

野球の投手における投球数増加に伴う  
膝関節伸展筋群の筋機能の経時的変化

スポーツ科学研究科 スポーツ科学専攻

学籍番号 220M18

氏名 水川 大海

指導教員 三島 隆章 教授

# 論文内容の要旨

論文題目 野球の投手における投球数増加に伴う膝関節伸展筋群の筋機能の経時的変化  
学籍番号 220M18  
氏名 水川 大海  
指導教員 三島 隆章 教授

本研究の目的は野球の投手に対して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し、軸脚および踏込脚に生じる筋機能低下の要因を明らかにすることであった。被検者は大学硬式野球部に所属する男性投手 6 名であった。被験者は試合を想定した投球課題を実施し、投球課題の前、投球直後、24 時間後、48 時間後に軸脚および踏込脚における膝関節伸展筋群の等尺性最大随意性収縮(MVC) トルクおよび力の立ち上がり率 (RFD) の測定、および視覚的アナログスケール (VAS) を用いた主観的筋痛の程度の測定を行った。投球課題は試合を模した投球を計 135 球全力で行わせた。分析の結果、投球速度は 1 イニングと比較して 4, 6, 7 および 9 イニングにおいて有意な低値を示した ( $P < 0.05$ )。MVC トルクについて、踏込脚では投球前と比較して投球直後、24 時間後および 48 時間後において有意な低値を示した ( $P < 0.05$ )。一方軸脚では投球直後のみ投球前と比較して有意な低値を示した ( $P < 0.05$ )。RFD について、踏込脚では最大 RFD が、軸脚では 0-200 ms 区間における RFD が投球直後において、投球前と比較して有意な低値を示した ( $P < 0.05$ )。VAS については踏込脚および軸脚ともに有意差は認められなかった。MVC トルクの長期的な低下には低頻度疲労が関与していると考えられていることから、踏込脚では投球動作の反復によって膝関節伸展筋群に低頻度疲労が誘起された可能性があることが示唆された。

Changes in lower limb muscle function after repeated maximum effort of pitches in baseball pitchers.

Mizukawa Hiromi

## Abstract

In baseball pitchers, muscle fatigue of the upper limbs with increasing number of pitches has been clarified, while a few studies have examined muscle fatigue of the lower limbs. The purpose of this study was to clarify the factors that cause muscle fatigue in the pivot leg and stride leg with an increase in the number of pitches. The subjects were six adult male pitchers belonging to a university baseball team. The subjects threw a total of 135 pitches in a pitching task simulating a game. The knee extensor function and the degree of subjective muscle pain were measured immediately before, immediately after, 24 hours after, and 48 hours after the pitching task. The results of the analysis showed that the maximal isometric voluntary contraction (MVC) torque of both the pivot leg and stride legs was significantly lower after the throwing task than before ( $P < 0.05$ ). In addition, MVC torque was lower in the stride leg not only immediately after throwing but also at 24 hours and 48 hours ( $P < 0.05$ ). The results of the present study indicate that MVC torque only in the stride leg remained low until 48 hours. It is known that low-frequency fatigue is involved in the long-term reduction of MVC torque. Therefore, it was suggested that low-frequency fatigue may be induced in the knee extensors of the stride leg by increasing the number of pitches in baseball pitchers.

## 目 次

I 章 緒言	1
II 章 文研研究	3
1. 収縮様式により異なる張力の回復過程	3
2. 低頻度疲労	4
3. 野球投手の投球動作	6
4. 野球投手における投球数増加に伴うパフォーマンスの変化	8
III 章 研究の目的および課題	11
IV 章 伸張性および短縮性収縮に伴う膝関節伸展筋群の筋機能の 経時的変化(予備実験)	12
1. 目的	12
2. 方法	12
2-1. 被検者	12
2-2. 実験プロトコル	12
2-3. 疲労課題	13
2-4. 測定項目	14
2-4-1. MVC トルク	14
2-4-2. RFD	14
2-4-3. VAS	15

2-5. 統計処理	15
3. 結果	15
3-1. MVC トルク	16
3-2. RFD	16
3-3. VAS	16
4. 結論	17

## V章 野球の投手における投球数増加に伴う膝関節伸展筋群の

筋機能の経時的変化(本実験)	18
1. 目的	18
2. 方法	18
2-1. 被検者	18
2-2. 実験プロトコル	19
2-3. 投球課題	19
2-4. 測定項目	20
2-4-1. MVC トルク	20
2-4-2. RFD	20
2-4-3. VAS	21
2-5. 統計処理	21
3. 結果	21
3-1. 基本特性	21

3-2. 投球速度	22
3-3. MVC トルク	22
3-4. RFD	22
3-5. VAS	23
3-6. 相関	23
4. 考察	23
<b>VI章 結論</b>	<b>28</b>
謝辞	29
参考文献	30
図表	36

## I 章 緒 言

野球の投手において、投球数増加によって投球速度は低下することが知られている (Birfer, et al., 2019). 一般的にはこれまで投手が試合を通して投球速度を維持するためのスタミナトレーニングとして、短い距離のダッシュを繰り返すトレーニングや、長距離を走るトレーニングなどの持久力向上を目的としたトレーニングが行われてきた (後藤ら, 2000). しかし、後藤らは試合を模した反復投球において測定された 1 イニング目と比較した 9 イニング目における投球速度の低下率と、全身持久力の指標である体重あたりの最大酸素摂取量との間に有意な相関がないことを報告している. したがって、実際の現場において広く普及している持久力向上トレーニングは投手のスタミナトレーニングとして有効でない可能性がある.

投球数増加に伴う投球速度の低下の要因について、バイオメカニクスの視点から検討した研究が多く報告されている. 例えば、Murray, et al. (2001) は実際の試合における投球動作の変容を検討した結果、投球時に踏み込む側の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おいてより屈曲位となることを示した. 著者らは投球中の動作の変化について下肢の筋機能低下に起因している可能性があるとして述べているが、投球動作の反復によって下肢に筋機能低下が誘起されているかは現在のところ明らかではない. 投手の投球数増加に伴う投球速度の低下の要因について明らかにされていないことから、現在行われている投手のスタミナトレーニングは科学的根拠に基づいて行われているものではないと言える. そこで本研究では、生理学的視点から下肢の筋機能に着目し、野球の投手における投球数の増加に伴う投球速度の低下の要因を明らかにすることを目的とした. 本研究は野球投

手のスタミナトレーニングについて、一石を投じる可能性がある。



## II章 文献研究

### 1. 収縮様式により異なる張力の回復過程

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。伸張性収縮(eccentric contraction; ECC)は骨格筋が引き伸ばされながら力を発揮する収縮様式である。一方、短縮性収縮(concentric contraction; CON)は骨格筋が縮みながら力を発揮する収縮様式である。ECCの特徴として、ECCによって低下した張力の回復は遅延することが多くの研究によって示されている。例えば、Brown, et al. (1997)は膝関節伸展筋群を対象として50回の最大ECC後の等尺性最大随意性収縮(maximal voluntary contraction; MVC)トルクの経時的変化を検討した結果、疲労課題前と比較して疲労課題直後から72時間後まで低下したままであることを示した。またJanecki, et al. (2016)は肘関節屈曲筋群を対象として75%のMVCトルクを生み出すダンベルの重量を用いて30回のECCを実施した後のMVCトルクの経時的変化を検討した結果、疲労課題前と比較して疲労課題直後から48時間後まで有意に低下したままであることを示した。一方、Dundon, et al. (2008)は肘関節屈筋群を対象に1セット10回のCONおよびECCを用いてMVCトルクが30%低下するまで実施し、MVCトルクの経時的変化を検討した結果、CON後では疲労課題直後においてのみMVCトルクの低下が観察された一方で、ECC後では疲労課題直後から疲労課題後24時間後においても低下したままであった。また、Souron, et al. (2018)はCONおよびECCによってMVCトルクを40%低下させ

