

ハムストリング肉離れの受傷予防と 走能力向上の両方を満たす走動作の予測

鹿屋体育大学 宮崎 輝 光

Optimizing Running Mechanics for Hamstring Strain Prevention and Sprint Performance Enhancement

by

Terumitsu Miyazaki

National Institute of Fitness and Sports in Kanoya

ABSTRACT

Hamstring muscle strain injuries would occur during the late swing phase of high-speed running. Biceps femoris long head (BFlh) is the most common injured muscle among hamstring muscles. Here, we aimed to examine the influence of pelvic and lower limb joint kinematics on the BFlh muscle-tendon kinematics using an angle-driven simulation method. Forty male collegiate athletes performed maximal effort 50-60 m sprinting while capturing their motion with a three-dimensional motion capture system. Using this captured sprint data, we simulated the sprint motion that increased and decreased their BFlh muscle-tendon unit (MTU) length during the late swing phase of sprinting. This simulation revealed that the pelvic anterior-posterior and knee extension-flexion motions affect the BFlh MTU length, whereas hip extension-flexion motion has smaller contributions to the MTU length compared to the pelvic and knee joint motions. Thus, our result suggests that modifying the sagittal plane motions of the pelvis and knee joint would be beneficial for preventing hamstring muscle strain injuries.

キーワード

大腿二頭筋長頭, シミュレーション, スプリント, 筋骨格モデル, 伸張性収縮

Keyword

Biceps femoris long head, Simulation, Sprint, Musculoskeletal model, Eccentric contraction

要 旨

ハムストリングス肉離れは、疾走動作中の遊脚期後半に発生する。特に、ハムストリングス構成筋の中でも、大腿二頭筋長頭での肉離れの発生が多い。そこで、本研究では、疾走動作中遊脚期後半における大腿二頭筋長頭の筋腱長の増減に影響する骨盤・下肢関節運動の特徴を角度入力による動作シミュレーションから明らかにすることを目的とした。40名の男性大学アスリートの走動作データを三次元動作計測した。そして、測定した走動作データをもとに、大腿二頭筋長頭の筋腱長を増加させた走動作および減少させた走動作を推定した。結果として、大腿二頭筋長頭の筋腱長の増減に対して、膝関節の屈曲伸展運動と骨盤の前傾後傾運動が最も影響することが明らかとなった。一方で、筋腱長の増減に対して、股関節の屈曲伸展運動の影響は少なかった。したがって、ハムストリングス肉離れの受傷リスク減少を目指すための走動作として、大腿二頭筋長頭の筋腱長を制御するためには膝関節の屈曲伸展運動および骨盤の前傾後傾運動の制御が寄与する可能性がある。

背 景

ハムストリングス肉離れは、陸上競技のみならず、サッカーや野球などあらゆるスポーツ競技で発生するスポーツ傷害である¹⁻⁵⁾。ハムストリングス肉離れの受傷動作として、高速度の疾走動作中に発生することが多い⁵⁾。また、ハムストリングスは、大腿二頭筋長頭・短頭、半膜様筋、半腱

様筋の4つの筋から構成され、この中でも、大腿二頭筋長頭で肉離れの発生が多い^{2,5)}。これまでの研究から、筋が伸長されるタイミングで筋収縮が発生することによって、肉離れが発生する可能性が指摘されている⁶⁻⁸⁾。したがって、疾走動作においてもハムストリングスが伸張性収縮しているタイミングが肉離れの発生リスクが高い可能性がある。

疾走動作におけるハムストリングスの筋腱動態について、遊脚期後半では筋腱が伸長され、かつ筋張力が発揮される⁹⁻¹¹⁾。これらの先行研究から、疾走動作中の遊脚期後半において、ハムストリングスは伸張性収縮状態であり、肉離れの発生リスクが高い区間であると考えられる。この遊脚期後半において、ハムストリングス肉離れの受傷リスクの減少を達成するためには、どのような動作がハムストリングスの筋腱動態に影響するかを明らかにする必要がある。特に、遊脚期後半のハムストリングスの力発揮は、股関節伸展動作や膝関節屈曲動作に貢献し、遊脚側の脚の制御を担う。そのため、ハムストリングスの筋張力を維持しつつ、筋腱長や筋腱伸長速度を減少させることが肉離れの受傷リスクの減少に加えて、走パフォーマンスの維持にも貢献すると考えられる。

