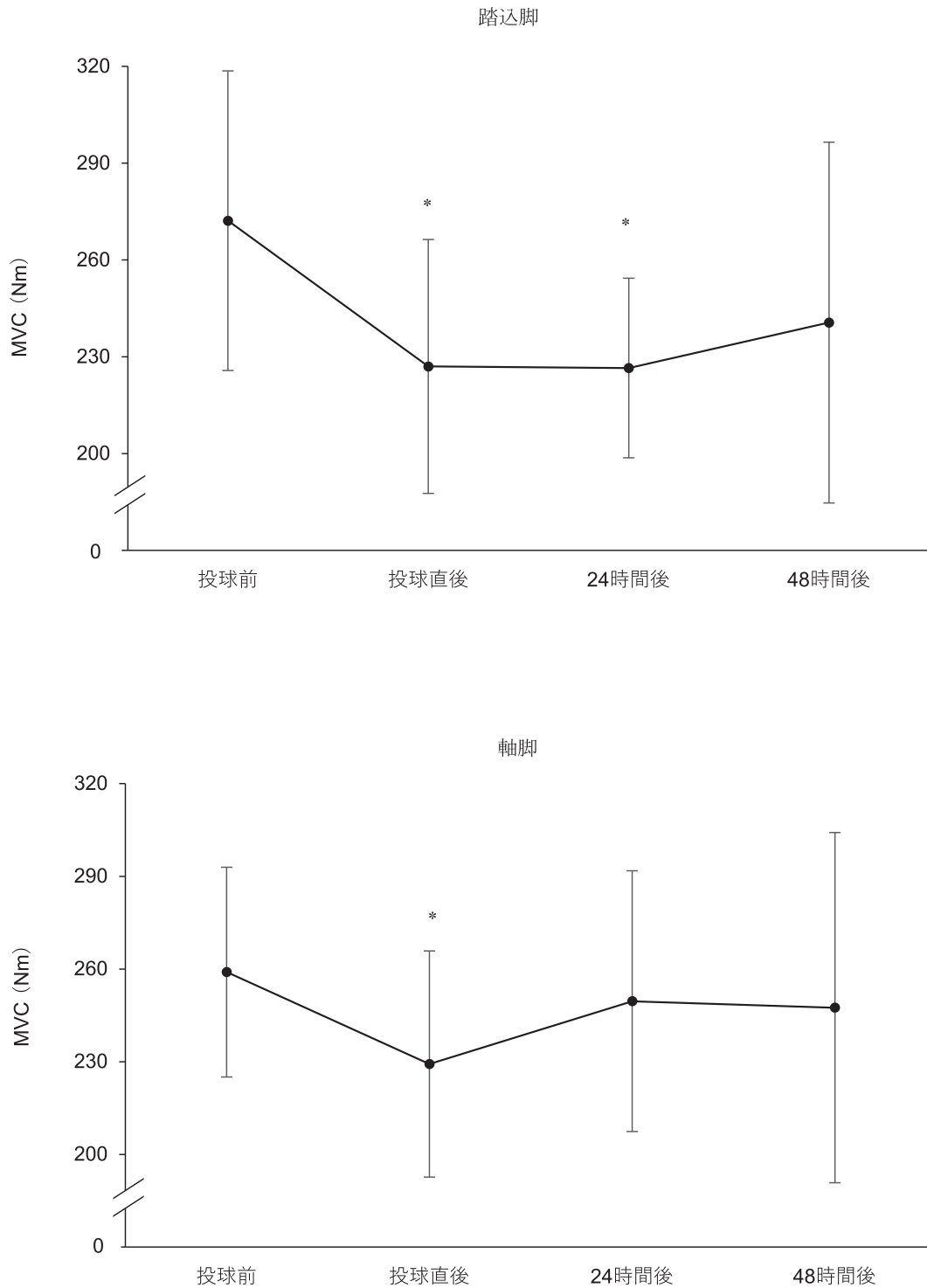


図2 踏込脚および軸脚の投球直後-48時間後におけるMVCの経時的変化.
 MVC: maximal voluntary contraction. *: $P < 0.05$ vs. 投球前.
 平均±標準偏差

球直後が有意に低値を示した ($P < 0.05$).