て回復過程を検討した結果、MVCトルクは CON を行った群では 1 時間後まで低下していた一方で、ECC を行った群では 96 時間後においても低下したままであった。このように、運動の種類により張力の回復の程度は異なるようであるが、ECC に伴い張力の回復は長期化することは明らかである。一方、スポーツ活動において頻繁に観察される減速動作や反動動作時には ECC による力発揮を用いることが知られている。重要なことに、いくつかの先行研究では減速動作を反復した後に著しい張力の低下が生じ、また張力の回復に時間がかかることを報告している。Miyama and Nosaka. (2005)は最大努力で 20 回のリバウンドジャンプを 8 セット行った結果、膝関節伸展筋群の MVC トルクは運動前と比較して運動直後から 48 時間後まで有意に低下することを示した。また、Howatson and Milak(2009)は減速を伴う 30 m スプリント後の MVC トルクの回復過程を検討した結果、運動直後から 48 時間後まで有意に低下したままであることを示した。さらに、Rampinini, et al. (2011)は 90 分間のサッカーの試合後における膝関節伸展筋群の MVCトルクの経時的変化を検討した結果、1 日後においても MVCトルクは低下したままであることを示した。このように、スポーツ場面で生じる ECC は張力低下の長期化を引き起こし、結果としてパフォーマンスの低下を招く可能性が高い。

## 2. 低頻度疲労

低頻度疲労 (low frequency fatigue; LFF) とは、電気刺激を用いて刺激した高刺激頻度と比較して低刺激頻度によって誘発される張力が減少することと定義されている (Edwards, et al., 1997)。電気刺激によって誘発された張力は、与えられた刺激頻度の増加とともに増加し、ヒトの筋では 50 Hz 以上ではほぼ最大値が得られる。ヒトを対象にした先行研究では、高頻度刺激と

しては 50～80 Hz が、低頻度刺激としては 10～30 Hz が用いられてきた。ヒトが 10 秒間以上継続して筋収縮を行った場合、活動電位の発火頻度が 30 Hz を超えることは稀である。したがって、LFF は、スポーツ活動はもとより日常の生活においても運動パフォーマンスを制限する因子と言えよう(和田ら, 2012)。

LFF のメカニズムは発揮張力と細胞質遊離カルシウム濃度 ( $[Ca^{2+}]_f$ ) の関係性によって示される。筋細胞において、収縮を直接起こす細胞内小器官は筋原線維であり、筋原線維が発揮する張力は、 $[Ca^{2+}]_f$  によって調節されている。 $[Ca^{2+}]_f$  が約 0.5  $\mu M$  を超えたあたりから筋原線維の収縮が始まり、1.5  $\mu M$  付近までは濃度の増加とともに張力は急激に高まる。2  $\mu M$  を超えると張力の増加率は減少し、3  $\mu M$  以降はほぼプラトーとなる。低頻度刺激による発揮張力は、 $[Ca^{2+}]_f$  の増加とともに張力が急激に増加する領域に、一方、高頻度刺激による発揮張力は、張力の増加が緩慢になる領域にあたる。高頻度刺激による発揮張力と比べ低頻度刺激による発揮張力が大きく低下するのは、張力と $[Ca^{2+}]_f$ との関係に原因があると考えられている(和田ら, 2012)。

Westerblad, et al. (2000)は、LFF が起こる要因を 2 つに分け次のように説明している。第 1 は、筋小胞体からの  $Ca^{2+}$  放出量が減少するため、収縮時における $[Ca^{2+}]_f$  が十分高まらなくなることである。第 2 は、筋原線維の  $Ca^{2+}$  感受性が低下することである。感受性が低下すると、 $[Ca^{2+}]_f$  - 張力曲線が右方向にシフトするが、曲線の形状に起因して、この場合も低頻度刺激による張力の低下率が大きくなる。

ECC 終了後において張力が低下するメカニズムには LFF が関与することが知られている。ECC は機械的な伸張ストレスにより興奮-収縮連関不全を引き起こす。興奮-収縮連関とは、

運動神経の興奮によって放出された伝達物質を介して筋細胞膜に活動電位を引き起こし、筋小胞体から放出された  $\text{Ca}^{2+}$  が筋フィラメントを活性化して筋収縮を引き起こすといった一連の諸過程をさす(鈴木, 1995). ECC による興奮収縮連関不全では、細胞膜の損傷により、細胞質内への  $\text{Ca}^{2+}$  放出が低下した状態となるが、先述した通り、 $\text{Ca}^{2+}$  放出の低下は LFF を引き起こすため、ECC による長期的な筋機能の低下には LFF が関与していると考えられている(Janecki, et al., 2016). 事実、Janecki, et al. (2016) は肘関節屈曲筋群を対象として 75 % の MVC トルクを生み出すダンベルの重量を用いて 30 回の ECC を実施した後の MVC トルクの経時的変化を検討した結果、MVC トルクは疲労課題直後から 48 時間後まで有意に低下することを示した。また、彼らは LFF の指標であるダブル(100 Hz) / シングル刺激誘発トルク比率についても同様に 48 時間後まで有意に低下することを明らかにした。以上より、ECC 後における長期的な張力低下の主要な要因には LFF が関与していると考えられている。

### 3. 野球投手の投球動作

野球の投手における投球はワインドアップ期、前期コッキング期、後期コッキング期、加速期、およびフォロースルー期の 5 つの段階に分けられ、投球中の主要動作に基づいて定義されている。

ワインドアップ期は投球時にボールを持つ手となる脚を軸脚として、非投球側脚である踏込脚を挙上する場面である。ワインドアップ期では、踏込脚の挙上時に軸脚によって体幹を安定して支えることがその後のステップ動作をスムーズに行うために重要であると考えられている(島田ら, 2000)。

前期コッキング期はワインドアップから踏込脚を踏み出すまでの局面である。軸脚はマウンドの前方および下方へ重心を移動し、股関節と膝関節を伸展させる。高橋ら(2005)は、前期コッキング期において、投球速度の高い投手(高球速投手)は低い投手(低球速投手)と比較して、軸脚の膝関節および股関節がより大きく屈曲位となることを示しており、指導の現場においては「軸脚でタメを作る」と表現されている。高球速投手に見られる軸脚でのタメは、その後続く軸脚の伸展動作による投球方向への勢いある重心移動を可能にし、高い投球速度の獲得につながる(Kageyama, et al., 2014)。事実、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、前期コッキング期に軸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( $r^2 = 0.76$ )があることを示した。このように投手における軸脚は、前期コッキング期において股関節および膝関節の伸展にかかると、CON な力発揮によって加速させることが重要となる。

後期コッキング期とは前期コッキング後から投球腕の肩関節が最大外旋に達するまでを指す。後期コッキング期では肩関節外転角度を  $90^\circ$  まで肘を上げておくことで、その後続く加速期において体幹を回旋させた時、高い投球速度を獲得するために必要な肩関節の外旋角度を増大させることができる。一方下肢では、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につながると考えられている。この時、踏込脚で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 の力発揮によって身体を減速させる(Campbell, et al., 2010)。踏込脚の接地以降の下肢動作について Matsuo, et al. (2001)は高球速投手と低球速投手との投球動作を比較し、高球速投手は低球速投手よりも踏込脚接地時以降において踏込脚の膝関節屈曲角度が小さくより伸展位であることを示

した。著者は、低球速投手に認められた踏込脚膝関節のより大きな屈曲について、踏込脚が重心移動によって生成した力を支えきれずに「腰が沈んだ」動作であることを示唆しており、高い投球速度を生成するためには踏込脚膝関節角度の屈曲を最小限に抑え、踏込脚で体幹を支えることが重要であると考えられる。