ハムストリングス肉離れの受傷者および既往者が有する走動作の特徴として、骨盤や上部体幹のキネマティクスや大殿筋や体幹筋群の表面筋電図に関する報告がある^{12,13)}。一方で、疾走動作中遊脚期後半におけるハムストリングスの筋腱長や筋腱伸長速度に影響する体幹および下肢関節の動作の特徴はいまだ不明である。この点を解決する

ことは、ハムストリングス肉離れの受傷リスクの減少を期待できる走動作の特徴が明らかになり、受傷予防のための走動作の修正トレーニングにつながる。特に、ハムストリングスは二関節筋であるため骨盤前傾、股関節屈曲、および膝関節伸展によって筋腱長は増大する。この3つの運動が、ハムストリングスの筋腱長の増減にどの程度影響し、どの運動が最も影響するかが明らかになれば、トレーニング計画のうえで重要な知見となり得る。

したがって、本研究の目的は、角度入力による動作シミュレーション方法を用い、疾走動作中の遊脚期後半におけるハムストリングスの筋腱長の増減に影響する骨盤と下肢関節運動を明らかにすることを目的とした。特に、骨盤の前傾運動の修正がハムストリングス肉離れの予防につながる可能性¹⁴⁾や肉離れ受傷者の走動作の特徴として過度な骨盤前傾角度が報告されている¹³⁾ことから、本研究の仮説として、「ハムストリングスの筋腱長の増減に対して、股関節屈曲や膝関節伸展と比べて、骨盤前傾が最も影響する」とした。本研究で扱う角度入力による動作シミュレーション方法の結果は、測定した走動作データをもとにするため、疾走速度が変化しない(≒走パフォーマンスが変化しない)状態で、肉離れの受傷リスクを増減させる身体運動の特徴を示唆するものである。

1. 研究方法

1. 1 研究対象者およびデータ測定

本研究の研究対象者は、健常の男性大学生40名とした(年齢, 20.1 ± 1.2 years; 身長, 170.5 ± 5.5 cm; 身体質量, 70.5 ± 7.4 kg)。40名のうち、13名はサッカー、15名は野球、および12名は陸上競技短距離種目を専門とする大学生アスリートであった。すべての対象者は、最大努力におけるスポーツ動作中に疼痛が発生しない者であった。すべての対象者に実験に関する口頭説明を実施し、

承諾を得た。本研究は筑波大学倫理審査委員会の承認を得て実施した(承認番号: 020-9)。また、本研究で扱う対象者および走動作データは、先行研究と同様である^{10, 15)}。

本研究の実験試技は、屋外の全天候型の陸上走路における50-60mの最大努力のスプリント試技であった。対象者は、普段使用しているランニングシューズを着用した。なお、陸上競技短距離選手については、スパイクありのシューズとした。対象者の身体各部分の特徴点に赤外線反射マーカーを47点貼付した¹⁵⁾。十分なウォーミングアップ後に、50-60mの最大努力のスプリント試技を2-3回実施した。試技間は5分以上の休憩を設けた。スプリント動作の測定範囲は、スタートから40-50m地点であり、測定後には減速するための走路を10m以上設定した。スプリント動作中の赤外線反射マーカーの3次元座標値は、3次元動作計測装置(250Hz, VICON-MX, Vicon Motion Systems Ltd., UK)を使用した。同様に、接地中の地面反力データを測定するために、地面に固定した3枚の地面反力計(1000Hz, 9287 B and two 9281 A, Kistler, Switzerland)を使用した。なお、3次元動作測定装置と地面反力計は同期させた。

1. 2 データ処理および角度入力による走動作シミュレーション

データ分析は、演算用ソフトウェア(MATLAB 2020b, MathWorks Inc., USA)を使用した。測定した3次元座標値は、18Hzを遮断周波数とした位相ずれのない4次のローパスバターワースフィルタ¹⁶⁾を使用し、平滑化した。接地および離地の判定は、地面反力の鉛直成分の20Nを閾値とし、20N以上のタイミングを接地期とした。分析対象とした走行区間は、膝関節が最大屈曲位となるタイミングから接地までの遊脚期後半とした(図1)。本研究では、分析区間の疾走速度が最も大きかった1試技を対象試技とした。

本研究では、大腿二頭筋長頭の筋腱長を増減させる動作を角度入力による動作シミュレーションから推定した。ここでは、目的とする筋腱長を任意に設定し、その設定した筋腱長となる走動作を推定した。加えて、推定した走動作データが、測定した走動作データから過度に逸脱しないようにするため、測定データと推定データの動作の違いが最小となるような動作を探索した。