4. RFDの変化

RFDの経時的変化は、表2の通りであった。反復測定分散分析を行った結果、踏込脚はRFD0-50 ms, RFD0-100 ms, RFD0-200 msに有意な主

効果が認められた ($P < 0.05$)。また、軸脚はRFD0-100 ms, RFD0-200 msに有意な主効果が認められた ($P < 0.05$)。しかしながら、多重比較検定を行った結果、直後においても踏込脚 (RFD0-50 ms : $P = 0.052$, RFD0-100 ms : $P =$

0.134, RFD0-200 ms : $P = 0.275$) および軸脚
(RFD0-100 ms : $P = 0.053$, RFD0-200 ms : $P =$
0.078) とともに有意差は認められなかった.

5. VAS

VASの経時的変化は、表3の通りであった。
VASは踏込脚、軸脚ともに有意な差異は認められ
なかった.

表2 投球前のRFDの経時的変化

踏込脚

	投球前	投球直後	24時間後	48時間後	P値
RFD peak (Nm/s)	2382.6 ± 406.4	1846.8 ± 624.3	1971.7 ± 485.3	2181.7 ± 265.9	0.08
RFD 0-50 (Nm/s)	1970.3 ± 483.5	1514.4 ± 410.0	1824.0 ± 215.2	1805.0 ± 226.0	0.04
RFD 0-100 (Nm/s)	1332.9 ± 302.1	1078.7 ± 232.4	1130.6 ± 179.5	1223.3 ± 187.4	0.02
RFD 0-200 (Nm/s)	983.2 ± 179.6	825.8 ± 121.0	827.2 ± 109.4	876.8 ± 126.8	0.02
RFD 100-200 (Nm/s)	662.9 ± 169.7	600.1 ± 73.6	609.9 ± 56.9	604.2 ± 139.9	0.81

平均±標準偏差

軸脚

	投球前	投球直後	24時間後	48時間後	P値
RFD peak (Nm/s)	2222.3 ± 441.1	1925.1 ± 454.5	2155.5 ± 466.5	2167.1 ± 352.9	0.17
RFD 0-50 (Nm/s)	1817.2 ± 389.2	1581.9 ± 379.2	1681.2 ± 343.3	1772.7 ± 293.1	0.26
RFD 0-100 (Nm/s)	1323.3 ± 306.5	1169.0 ± 273.9	1157.9 ± 260.0	1172.2 ± 256.7	0.01
RFD 0-200 (Nm/s)	948.5 ± 170.9	833.1 ± 145.8	841.0 ± 150.8	865.2 ± 159.4	0.01
RFD 100-200 (Nm/s)	642.7 ± 88.0	562.2 ± 118.7	584.3 ± 123.1	624.5 ± 155.9	0.11

平均±標準偏差

RFD : rate of force development.

表3 VASを用いた主観的筋痛の程度の経時的変化

	投球前	投球直後	24時間後	48時間後	P値
踏込脚					
VAS(cm)	0.5 ± 1.1	1.4 ± 1.9	1.1 ± 1.5	0.2 ± 0.3	0.09
軸脚					
VAS(cm)	0.7 ± 1.5	1.8 ± 2.3	1.1 ± 1.0	0.2 ± 0.3	0.12

平均±標準偏差

VAS : visual analog scale.

表4 投球前に対する投球直後におけるMVCトルクおよびRFDの変化率と、1イニングに対する9イニングにおける投球速度の変化率との相関関係

踏込脚

	投球速度の変化率との相関係数 (r)	P 値
MVCトルク	0.34	0.52
RFD peak	0.31	0.27
RFD 0-50	0.29	0.58
RFD 0-100	0.19	0.72
RFD 0-200	0.39	0.45
RFD 100-200	0.34	0.26

軸脚

	投球速度の変化率との相関係数 (r)	P 値
MVCトルク	-0.16	0.77
RFD peak	0.21	0.35
RFD 0-50	0.06	0.91
RFD 0-100	-0.24	0.65
RFD 0-200	-0.52	0.29
RFD 100-200	0.39	0.22

MVC : maximal voluntary contraction.