加速期とは肩関節の最大外旋時から内旋し、ボールリリースまでを指す。加速期では後期コッキング期で獲得した大きな肩関節外旋角度から内旋動作を伴うことによって投球速度に大きく貢献すると報告されており、140 km/h 以上を投じる投手では最大  $5,000\sim 7,000^{\circ}/s$  程度にもなる(Matsuo, et al., 2001)。肩関節の内旋に続いて、肘関節の伸展および手関節の屈曲によって投球速度はさらに増加する。フォロースルー期は終末期の運動として、直接的にパフォーマンスの向上に関与しないと考えられている。メカニク的な視点より述べると、よいパフォーマンスが行われたときは、投球腕は体幹に巻き付くように減速する。試合においては、次のプレーに備えて素早く守備体勢となることが求められる。

#### 4. 野球投手における投球数増加に伴うパフォーマンスの変化

野球の投球動作において上肢の動きは非常に高速であるため、投球動作を複数イニングにわたり繰り返すことで上肢に大きな負荷が加わる(Fazarale, et al., 2012)。したがって、野球の投手においては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。このことから、投球数の増加に伴う疲労を調査した研究は、主に上肢に着目されてきた。Mullaney, et al. (2005)は実際の試合において先発した投手を対象として、投球前後における四肢の筋力を測定した結果、肩関節屈曲(15%)、内旋(12%)、内転(18%)および外転筋

力(11%)が有意に低下することを示した。また, Gandhi, et al. (2012)は高校生投手を対象として, 投球動作を反復させた後に最大随意収縮時の運動単位の動員率を示す指標である随意動員度が低下するか調査した。彼らの研究において随意動員度は肩関節外旋 MVC 時および安静時に棘下筋へ電気刺激を誘発された張力から算出した結果, 投球後において6%低下することを示した。彼らは随意動員度の低下は, 後期コッキング期における外旋角度を減少させ, フォロースルー期において肩関節の減速にかかる大きな伸張ストレスを軽減する可能性があると述べている。さらに, Murray, et al. (2001)は7人のメジャーリーグ投手の実際の試合から野球投手におけるキネマティクスの変化について検討した結果, 1イニングと比較して最終イニングにおいて肩関節最大外旋角度は9%の低下することを示した。著者はこの結果について, 肩関節へのストレスを軽減するための適応であると述べている。このように, 上肢については傷害が起こりやすい肩関節および肘関節に着目した研究が多くみられ, 筋機能が低下していることや, 投球動作中のキネマティクスに変化が生じることが示されている。

一方, いくつかの研究では体幹および下肢についても検討されている。Escamilla, et al. (2007)は, 大学生投手を対象として実験環境下におけるキネマティクスの変化を検討した。その結果, 1イニングと比較して最終イニングにおいて, 投球速度は1.2%(約1.5 km/h)低下し, また, 前期コッキング期から加速期における体幹屈曲角度が5°低下することを示した。Murray, et al. (2001)は7人のメジャーリーグ投手の実際の試合から野球投手におけるキネマティクスの変化について検討した。その結果1イニングと比較して最終イニングにおいて投球速度は5.6%(約7.2 km/h)低下し, また, ボールリリース時における踏込脚の膝関節伸展角度が8°低下することを示した。また, Erickson, et al. (2016)は投球数増加に伴うキネマティクスの

変化を検討した結果、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。さらに、Chou, et al. (2015)は高校生投手を対象として、投球数増加に伴うキネマティクスの変化を検討した結果、膝関節最大伸展位を  $0^{\circ}$  としたボールリリース時における踏込脚膝関節の屈曲角度が 5.7 %、および体幹の前傾屈曲角度が 13.1 %低下することを示した。このように、投球数の増加に伴い、投球中の下肢動作についても変化することが認められている一方で、Murray, et al. (2001)は、下肢動作の変化は、下肢の筋機能低下によるものであるか、肩関節への過度な負荷を抑制するための適応であるかは明らかでないと述べている。一方、反復投球前後の下肢筋機能を調査した研究について、Yanagisawa, et al. (2018)は大学生投手を対象として検証した結果、投球後において両側で測定された股関節内転および外転筋力が有意に低下することを示した。さらに、最初のイニングと比較した最終イニングにおける投球速度の変化率と、投球前後の等尺性の股関節内転筋力の変化率との間に有意な正の相関関係 ( $r = 0.583$ )があることを示した。しかしながら、彼らの研究における筋力測定は両側での測定であった。野球の投球においては下肢の動作は左右非対称であるため、どちらの脚において筋機能低下の程度が大きいかについては明らかではない。一方、清水・中垣(2021)は投球速度の低下率と、ダイナモメーターを用いて測定した動作速度  $180^{\circ}/s$  で 50 回の等速性股関節の屈曲・伸展総仕事量の低下率との関係性について検討した結果、伸展 ( $r = 0.12$ ) および屈曲 ( $r = 0.38$ ) の低下率ともに有意な相関がないことを示した。以上をまとめると、投球数増加に伴い下肢では踏込脚の膝関節角度の変化を報告した研究が多く、膝関節伸展に関与する筋機能の低下について検討する必要がある。



### Ⅲ章 研究の目的および課題

先行研究において、野球投手における投球数増加に伴う投球速度の低下の要因について検討した研究は少ない。また、投球動作は左右非対称であることから、下肢の筋機能低下の要因についても異なる可能性がある。そこで本研究では、投球数増加に伴い軸脚および踏込脚に誘起される筋機能低下の要因を明らかにすることを目的として、以下の研究課題を設定した。

予備実験：伸張性および短縮性収縮に伴う膝関節伸展筋群の筋機能の経時的变化

膝関節伸展筋群のECCおよびCONを用いて、それぞれ MVCトルクを同程度低下させ、筋機能を示す指標について回復過程の違いを観察し、本実験において用いる指標を選択する。

本実験：野球の投手における繰り返しの投球後における膝関節伸展筋群の筋機能の経時的变化

試合を模した投球を行い、下肢筋機能の変化を経時的にたどることで、野球投手の下肢における筋機能低下の要因について検討する。

## IV章 伸張性および短縮性収縮に伴う膝関節伸展筋群の筋機能の経時的変化

### (予備実験)

#### 1. 目的

予備実験では、膝関節伸展筋群の ECC および CON を実施し、筋機能を示す指標の経時的変化を観察することで、本実験において用いる指標を選択することを目的とした。

#### 2. 方法

##### 2-1. 被検者

被験者は傷害歴のない成人男性 10 名 (年齢:  $23 \pm 2.5$  歳, 身長:  $172.8 \pm 6.1$  cm, 体重:  $73.1 \pm 8.5$  kg) および成人女性 10 名 (年齢:  $23 \pm 1.3$  歳, 身長:  $159.6 \pm 5.3$  cm, 体重:  $57.3 \pm 8.6$  kg) であった。被験者は最低 6 ヶ月以上大腿四頭筋のレジスタンストレーニングを行っていないことを条件とした。また、被験者には、実験期間中に激しい運動やアルコールの摂取を控えるように指示した (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。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: 20-15)。

##### 2-2. 実験プロトコル

本実験は膝関節伸展筋群を対象として、ECC および CON をそれぞれ疲労課題直後の MVC トルクが 40 % を下回るまで実施し、疲労課題直後から 72 時間後までの筋機能の変化を観察した。男性および女性はそれぞれ、ECC によって MVC トルクを低下させる ECC 群と CON

によって MVC トルクを低下させる CON 群の 2 群に振り分けられた。また、各被験者の収縮を行う脚はランダムに選択された。実験は 4 日間にわたって実施した。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 MVC トルクおよび力の立ち上がり率 (rate of force development; RFD) であった。また、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 (visual analog scale; VAS) を用いた。膝関節伸展筋群の筋機能および VAS の測定後、等速性運動装置を用いて疲労課題を実施した。疲労課題を実施した後、再び膝関節伸展筋群の筋機能および VAS の測定を行った。疲労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、1 時間後、24 時間後、48 時間後および 72 時間後に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。