はじめに、測定した走動作データから骨盤と右下肢（大腿、下腿、および足部）の4セグメントからなる剛体リンクモデルを構築した。加えて、OpenSimのgait2392モデル^{17, 18)}をもとに大腿二頭筋長頭の筋腱をモデル化し、大腿二頭筋長頭の筋腱長や筋腱伸長速度を推定した。剛体リンクモデルにおいて、各セグメントの重心位置や慣性モーメントといった身体部分慣性係数はDumasら^{19, 20)}が報告した係数を使用した。次に、測定した走動作データにおける大腿二頭筋の筋腱長をもとにして、目的とする筋腱長を設定した。本研究では、筋腱長が増加した条件と減少した条件の2条件を設定した（以下、筋腱長増大条件と筋腱長減少条件とする）。基準となる大腿二頭筋長頭の筋腱長最大値は、 $0.499 \pm 0.006\text{m}$ であった。筋腱長増大条件における最大値は $0.507 \pm 0.005\text{m}$ 、筋腱長減少条件の最大値は $0.491 \pm 0.005\text{m}$ であった。この2条件で設定した筋腱長に合致した走動作を推定するうえで、式(1)で示した目的関数 J を設定した。動作シミュレーションにおける最適化計算では、目的関数が最小となる、かつ推定する筋腱長が目的とする筋腱長に一致するという制約条件を満たす動作データを探索した。なお、最適化計算では遊脚期後半全体を対象としている。

最適化計算の目的関数は、推定する動作データが測定データから過度に逸脱しないように右辺の第一項と第二項に、セグメントの角加速度と各関節の関節トルクが推定データと測定データの差が小さくなるような項を設けた。また、本研究では

反対側の脚と体幹の動きを考慮していないため、腰仙椎関節および左脚股関節から骨盤に入力される正味の力とモーメントが推定データと測定データの差が小さくなるような項を設けた（右辺第三項）。

$$J = \sum_{ifr=1}^{nf} \sum_{idof=1}^q \left(\frac{\dot{\omega}_{idof}^{exp} ifr - \dot{\omega}_{idof}^{sim}}{\dot{\omega}_{idof}^{exp, max}} \right)^2 + w_1 \cdot \sum_{ifr=1}^{nf} \sum_{kdof=1}^6 \left(\frac{jt_{kdof}^{exp} ifr - jt_{kdof}^{sim}}{jt_{kdof}^{exp, max}} \right)^2 + w_2 \cdot \sum_{ifr=1}^{nf} \sum_{jdof=1}^6 \left(\frac{fr_{jdof}^{exp} ifr - fr_{jdof}^{sim}}{fr_{jdof}^{exp, max}} \right)^2 \quad \text{式 (1)}$$

ここで、 nf および ifr は、遊脚期後半のフレーム数および各フレームを表している。右辺第一項において、 $\dot{\omega}_{idof}^{exp}$ 、 $\dot{\omega}_{idof}^{sim}$ 、および $\dot{\omega}_{idof}^{exp, max}$ は、ある自由度（ $idof$ ）における測定データの角加速度、推定データの角加速度、および推定データの角加速度の最大値である。右辺第二項において、 jt_{kdof}^{exp} 、 jt_{kdof}^{sim} 、および $jt_{kdof}^{exp, max}$ は、ある自由度（ $kdof$ ）における測定データの関節トルク、推定データの関節トルク、および推定データの関節トルクの最大値である。右辺第三項において、 fr_{jdof}^{exp} 、 fr_{jdof}^{sim} 、および $fr_{jdof}^{exp, max}$ は、ある自由度（ $jdof$ ）における測定データの残差力と残差モーメント、推定データの残差力と残差モーメント、および推定データの残差力と残差モーメントの最大値である。

1. 3 評価項目および統計処理

大腿二頭筋長頭の筋腱長に影響する動作要因の中でも、どの運動が最も影響するかを明らかにするために、測定した走動作データと推定した走動作データ（2条件）から骨盤前傾後傾角度、股関節屈曲伸展角度、および膝関節屈曲伸展角度を算出した。これらの角度について、遊脚期後半における筋腱長が最大となるタイミングでの角度を算出し、測定した走動作データから推定した走動作データへの変化率を算出した。