RFD : rate of force development.

6. 相関

1イニングと比較した9イニングの投球速度の変化率と、投球課題前後の膝関節伸展筋群の筋機能の変化率との相関係数を表4に示した。分析の結果、有意な相関関係は認められなかった。

IV. 考察

1. 踏込脚のMVCが長期的に低下した要因

本研究は最大努力での投球を反復して行わせ、

投球後の下肢筋機能の経時的変化を検討することを目的として行った。本研究から得られた知見のひとつに、軸脚の膝関節伸展筋群のMVCは24時間後には回復するが、踏込脚の膝関節伸展筋群のMVCは1日後においても低下したままであったことが挙げられる。

MVCの長期的な低下はECC後に認められる徴候であり、スポーツ活動においては急激な減速を行うことで長期的な低下が観察されることが知られている。例えばHowatson & Milak (2009)は、

減速を伴う30 mスプリント後のMVCの回復過程を検討した結果、48時間後までMVCが有意に低下したままであったと報告している。ECC後に認められるMVCの長期的な低下は、筋線維損傷の割合と高い相関があることが認められていることから (Raastad et al., 2010), 運動誘発性筋損傷が関与していると考えられている。野球の投手において踏込脚は、接地後にアンカーとして機能することで、前方および垂直方向への力を回転力へと変換する (MacWilliams et al., 1998)。踏込脚による急激な減速は胴体の前方への慣性力を生み出し、結果として高い投球速度を獲得する。この時、踏込脚は大腿直筋を含む下肢筋群を接地前から活性化させ、減速期においてECCによって身体を制御する (Campbell et al., 2010)。したがって、本研究に認められた踏込脚の膝関節伸展筋群のMVCの長期的な低下は、投球動作の反復によって運動誘発性筋損傷を伴う筋疲労が生じた可能性が考えられる。

踏込脚のRFDは多重比較検定において有意差は認めなかったものの、RFD0-50 ms, RFD0-100 ms, RFD0-200 msは時間による主効果が認められ、投球直後にそれぞれ23.1%, 19.1%および16.0%低下していた。筋におけるRFDは力-時間曲線の傾き (Δ 力/ Δ 時間)として算出され、スポーツに必要な筋の瞬発的な力発揮を評価する指標である (Aagaard et al., 2002)。投球動作において踏込脚は接地時に膝関節を固定し、大きな地面反力を受けることで高い投球速度の獲得へとつながる。MacWilliams et al. (1998)は投球速度と密接に関係する指標であるボールリリース時の手関節速度と、踏込脚によって生成された体重あたりの最大地面反力との間に有意な正の相関関係 ($r^2 = 0.88$)があることを示している。また、他の先行研究では投球数の増加に伴い下肢動作は変容することが報告されている。例えばMurray et al. (2001)は実際の試合における投球動作の変化を検討した結果、踏込脚の膝関節伸展角度が最初のイニングと比較して最終イニングにおいてより屈曲位となることを示した。本研究の結果より、先行研究によって認められた下肢動作の変化は筋疲

労によると考えられる。したがって、投球数の増加に伴うRFDの低下は投球動作の変容を伴い、地面反力の低下、さらには投球速度の低下へとつながる可能性がある。

VASについては有意な変化が認められなかった。ECC後のVASの増加はMVCの長期的な低下と同様に運動誘発性筋損傷の間接的な指標である一方で、MVCとは異なる経時の変化をたどり、また必ずしも一致しない。例えば、Athanasios et al. (2005)は肘関節屈曲筋群を対象に最大ECCの75%の強度で12回6セットECCを実施した後の運動誘発性筋損傷の間接的な指標の経時の変化を検討した結果、MVCは直後において最も低下してその後緩やかに回復していった一方で、主観的筋痛の程度および血中クレアチンキナーゼは96時間後にピークとなることを示している。このような運動誘発性筋損傷に対する主観的な測定による評価 (VASの変化)と客観的な測定による評価 (MVCの変化)にズレが生じていることは、連日にわたっての投球が求められる試合期においては特に注意する必要がある。ただし、本研究では組織学的な指標は測定していないため、MVCの長期的な低下が筋損傷によるものであるとは断言できず、今後の検討課題である。