### 2-3. 疲労課題

疲労課題は Souron, et al. (2018) の先行研究に基づき、膝関節伸展筋群の ECC および CON をそれぞれ疲労課題直後の MVC トルクが 40 % を下回るまで実施した。ECC および CON は等速性運動装置 (Biodex system 4) を用いて実施した。動作範囲は 20-110° (膝関節最大伸展位 = 0°), 動作速度は 60° /s であった。各被験者は初めに 50 回の等速性 ECC または CON を行い、その直後に MVC トルクを測定した。MVC トルク測定時の膝関節の角度は 90° であった。MVC トルクが 40 % 以上低下していない場合は更に 25 回の収縮を続け、再度 MVC トルクの測定を行った。MVC トルクが 40 % 以上低下していない場合は更に 25 回の収縮を続

け、最終的に MVC トルクが 40 %以上低下するまで収縮を繰り返した。

## 2-4. 測定項目

### 2-4-1. MVC トルク

MVC トルクは、両脚の膝関節伸展筋群において測定した。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 トルクの測定を 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力発揮するように指示した。また、力発揮の際には被検者を声援によって励ました。なお、1 回目の MVC トルクと 2 回目の MVC トルクの測定は、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張力は、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。ソフトウェア上に表示されるデジタルデータはカットオフ周波数 12 Hz のデジタルフィルターをかけた。張力と、大腿骨外側外顆から足部固定部の中心までの距離の積からトルク値を算出し、最大値を後の分析に供した。

### 2-4-2. RFD

最大値を記録した MVC トルクから、RFD の算出を行った。筋における RFD は力-時間曲線における傾き( $\Delta$  力/ $\Delta$  時間)として算出され、スポーツに必要な筋の爆発的な力発揮を評価する指標として用いられている(Aagaard, et al., 2002)。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 の区間における平均勾配(それぞれ RFD peak, RFD

0-50 ms, RFD 0-100 ms, RFD 0-200 ms および RFD 100-200 ms)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における傾きとした。RFD 100-200 ms について, Peñailillo, et al.(2015)は様々な時間区間におけるRFDの中でも 100-200 ms が CON 直後では低下せず, ECC 後では直後から数日間にわたり低下することから, 筋機能低下の要因を運動直後から特定できる可能性が示されていることから算出することとした。

### 2-4-3. 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。

### 2-5. 統計処理

すべての結果は, 平均  $\pm$  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。MVCトルク, RFD および VAS の経時的变化を検討するために反復測定分散分析を用いた。MVCトルクおよび RFD は疲労課題前の測定値を 100 %とした時の変化率を各時点において算出した後に分析に供した。反復測定分散分析によって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。なお, 有意水準は 5%未満とした。

## 3. 結果

### 3-1. MVC トルク

MVC トルクの経時的変化は、図 1 の通りであった。MVC トルクについて反復測定分散分析を行った結果、CON 群および ECC 群ともに有意な主効果が認められた。そこで、多重比較検定を行った結果、ECC 群では疲労課題直後から 48 時間後までの時点において、CON 群では疲労課題直後において疲労課題前と比較して有意に低値であった ( $P < 0.05$ )。

### 3-2. RFD

RFD の経時的変化は、表 1 の通りであった。反復測定分散分析を行った結果、ECC 群では RFD の全ての項目において時間による主効果が認められた ( $P < 0.05$ )。多重比較検定の結果、RFD peak は疲労課題直後から 48 時間後の時点で ( $P < 0.05$ )、RFD 0-50 ms は疲労課題直後から 24 時間後の時点で ( $P < 0.05$ )、RFD 0-100 ms は疲労課題直後から 48 時間後の時点で ( $P < 0.05$ )、RFD 0-200 ms は疲労課題直後から 48 時間後の時点で ( $P < 0.05$ )、RFD 100-200 ms は疲労課題直後から 48 時間後の時点で、疲労課題前の値と比較して有意に低値であった ( $P < 0.05$ )。一方、CON では RFD の全ての項目について有意な主効果は認められなかった。

### 3-3. VAS

VAS の経時的変化は、表 2 の通りであった。反復測定分散分析の結果、ECC 群では有意な時間による主効果が認められた ( $P < 0.05$ )。多重比較検定の結果、24 時間後および 48 時間後の時点において疲労課題前と比較して有意に高値であった ( $P < 0.05$ )。一方、CON 群では有意な主効果は認められなかった。

#### 4. 結論

予備実験より, ECC に伴い MVC トルクは長期的に低下し, また VAS は増加し, 先行研究と同様な傾向を再現できたため, 本実験で用いることとした. また, RFD 100-200 ms についても先行研究 (Peñailillo, et al., 2015) と同様に ECC 後において長期的に低下することが示された. ただし, 予備実験では「素早く」力発揮するように指示をしていなかったため, 本実験では「合図と同時に最大努力で素早く」力発揮するように指示をすることとした.

## V章 野球の投手における投球数増加に伴う膝関節伸展筋群の筋機能の経時的変化

### (本実験)

#### 1. 目的

本実験では、大学生男子野球選手を対象に最大努力での投球を行わせ、投球後の下肢筋機能の経時的変化を検討することで、軸脚および踏込脚に生じる筋機能低下の要因を明らかにすることを目的とした。投球後の筋機能低下について詳細に検討することによって、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伸筋群の筋機能が長期的に低下するという仮説を立てた。

#### 2. 方法

##### 2-1. 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:  $21.2 \pm 1.1$  歳, 身長:  $176.3 \pm 5.6$  cm, 体重:  $73.2 \pm 4.1$  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 部リーグに所属するチームであり, 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, 被験者には, 実験期間中に激しい運動やアルコールの摂取を控えるように指示した(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)。



## 2-2. 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、MVC トルクおよび RFD であり、主観的筋痛の程度の測定には 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。

## 2-3. 投球課題

被検者は十分なウォームアップをした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、マウンドから 18.44 m 離れた捕手に最大努力で投球させた。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、イニングごとの平均投球速度の算出および、投球課題中の投球速度のフィードバックに用いた。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。15 球を投球させるプロトコルを 1 イニングとし、9 イニング、計 135 球の投球を行わせた。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。

## 2-4. 測定項目

### 2-4-1. MVCトルク

MVC トルクは、両脚の膝関節伸展筋群において測定した。被検者は椅子に座り、膝関節を  $90^\circ$  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、被験者はグリップを持ち、収縮時間は約 3 秒の、MVC を 2 回行った。MVC の測定から最大値および RFD を観察するために、被験者には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。また、力発揮の際には被検者を声援によって励ました。なお、1 回目の MVC トルクと 2 回目の MVC トルクの測定は、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張力は、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。ソフトウェア上に表示されるデジタルデータはカットオフ周波数 12 Hz のデジタルフィルターをかけた。張力と、大腿骨外側外顆から足部固定部の中心までの距離の積からトルク値を算出し、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、ボールを持つ手と反対側の脚を踏込脚とした。

### 2-4-2. RFD

最大値を記録した MVC トルクから、RFD の算出を行った。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、RFD peak, RFD 0-50 ms, RFD 0-100 ms, RFD 0-200 ms および RFD 100-200 ms を算出した。なお、RFD peak 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における傾きとした。

### 2-4-3. 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。

### 2-5. 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。投球速度は 1 イニングの値を 100 %とした時の 2 イニングから 9 イニングにおける変化率を算出した。膝関節伸展筋群の筋機能は投球前の値を 100%としたときの直後から 48 時間後までの変化率を算出した。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 イニングにおける投球速度の変化率と、投球課題前後における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。

## 3. 結果

### 3-1. 基本特性

被験者の投球課題前における各変数の測定値は、表 3 の通りであった。

### 3-2. 投球速度

1 イニングを 100 %とした 2 イニングから 9 イニングまでの投球速度は, 図 2 の通りであった. 投球速度について反復測定分散分析を行った結果, イニングにおいて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, 6 イニング, 7 イニングおよび 9 イニングが 1 イニングと比較して有意な低値を示した( $P < 0.05$ ). 1 イニング目の平均投球速度は  $124.6 \pm 6.9$  km/h であり, 有意な低下が認められた 4, 6, 7, 9 イニングにおける平均球速はそれぞれ  $121.2 \pm 7.6$  km/h,  $119.6 \pm 6.8$  km/h,  $118.9 \pm 6.0$  km/h,  $120.0 \pm 6.4$  km/h であった.