記述したデータは、平均値と1標準偏差を示している。統計処理は、SPSSを使用し、すべての

検定で有意水準は5%とした。評価項目における角度の変化率について、骨盤、股関節、および膝関節間で比較した。はじめに、反復測定 の1元配置分散分析を実施した。主効果が認められた場合、事後検定として各ペアで対応のあるt検定を実施し、Bonferroni法によって危険率を補正した。

2. 研究結果

測定した疾走動作における走速度は、 $8.95 \pm 0.6\text{m/s}$ (range, $7.88 - 10.23\text{m/s}$) であった。図1に、測定した走動作中、および推定した走動作中の大腿二頭筋長頭の筋腱長と筋腱伸長速度を示した。筋腱長増大条件および筋腱長減少条件では、筋腱長と筋腱伸長速度ともに基準データと比べて、増加および減少していた(図2)。

角度の時系列変化から、筋腱長増大条件では、

骨盤の前傾角度、股関節の屈曲角度、および膝関節の伸展角度の増大が認められた(図3)。筋腱長減少条件においても、骨盤の前傾角度、股関節の屈曲角度、および膝関節の伸展角度の減少が認められた(図3)。さらに、大腿二頭筋長頭の筋腱長が最大となるタイミングにおける角度について、骨盤の前傾後傾角度は筋腱長増大条件ではほぼ変化していなかったが、筋腱長減少条件では前傾角度の減少傾向が認められた(図4a)。股関節と膝関節については、筋腱長減少条件では屈曲角度の減少傾向、筋腱長増大条件では屈曲角度の増加傾向が認められた(図4bとc)。

角度の変化率については、筋腱長増大条件と筋腱長減少条件において、有意な主効果が認められた(図5；筋腱長増大条件： $F=39.1, p<0.001$, 偏 $\eta^2=0.77$ ；筋腱長減少条件： $F=126.9, p<0.001$, 偏 η^2