2. 軸脚のMVCが低下した要因

軸脚では、MVCは投球直後において有意な低下を示したにもかかわらず、1日後には回復した。またRFDでは、0-100 msおよび0-200 ms区間で運動直後に低下することが示された。これら軸脚における筋機能の経時の変化はCON運動後に認められる筋機能の経時の変化と同様の傾向を示している。Souron et al. (2018)は、膝関節伸展筋群を対象として、最大等速性CON運動を用いて運動直後にMVCを40%低下させた場合においても、1日後にはMVCは運動前の値まで回復することを報告している。これらCONにおける張力低下には、興奮収縮連関不全や代謝産物の蓄積などが関与していると考えられている (Feasson et al., 2006)。野球投手の軸脚は、身体のバランスをコントロールしながら、重心を勢いよく投球方向へと移動させる働きが必要となる (Kageyama et

al., 2014). 投球において、ストライド長はピッチングマウンドの下り勾配を使用してより大きな並進エネルギーを生成できているかを評価する重要な生体力学的パラメーターであり (Dillman et al., 1993; Fry et al., 2017), また, MacWilliams et al. (1998) は軸脚による床反力と, 投球速度と密接に関連する手関節の最大加速度との間に有意な正の相関関係があることを示している. このように軸脚では高い投球速度を獲得するために, 膝関節を含む下肢のタイミングのよい伸展動作を伴うことで筋疲労が生じた可能性がある. 軸脚において膝関節伸展筋群のMVCは1日後に回復していたことから, 投球直後の軸脚において認められたMVCの低下は, 短縮性収縮によって一時的に筋機能が低下していたと考えられる.

3. 投球速度の変化率とMVCの低下との間に有意な相関が認められなかった要因

運動直後に両側共に膝関節伸展筋群のMVCに低下が認められた一方で, 投球速度の低下との間に有意な相関は認められなかった. 本研究は多くの先行研究 (Murray et al., 2001; Jaipal et al., 2012; Erickson et al., 2016) と同様に投球速度の有意な低下が認められたことから, 投球試技は投球疲労を誘起する負荷として十分であったと考えられる. しかしながら, 有意な相関が認められなかった要因として, 投球速度の変化は様々な要因に影響されることが挙げられる. 実際, 投球数の増加に伴う投球動作の変化を調査した先行研究では, ボールリリース時の膝関節伸展角度および体幹および上肢を段階的に加速させることができているかを示す指標であるHip/shoulder separationが有意に低下することを示した (Erickson et al., 2016). この結果は投球数の増加に伴い下肢だけではなく体幹においても疲労を伴う変化が生じていた可能性があることを示している. したがって, 下肢の筋機能の低下だけでは投球速度の低下の要因を説明できない可能性があり, 投球速度の低下の要因を明らかにするためにはさらなる研究が必要である.

4. 現場への示唆

本実験の結果から, 踏込脚は軸脚よりもMVC

の回復に時間を要することが明らかとなった. 学生レベルの野球の大会では連日に渡って投球する場合があることから, 踏込脚の長期的な筋力低下はパフォーマンスに影響を与える可能性がある. 興味深いことに, 事前のECCがその後の著しいECCによるMVCの長期的な低下を軽減することが知られている (Nosaka & Clarkson, 1995). 例えば, Souron, et al. (2018) の研究では, 膝関節伸展筋群を対象として各被験者が2回にわたってECCによりMVCを40%低下させた後の回復過程を検討している. 1回目ではMVCトルクは4日後においても低下したままであった. しかしながら, 2週間後に再度ECCによりMVCトルクを低下させた場合, 2日後に回復することを示した. このように事前にECCを行うことで, 引き続いて行われるECCによる長期的な筋機能低下を軽減することが示されている. 膝関節伸展筋群に対してECCを伴うトレーニングとしては, ランジドリルやダウンヒルランニングなどが挙げられる. 野球の投手においては, 試合期前に膝関節伸展筋群に対してECCを伴うトレーニングを実施することによって踏込脚に発生する投球翌日以降の筋機能の低下を低減できる可能性がある.