### 3-3. MVCトルク

MVCトルクの経時的変化は, 図 3 の通りであった. MVCトルクについて反復測定分散分析を行った結果, 踏込脚では時間において有意な主効果が認められた. そこで, 多重比較検定を行った結果, 投球直後, 24 時間後および 48 時間後が, 投球前と比較して有意な低値を示した( $P < 0.05$ ). 軸脚においても有意な主効果が認められたため多重比較検定を行った結果, 投球直後のみ投球前と比較して有意な低値を示した( $P < 0.05$ ).

### 3-4. RFD

RFD の経時的変化は, 表 4 の通りであった. 反復測定分散分析を行った結果, 踏込脚においては RFD peak, RFD 0-50 ms, RFD 0-100 ms, RFD 0-200 ms に有意な主効果が認められた. また, 軸脚においては RFD 0-100 ms, RFD 0-200 ms に有意な主効果が認められた. そこで, 多重比較検定を行った結果, 踏込脚では RFD peak, 軸脚では RFD 0-200 ms が投球直後において, 投球前と比較して有意な低値を示した( $P < 0.05$ ).

### 3-5. VAS

VAS の経時的変化は、表 5 の通りであった。VAS については、踏込脚、軸脚ともに有意な差異は認められなかった。

### 3-6. 相関

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 イニングにおける投球速度の変化率と、投球課題前後における膝関節伸展筋群の筋機能の変化率について相関係数を検討した。分析の結果、有意な相関関係は認められなかった(表 6)。

## 4. 考察

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 トルクは 1 日後には回復するが、踏込脚の膝関節伸展筋群の MVC トルクは 2 日後まで低下したままであったことが挙げられる。

MVC トルクの長期的な低下は激しい ECC を繰り返すことによって認められ、スポーツ活動においては急激な減速や方向転換などを伴う動作時に ECC を伴うことが知られている。例えば Howatson and Milak. (2009) は、減速を伴う 30 m スプリント後の MVC トルクの回復過程を検討した結果、48 時間後まで MVC トルクが有意に低下したままであったと報告している。ECC によって張力が長期的に低下するメカニズムには LFF が関与すると考えられている。LFF とは電気刺激を用いて刺激した高刺激頻度と比較して低刺激頻度によって誘発される力が減少することを指し、筋小胞体からの  $\text{Ca}^{2+}$  放出量の減少および筋原線維の  $\text{Ca}^{2+}$  感受性の低下が要因と

して挙げられる(Westerblad, et al., 2000). 激しい ECC を行うことで, 骨格筋への機械的な伸長ストレスによって, 興奮-収縮連関の機能不全を引き起こす. さらに興奮-収縮連関の機能不全は細胞質内への  $Ca^{2+}$  放出を低下させ, 結果として LFF が誘発されると考えられている(Janecki, et al., 2016). 野球の投手において踏込脚は, 接地後にブレーキ力を生成して動きを減速させるアンカーとして機能し, その結果, 胴体の前方への慣性力を生み出すことで高い投球速度の発生に繋がると考えられている(MacWilliams, et al., 1998). 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, 後期コッキング期以降において伸張性の力発揮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トルクの長期的な低下は, 投球動作の反復によって LFF が生じた可能性が考えられる.

踏込脚において MVCトルクが 1 日後以降においても有意に低下したにも関わらず, RFD 100-200 ms および VAS の有意な変化は認められなかった. 先行研究において, RFD 100-200 ms は CON 直後では低下せず, ECC 後では直後から数日間にわたり低下することから, 運動直後から筋機能低下が ECC に起因しているかを知ることができる可能性が示されている(Peñailillo, et al., 2015). しかしながら, Peñailillo, et al. (2015) による先行研究の他には, ECC 運動後の RFD 100-200 ms の経時的変化を調査した研究は存在しない. したがって, 運動タイプや負荷, 被験者のトレーニング歴によって RFD 100-200 ms の変化に違いが観察される可能性があり, さらに知見を蓄積していく必要があると考えられる. また, VAS についても有意な変化は認められなかった. 遅発性筋痛 (delayed onset muscle soreness; DOMS) は ECC 後によく認められる一方で, 運動誘発性筋損傷やそれに伴う炎症よりも, 炎症抑制に関連して

いる可能性が高いと考えられている (Jonathan, et al., 2017). したがって, DOMS に伴う VAS の増加は MVC トルクと異なる経時的変化をたどり, また運動誘発性筋損傷の程度とは一致しない. 本研究では, VAS の有意な変化が認められなかった要因について特定することは不可能であるが, 野球投手のコンディショニングにあたる指導者は, 主観的な評価 (VAS の変化) と客観的な評価 (MVC トルクの変化) にズレが生じる可能性を十分に考慮する必要がある.

一方軸脚でも, MVC トルクは投球直後において有意な低下が認められた. また RFD の 0-100 ms および 0-200 ms 区間においても同様に, 投球直後においてのみ低下することが示された. 野球投手の軸脚において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重要となる (Kageyama, et al., 2014). また, 軸脚による体重あたりの最大床反力と, 投球速度と密接に関連するボールリリース時の手関節速度との間に有意な正の相関関係 ( $r^2 = 0.76$ ) があることが知られている (MacWilliams, et al., 1998). したがって, 投球課題を通して高い投球速度を維持するために, 膝関節では伸展筋群の力強い伸展動作が繰り返されていた可能性があり, 運動直後において軸脚の MVC トルクの低下が認められたと考えられる. 一方, 軸脚で直後に認められた MVC トルクおよび RFD は 1 日後には回復しており, 踏込脚で観察された MVC トルクの経時的変化とは異なる傾向を示した. 軸脚における筋機能の経時的変化は CON 後に認められる筋機能の経時的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 後に MVC トルクを 40 % 低下させた場合においても, 24 時間後には MVC トルクは疲労課題前の値まで回復することを報告している. また Peñailillo, et al. (2015) は CON サイクリングを行い 0-100 ms および 0-200 ms 区間における RFD の経時的変化を検討した結果, 同様に 1 日後には運動前の値ま

で回復することを報告している。軸脚は踏込脚の働きとは異なり激しい減速動作は行われな  
ため激しい ECC は伴わず、したがって、CON によって一時的に筋機能が低下したと考えられ  
る。

投球直後に両側共に膝関節伸展筋群の MVC トルクに低下が認められた一方で、投球速  
度の低下率との間に有意な相関は認められなかった。その要因として、投球課題を行う際に被  
験者の努力度を十分に高めることができなかったことが挙げられる。本研究の投球課題につい  
ては、全力で投球するよう十分に説明を行ったうえで実施した。また、先行研究を基に 1 イン  
グの投球数を 15 球、インング間の休息時間を 6 分と一定とした。しかしながら、実際の試合で  
は 1 インングに 30 球以上投げることもあり、またインング毎の投球数やインング間の休息時間  
も異なる。さらに、実際の試合における投球では投手の興奮性やモチベーションが高まるため  
(Escamilla, et al., 2007)、実験環境下での投球に比べて投球数が増すにつれて投球速度が  
著しく低下すると考えられる。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、初めのインングと比較して最終インングで投球速度が 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。  
したがって、投球速度の低下が十分でなかったことが、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要因だと推察される。

本研究の結果より、踏込脚では投球動作の反復によって長期的に MVC トルクが低下するこ  
とが示された。学生レベルにおける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、  
いち早く下肢筋機能を回復させるための対策を講じる必要がある。興味深いことに、事前の  
ECC がその後の ECC による骨格筋の運動誘発性筋損傷に対して保護的な適応を示すことが



知られている (Nosaka and Clarkson, 1995). 例えば, Souron, et al. (2018)の研究では, MVC トルクを ECC によって 40 %低下させた後の MVCトルクの回復過程を検討しており, 1 度目の ECC 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 を用いて 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. 野球の投手の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おける投球翌日以降の筋機能低下を低減できる可能性がある.