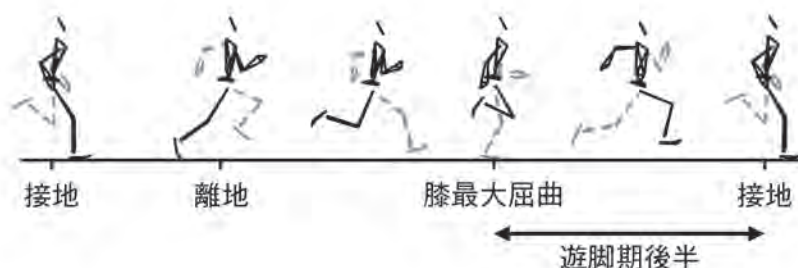


図1 疾走動作における遊脚期後半の定義

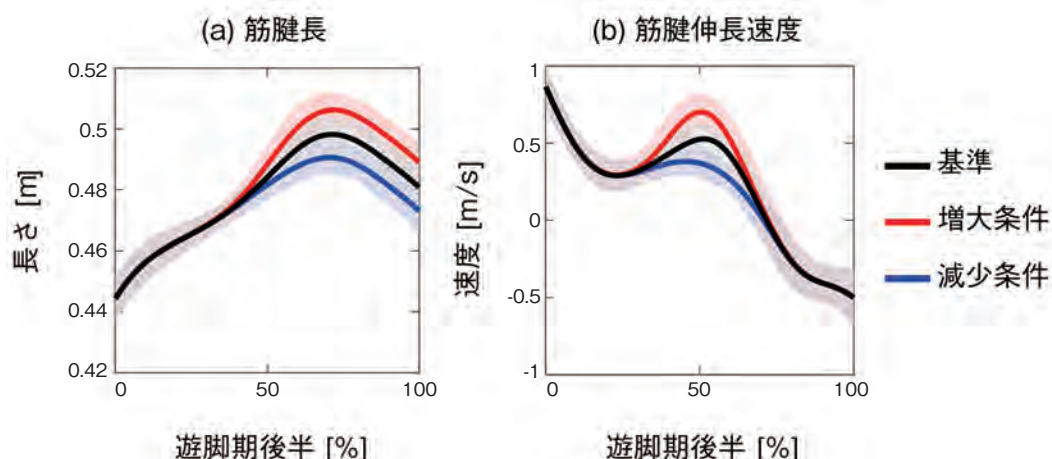


図2 遊脚期後半における大腿二頭筋長頭の (a) 筋腱長と (b) 筋腱伸長速度の時系列変化

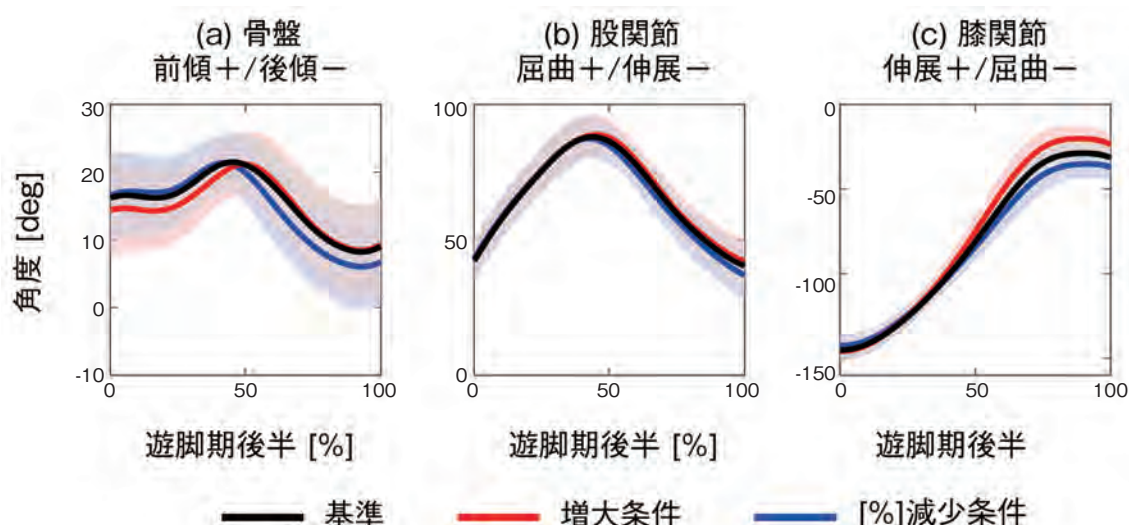


図3 遊脚期後半における(a) 骨盤の前傾後傾角度, (b) 股関節の屈曲伸展角度, および(c) 膝関節の屈曲伸展角度の時系列変化

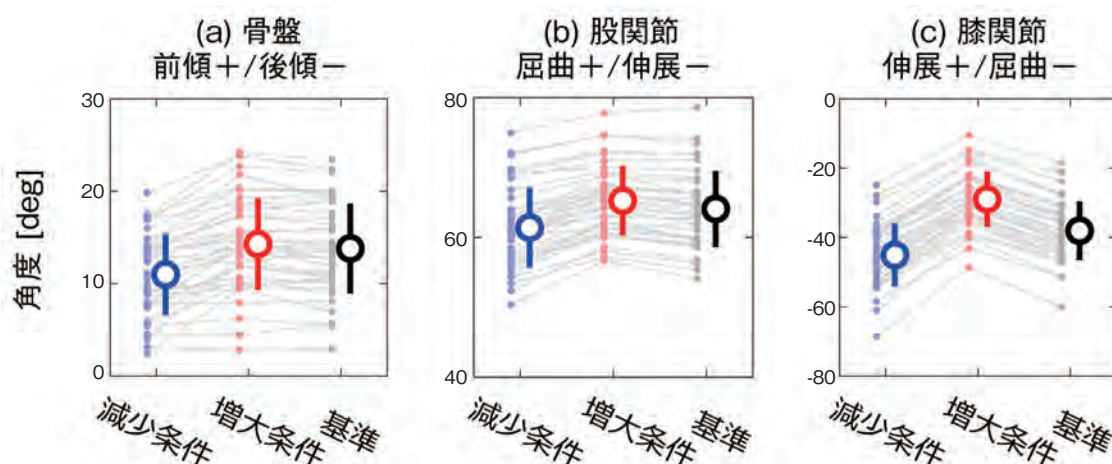


図4 大腿二頭筋長頭の筋腱量が最大となるタイミングにおける(a) 骨盤の前傾後傾角度, (b) 股関節の屈曲伸展角度, および(c) 膝関節の屈曲伸展角度

=0.50). 筋腱長減少条件では, 股関節と比較して, 骨盤と膝関節の変化率が有意に大きく, 骨盤と膝関節間では有意な差は認められなかった(図5a). 筋腱長増大条件では, 骨盤と股関節と比較して, 膝関節の変化率が有意に大きかった. また, 骨盤の変化率は, 股関節と比べて, 有意に大きかった(図5b).