5. 研究限界

本研究では, 試合を模した投球試技を行っていることから, 実際の試合と比較して被験者の努力度を十分に高めることができず, 1イニングにおける投球速度および投球速度の低下率が十分でなかった可能性がある. 事実, プロレベルの投手を対象に実際の試合における投球速度の変化を検討した結果, 初めのイニングと比較して最終イニングで投球速度が7.2 km/h低下していた (Murray et al., 2001). 一方, 本研究での投球速度の低下は4.6 km/hに留まった. これによってMVCトルクの低下率と投球速度の低下率との間に有意な相関が認められなかった可能性がある. さらに, 本研究では24時間後および48時間後においては投球速度を測定していない. したがって, 翌日以降の筋機能低下が投球速度に影響を与えるかについても明らかではないため, 今後の検討課題である.

本研究では被験者が6名と十分でなかったこと

で、MVCトルクの低下率と投球速度の低下率との間に有意な相関や、9イニングにおける投球速度は1イニングと比較して有意な低下を示すことができなかった。さらに、本研究は大学生投手を対象としており、異なる競技レベルの選手を対象とした場合に同様の結果が得られるかについては今後検討していく必要がある。

V. 結論

本研究の目的は最大努力での投球を反復させ、投球後の下肢筋機能の経時的変化を検討することで、軸脚および踏込脚に生じる筋疲労の要因を明らかにすることであった。大学野球部に所属する男性投手6名に対して試合を想定した投球課題を実施し、投球課題の前、直後、24時間後、48時間後に膝関節伸展筋群のMVC、RFDおよびVASを測定した。その結果、MVCは投球前と比較すると、軸脚においては投球直後のみ、踏込脚においては投球直後から1日まで有意な低値を示した($P < 0.05$)。本研究の結果より、投球動作を反復することで両脚の膝関節伸展筋群に筋疲労が発生することが明らかとなった。また回復過程の違いから、軸脚と踏込脚では異なる要因によって筋疲労が発生していることが示唆された。

文献リスト

- Aagaard, P., Simonsen, E. B., Andersen, J. L., Magnusson, P. & Poulsen, P. D. (2002) Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. *J Appl Physiol*, 93: 1318–1326.
- Allen, D. G., Lamb, G. D. & Westerblad, H. (2008) Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiol Rev*, 88 (1): 287–332.
- Athanasios, Z. J., Theocharis, V., Tofas, T. Tsiokanos A., Yfanti, C., Paschalis, V., Koutedakis, Y. and Nosaka, K. (2005) Comparison between leg and arm eccentric exercises of the same relative intensity on indices of muscle damage. *Eur J Appl Physiol* 95: 179–185.
- Campbell, B. M., Stodden, D. F. & Nixon, M. K. (2010) Lower extremity muscle activation during baseball pitching. *J Strength. Cond Res*, 24 (4): 964–971.
- Chalmers, P. N., Wimmer, M. A., Verma, N. N., Cole, B. J. & Romeo, A. A. (2017) The relationship between pitching mechanics and injury: a review of current concepts. *Sports Health*, 9 (3): 216–221.
- Dillman, C. J., Fleisig, G. S. & Andrews, J. R. (1993) Biomechanics of pitching with emphasis upon shoulder kinematics. *J Orthop Sports Phys Ther*, 18 (2): 402–408.
- Escamilla, R. F., Barrentine, S. W., Fleisig, G. S., Zheng, H., Takada, Y., Kingsley, D. & Andrews, J. R. (2007) Pitching biomechanics as a pitcher approaches muscular fatigue during a simulated baseball game. *Am J Sports Med*, 35 (1): 23–33.
- Erickson, B. J., Sgori, T., Chalmers, P. N., Vignona, P., Lesniak, M., Bush-Joseph, C. A., Verma, N. N. & Romeo, A. A. (2016) The impact of fatigue on baseball pitching mechanics in adolescent male pitchers. *Arthroscopy*, 32 (5): 762–771.
- Fazarale, J. J., Magnussen, R. A., Pedroza, A. D. & Kaeding, C. C. (2012) Knowledge of compliance with pitch count recommendations: a survey of youth baseball coaches. *Sports Health*, 4 (3): 202–204.
- Feasson, L., Camdessanche, J. P., El Mandhi, L., Calmels, P., Millet, G. Y. (2006) Fatigue and neuromuscular diseases. *Ann Readapt Med Phys* 49 (6): 289–300, 375–284.
- Fleisig, G. S., Andrews, J. R., Dillman, C. J. & Escamilla, R. F. (1995) Kinetics of baseball pitching with implications about injury mechanism. *Am J Sports Med*, 23: 233–239.
- Fry, K. E., Pipkin, A., Wittman, K., Hetzel, S. & Sherry, M. (2017) Youth baseball pitching stride length: normal values and correlation with field testing. *Sports Health*, 9 (3): 205–209.
- 平山大作・藤井範久・阿江通良・小池関也 (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: 225–232.