## VI章 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時間後および48時間後に膝関節伸展筋群のMVCトルク、RFDおよびVASを測定し、以下の結果を得た。

1. 合計135球のストレートを最大努力で投げさせた結果、1イニング目と比較して9イニング目において4.6 km/hの球速低下が観察された( $P < 0.05$ )。
2. 投球前と比較すると、MVCトルクは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48時間後までの時点において有意な低値を示した( $P < 0.05$ )。
3. 1イニングと比較した9イニング目における投球速度の低下率と、投球前と比較した投球直後における筋機能の変化率との間に有意な相関関係は認められなかった。

以上の結果より、踏込脚では投球動作の反復によって膝関節伸展筋群に低頻度疲労が誘起されている可能性があることが示された。

## 謝 辞

本稿を終えるにあたり、懇切丁寧なご指導とご助言を頂きました、大阪体育大学大学院スポーツ科学研究科 三島 隆章教授に深甚なる謝意を表します。また、論文作成に際してご校閲ならびにご助言いただきました大阪体育大学大学院スポーツ科学研究科梅林 薫教授、下河内 洋平教授に心から感謝いたします。最後に、この研究を進めるにあたり、被験者としてご協力いただいた方々、実験のお手伝いをいただいた三島研究室の皆様感謝の意を表します。

## 参考文献

1. 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.
2. Allen, D. G., Lamb, G. D. and Westerblad, H. (2008) Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiol Rev*, 88(1): 287-332.
3. Birfer, R., Michael, W. L. Sonne. and Michael, W. R. Holmes. (2019) Manifestations of muscle fatigue in baseball pitchers: a systematic review. *PeerJ*, 7, e7390.
4. Brown, S. J., Child, R. B., Day, S. H. and Donnelly, A. E. (1997) Indices of skeletal muscle damage and connective tissue breakdown following eccentric muscle contractions. *Eur J Appl Physiol*, 75: 369-374.
5. 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.
6. Chapman, D., Newton, M., Sacco, P. and Nosaka, K. (2006) Greater Muscle Damage Induced by Fast Versus Slow Velocity Eccentric Exercise. *Int J Sports Med*, 27: 591-598.
7. Chou, P. P-H., Huang, Y-P., Gu, Y-H., Liu, C., Chen, S-K., Hsu, K-C., Wang, R-T., Huang, M-J. and Lin, H-T. (2015) Change in pitching biomechanics in the late-inning in Taiwanese high school baseball pitchers. *J Strength Cond Res*, 29(6): 1500–1508.
8. 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.
9. Dundon, J. M., Cirillo, J. and Semmler, J. G. (2008) Low-frequency fatigue and neuromuscular performance after exercise-induced damage to elbow flexor muscles. *J Appl Physiol*, 105: 1146-1155.
  10. Edwards, R. H. T., Hill, D. K., Jones, D. A. and Merton, P. A. (1977) Fatigue of long duration in human skeletal muscle after exercise. *J Physiol*, 272: 769-778.
  11. Erickson, B. J., Sgori, T., Chalmers, P. N., Vignona, P., Lesniak, M., Bush-Joseph, C. A., Verma, N. N. and Romeo, A. A. (2016) The impact of fatigue on baseball pitching mechanics in adolescent male pitchers. *Arthroscopy*, 32 (5): 762–771.
  12. Escamilla, R. F., Barrentine, S. W., Fleisig, G. S., Zheng, H., Takada, Y., Kingsley, D. and 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.
  13. Fazarale, J. J., Magnussen, R. A., Pedroza, A. D. and Kaeding, C. C. (2012) Knowledge of compliance with pitch count recommendations: a survey of youth baseball coaches. *Sports Health*, 4(3): 202–204.
  14. 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.
  15. Gandhi, J., ElAttrache, N. S., Kenton, R. K. and Wendy, J. H. (2012) Voluntary activation deficits of the infraspinatus present as a consequence of pitching-induced fatigue.

Shoulder Elbow Surg, 21: 625–630.

16. 後藤実, 谷口有子, 山本正嘉, 百武憲一, 岩井美樹, 成澤三雄 (2000) 野球投手におけるボールスピードの低下と筋力, 全身持久力との関係. トレーニング科学 12(2): 103-110.
17. Howatson, G., and Milak, A. (2009) Exercise-induced muscle damage following a bout of sport specific repeated sprints. J Strength Cond Res, 23(8): 2419-2424.
18. 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.
19. Jamurtas, A. Z., Theocharis, V., Tofas, T., Tsiokanos, A., Yfanti, C., Paschalis, V., Koutedakis, Y. and Nosaka, K. (2005) Comparison between leg and arm eccentric exercise of the same relative intensity on indices of muscle damage. Eur J Appl Physiol, 95: 179-185.
20. Janecki, D., Jaskólska, A., Marusiak, J. and Jaskólski, A. (2016) Low-Frequency Fatigue Assessed As Double to Single Twitch Ratio after Two Bouts of Eccentric Exercise of the Elbow Flexors. J. of Sports Sci and Med. 15: 697-703.
21. 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.
22. 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 (4): 742-750.

23. 川村卓, 島田一志, 平野裕一 (2012) 時速 150 km を投げる投手の特徴について(特集 野球の投・打動作の分析: 2010 世界大学野球選手権大会における試み). *バイオメカニクス研究: 日本バイオメカニクス学会機関誌*, 16(1): 32-40.
24. MacWilliams, B. A., Choi, T., Perezous, M. K., Chao, E. Y. and McFarland, E. G. (1998) Characteristic ground-reaction forces in baseball pitching. *Am J Sports Med*, 26 (1) :66-71.
25. 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. *Journal of Applied Biomechanics*, 17: 1-13.
26. Miyama, M. and Nosaka, K. (2004) Muscle Damage and Soreness Following Repeated Bouts of Consecutive Drop Jumps. *Adv. Exerc Sports Physiol.*, 10(3): 63-69.
27. Murray, T. A., Cook, T. D., Werner, S. L., Schlegel, T. F. and Hawkins, R. J. (2001) The effects of extended play on professional baseball pitchers. *Am J Sports Med*, 29 (2): 137–142.
28. Nosaka K. & Clarkson P. M. (1995) Muscle damage following repeated bouts of high force eccentric exercise. *Med Sic Sports Exerc*, 27: 1263–1269.
29. Peake, J. M., Neubauer, O., Della Gatta, P. A. & Nosaka, K. (2017) Muscle damage and inflammation during recovery from exercise. *J Appl Physiol*, 122 (3): 559– 570.
30. 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.
31. Raastad, T., Owe, S. G., Paulsen, G., Enns, D., Overgaard, K., Cramer, 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.
32. Rampinini, E., Bosio, A., Ferraresi, I., Petruolo, A., Morelli, A. and Sassi, A. (2011) Match-related fatigue in soccer players. *Med Sci Sports Exerc*, 43(11): 2161-70.
33. 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(1): 47-60.
34. 清水千寛, 中垣浩平(2021) 野球投手の下肢筋持久力を評価する簡便なフィールドテストの有用性. *体育学研究*, 早期公開, 1-22.
35. Souron, R., Nosaka, K. and 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.
36. 鈴木季直(1995) 骨格筋の興奮収縮連関. *電子顕微鏡*, 30(1): 74-78
37. 高橋佳三, 阿江通良, 藤井範久, 島田一志, 川村卓, 小池関也(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. *Jpn Biomechanics Sports Exerc*, 9(2): 36-52.
38. 和田正信, 山田崇史, 松永智(2012) 低頻度疲労の特徴とメカニズム—骨格筋における変化—. *体力科学*, 61(3): 297-306.
39. Westerblad, H., Bruton, J. D., Allen, D. G. and Lännergren, J. (2000) Functional



significance of  $\text{Ca}^{2+}$  in long-lasting fatigue of skeletal muscle. *Eur J Appl Physiol*, 83: 166-174.

40. Yanagisawa, O. and 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.

41. Yang, J., Mann, B. J., Guettler, J. H., Dugas, J. R., Irrgang, J. J., Fleisig, G. S. and 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.

図 表

表1 疲労課題前のRFDを100%とした時の疲労課題直後-72時間後におけるRFDの変化率

ECC

	疲労課題前	疲労課題直後	1時間後	24時間後	48時間後	72時間後
RFD peak (%)	100	63.0 ± 15.2*	72.4 ± 16.9*	70.9 ± 11.2*	73.5 ± 18.6*	82.0 ± 22.6
RFD 0-50 (%)	100	66.7 ± 13.1*	73.4 ± 24.9*	75.2 ± 14.9*	79.6 ± 23.0	89.1 ± 33.5
RFD 0-100 (%)	100	67.8 ± 12.7*	74.8 ± 9.6*	74.7 ± 10.6*	70.6 ± 15.2*	83.3 ± 24.6
RFD 0-200 (%)	100	62.7 ± 13.0*	71.3 ± 8.2*	67.9 ± 8.6*	66.9 ± 18.6*	78.9 ± 21.9
RFD 100-200	100	56.4 ± 12.8*	62.8 ± 11.0*	56.2 ± 12.4*	62.2 ± 28.6*	75.0 ± 24.1

平均 ± 標準偏差

CON

	疲労課題前	疲労課題直後	1時間後	24時間後	48時間後	72時間後
RFD peak (%)	100	105.8 ± 64.2	102.3 ± 36.8	116.1 ± 66.0	114.2 ± 38.7	132.1 ± 96.4
RFD 0-50 (%)	100	134.3 ± 157.5	117.7 ± 80.2	141.4 ± 150.5	119.0 ± 60.4	177.1 ± 234.0
RFD 0-100 (%)	100	137.3 ± 152.4	118.4 ± 96.0	123.6 ± 112.8	111.4 ± 61.0	155.3 ± 188.1
RFD 0-200 (%)	100	116.4 ± 86.0	114.3 ± 82.6	108.4 ± 55.6	107.5 ± 40.2	116.5 ± 79.5
RFD 100-200 (%)	100	108.5 ± 76.3	107.4 ± 74.9	103.8 ± 46.9	101.5 ± 28.1	94.0 ± 22.5

平均 ± 標準偏差

ECC: eccentric contraction, CON: concentric contraction, RFD: rate of force development.

\*:  $P < 0.05$  vs. 疲労課題前.

表2 VAS を用いた主観的筋痛の程度の経時的変化

	疲労課題前	疲労課題直後	1時間後	24時間後	48時間後	72時間後
ECC						
VAS(cm)	0.3 ± 0.9	2.3 ± 2.5	2.8 ± 2.1	3.6 ± 1.9*	4.1 ± 2.6*	2.4 ± 2.4
CON						
VAS(cm)	0.1 ± 0.1	0.7 ± 1.0	0.6 ± 0.9	0.0 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.1 ± 0.2

平均 ± 標準偏差

ECC : eccentric contraction , CON : concentric contraction, VAS : visual analog scale. \* :  $P < 0.05$  vs. 疲労課題前.

表3 被験者の基本特性

測定項目	測定結果
投球速度(km/h)	124.6 ± 6.9
踏込脚	
MVCトルク (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
軸脚	
MVCトルク (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
平均 ± 標準偏差	

MVC : maximal voluntary contraction.

RFD : rate of force development.

表4 投球前のRFDを100%とした時の投球直後-48時間後におけるRFDの変化率

<b>踏込脚</b>				
	投球前	投球直後	24 時間後	48 時間後
RFD peak (%)	100	75.6 ± 17.4 *	84.7 ± 26.9	93.5 ± 16.7
RFD 0-50 (%)	100	75.2 ± 16.2	95.1 ± 18.6	93.4 ± 15.9
RFD 0-100 (%)	100	80.6 ± 14.5	86.1 ± 10.0	93.0 ± 9.6
RFD 0-200 (%)	100	84.7 ± 13.8	85.4 ± 9.7	90.1 ± 9.4
RFD 100-200 (%)	100	99.6 ± 40.0	101.4 ± 44.6	99.9 ± 49.4
				平均±標準偏差

<b>軸脚</b>				
	投球前	投球直後	24 時間後	48 時間後
RFD peak (%)	100	86.3 ± 8.0	97.5 ± 11.9	101.29 ± 26.8
RFD 0-50 (%)	100	87.3 ± 10.9	93.7 ± 15.4	101.7 ± 27.8
RFD 0-100 (%)	100	88.7 ± 6.7	88.3 ± 8.8	89.8 ± 9.9
RFD 0-200 (%)	100	87.8 ± 2.1 *	89.3 ± 6.9	91.9 ± 10.2
RFD 100-200 (%)	100	86.6 ± 10.9	90.5 ± 11.3	96.2 ± 14.5
				平均±標準偏差

RFD : rate of force development. \* :  $P < 0.05$  vs. 投球前.

表5 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
踏込脚 (cm)				
VAS	0.5 ± 1.1	1.4 ± 1.9	1.1 ± 1.5	0.2 ± 0.3
軸脚 (cm)				
VAS	0.7 ± 1.5	1.8 ± 2.3	1.1 ± 1.0	0.2 ± 0.3

平均 ± 標準偏差

VAS : visual analog scale.

表6 投球前に対する運動直後における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	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	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.

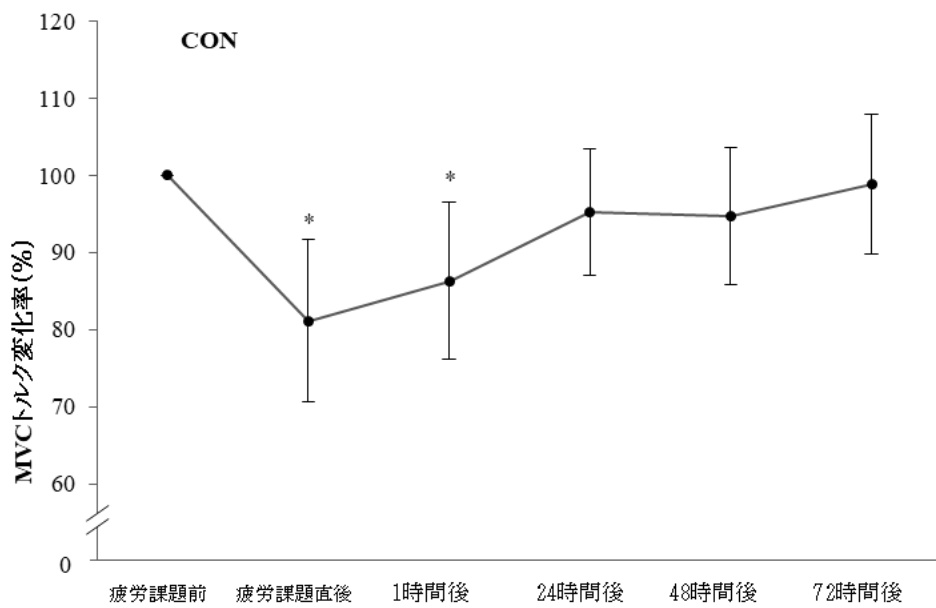
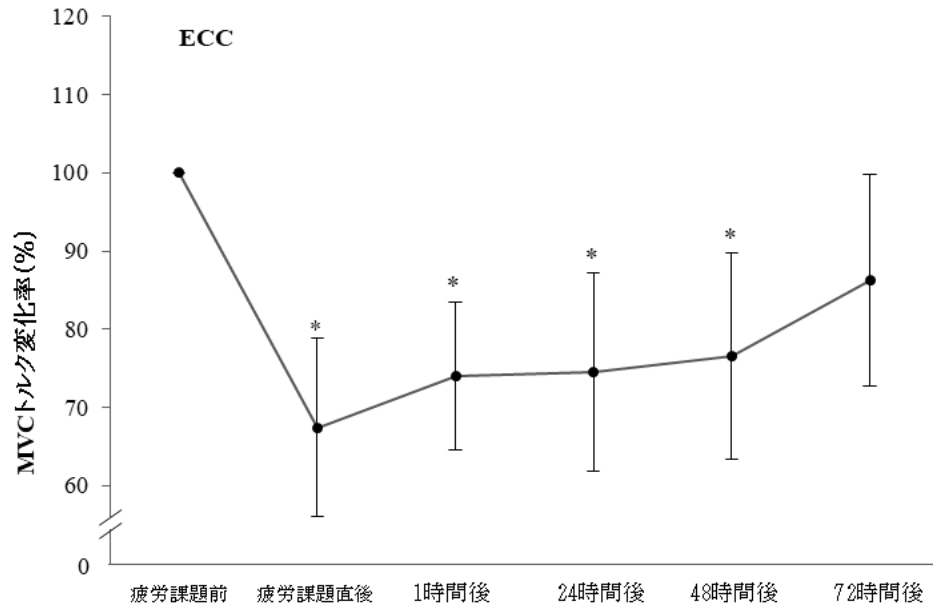