- Howatson, G., & Milak, A. (2009) Exercise-induced muscle damage following a bout of sport specific repeated sprints. *J Strength Cond Res*, 23 (8): 2419–2424.
- 岩佐知子・菅沼一男・知念紗嘉・丸山仁司 (2011) 投球数が肩関節機能に及ぼす影響. *理学療法科学*, 26: 23–26.
- James, M. D., John, C. & John, G. S. (2008) Low-frequency fatigue and neuromuscular performance after exercise-induced damage to elbow flexor muscles. *J Appl Physiol*, 105 (4): 1146–1155.
- Jaipal, G., Neal, S. E., Kenton, R. K. & Wendy, J. H. (2012) Voluntary activation deficits of the infraspinatus present as a consequence of pitching-induced fatigue. *J Shoulder Elbow Surg*, 21 (5): 625–630.
- Kageyama, M., Sugiyama, T., Takai, Y., Kanehisa, H. & Maeda, A. (2014) Kinematic and kinetic profiles of the lower limbs during baseball pitching in collegiate baseball pitchers. *J Sports Sci Med*, 13 (4): 742–750.
- Lyman, S., Fleisig, G. S., Andrews, J. R. & Osinski, E. D. (2002) 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.
- MacWilliams, B. A., Choi, T., Perezous, M. K., Chao, E. Y. & McFarland, E. G. (1998) Characteristic ground-reaction forces in baseball pitching. *Am J Sports Med*, 26 (1): 66–71.
- Murray, T. A., Cook, T. D., Werner, S. L., Schlegel, T. F. & Hawkins, R. J. (2001) The effects of extended play on professional baseball pitchers. *Am J Sports Med*, 29 (2): 137–142.
- Nosaka K. & Clarkson P. M. (1995) Muscle damage following repeated bouts of high force eccentric exercise. *Med Sic Sports Exerc*, 27: 1263–1269.
- Peñailillo, L., Blazeovich, A., Numazawa, H. & Nosaka, K. (2015) Rate of force development as a measure of muscle damage. *Scand J Med Sci Sports*. 25: 417–427.
- Raastad, T., Owe, S. G., Paulsen, G., Enns, D., Overgaard, K., Crameri, R., Kiil, S., Belcastro, A., Bergersen, L. & Hallen, J. (2010) Changes in calpain activity, muscle structure, and function after eccentric exercise. *Med Sci Sports Exerc*. 42: 86–95.
- Souron, R., Nosaka, K. & Jubeau, M. (2018) Changes in central and peripheral neuromuscular fatigue indices after concentric versus eccentric contractions of the knee extensors. *Eur J Appl Physiol*, 118 (4): 805–816.
- Yanagisawa, O., Taniguchi, H. (2018) Changes in lower extremity function and pitching performance with increasing numbers of pitches in baseball pitchers. *J Exerc Rehabil*, 14 (3): 430–435.
- Yang, J., Mann, B. J., Guettler, J. H., Dugas, J. R., Irngang, J. J., Fleisig, G. S. & Albright, J. P. (2014) Risk-prone pitching activities and injuries in youth baseball: Findings from a national sample. *Am J Sports Med*, 42 (6): 1456–1463.

(2021年11月24日受付)
(2022年12月19日受理)