図1 疲労課題前のMVCトルクを100%とした時の疲労課題直後-72時間後におけるMVCトルクの変化率。

平均±標準偏差. MVC: maximal voluntary contraction. ECC: eccentric contraction. CON: concentric contraction. \*:  $P < 0.05$  vs. 疲労課題前.



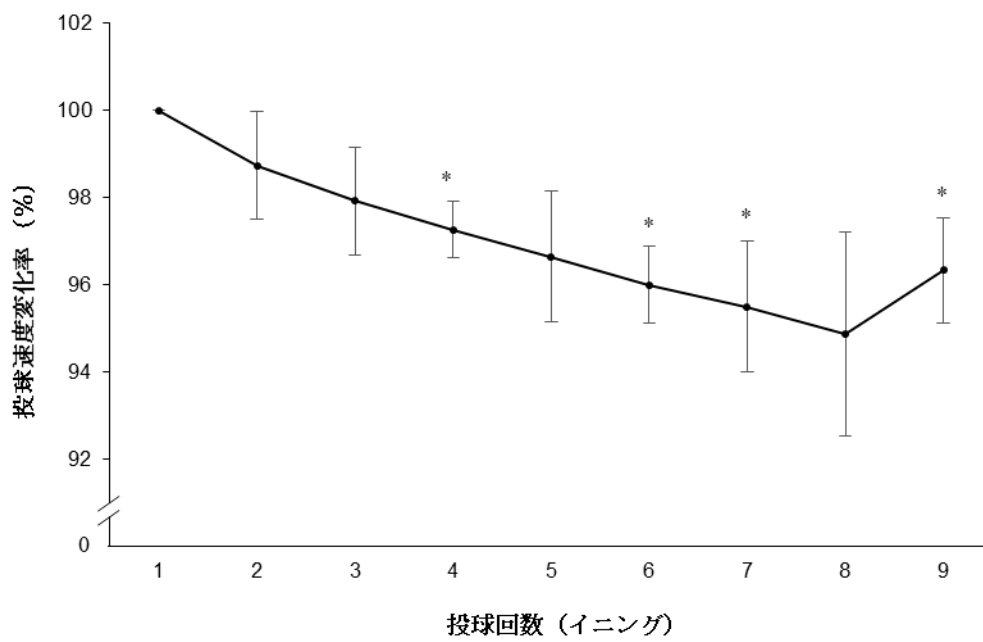


図2 1 イニング目の平均投球速度を100%とした時の2-9 イニングにおける投球速度の変化率. 平均±標準偏差. \*:  $P < 0.05$  vs. 1 イニング.

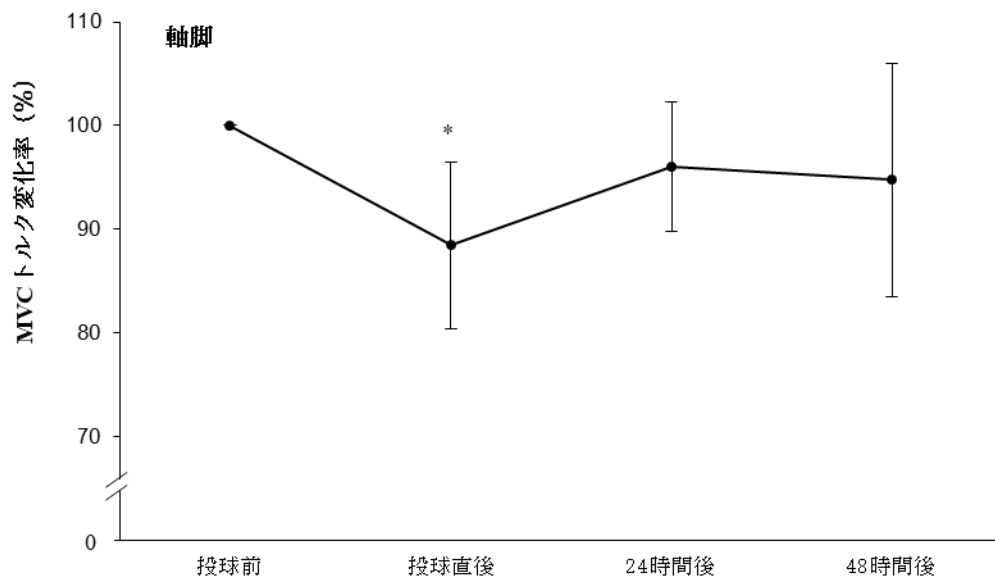
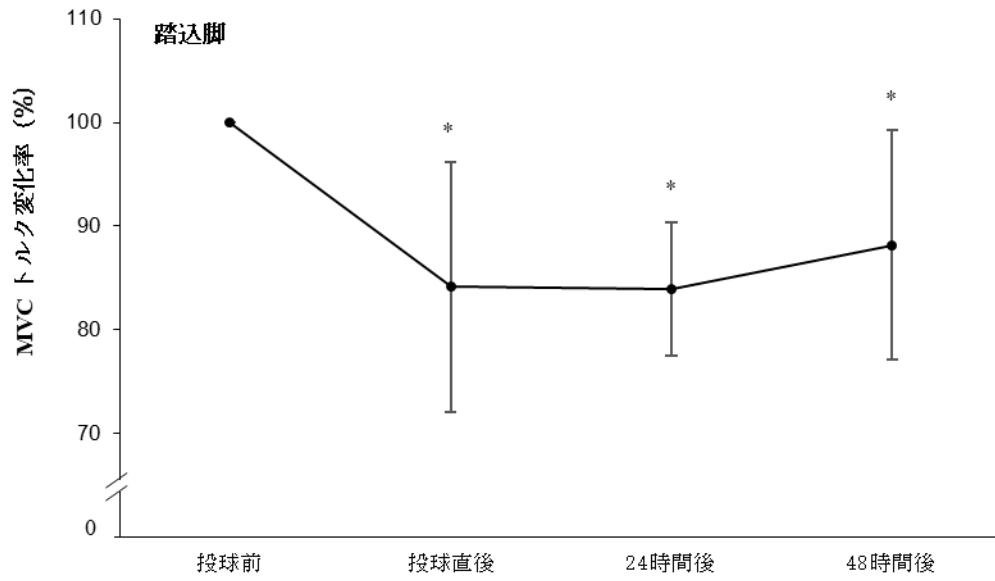


図3 投球前のMVCトルクを100%とした時の踏込脚および軸脚の投球直後-48時間後におけるMVCトルクの変化率。平均±標準偏差。MVC: maximal voluntary contraction. \*:  $P < 0.05$  vs. 投球前。