3. 考 察

本研究は, 疾走動作中遊脚期後半における大腿二頭筋長頭の筋腱長に影響する骨盤・下肢関節運動を角度入力による動作シミュレーションから検討した. 解剖学的な起始停止点から, 大腿二頭筋長頭の筋腱長の増減には, 骨盤の前傾後傾, 股関節の屈曲伸展, および膝関節の屈曲伸展が関わる. 本研究から, 疾走動作中遊脚期後半において, 大

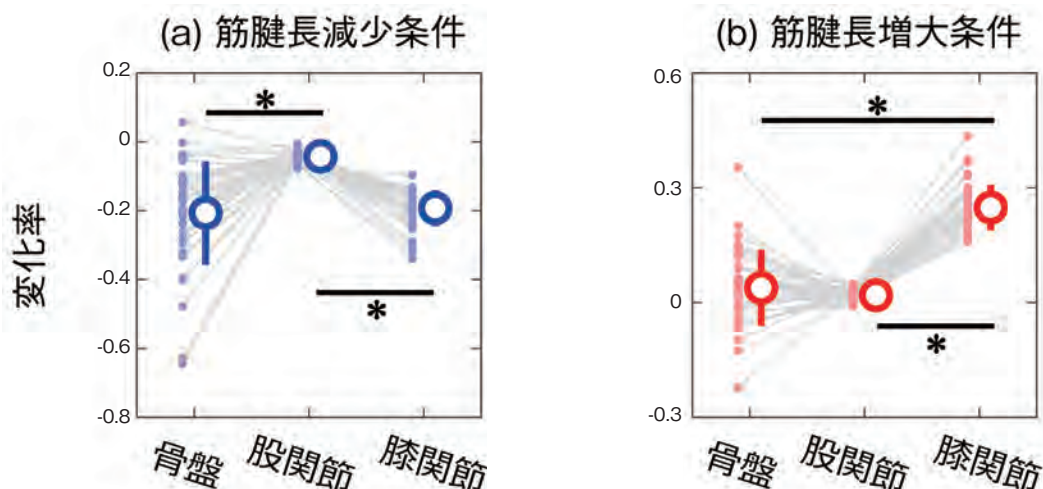


図5 大腿二頭筋長頭の筋腱量が最大となるタイミングにおける各角度の基準データからの変化率: (a) 筋腱長減少条件および (b) 筋腱長増大条件
変化率が正 (+) は、骨盤の前傾角度、股関節の屈曲角度、および膝関節の伸展角度の増加を示している。
アスタリスク (*) は、有意な差が認められた群間を示している ($p<0.05$)。

腿二頭筋長頭の筋腱長の増大には膝関節伸展運動が最も影響し、筋腱長の減少には膝関節伸展運動と骨盤の前傾運動が最も影響することが明らかとなった。さらには、股関節の屈曲伸展運動は、疾走動作中遊脚期後半における大腿二頭筋長頭の筋腱長の増減への影響は少ないことが考えられた。以上の結果は、当初の研究仮説を一部支持するものであった。このことから、ハムストリングス肉離れの受傷リスク減少を目指すための走動作として、大腿二頭筋長頭の筋腱長を制御するためには膝関節の屈曲伸展運動および骨盤の前傾後傾運動の制御が寄与する可能性がある。

大腿二頭筋長頭の筋腱長増大条件では、遊脚期後半の後半部分において、骨盤の前傾、股関節の屈曲、および膝関節の伸展が増加していた。筋腱長減少条件では、骨盤の前傾、股関節の屈曲、および膝関節の伸展は減少が生じていた。これらのことから、従来の解剖学的な起始停止点からわかるように、大腿二頭筋長頭の筋腱長の制御には、骨盤の前傾後傾、股関節の屈曲伸展、および膝関節の屈曲伸展の3つの運動が関わることがわかった。加えて、本研究の結果から、これら3つの運

動の中でも、骨盤の前傾後傾運動と膝関節の屈曲伸展運動が筋腱長の増減への影響が大きいことが明らかとなった。一方で、股関節の屈曲伸展運動の変化率は、他の運動と比較して小さく、筋腱長への影響は少ない可能性がある。したがって、大腿二頭筋長頭の筋腱長を減少させ、肉離れの受傷リスクを減少させるためには、膝関節の伸展角度および骨盤前傾角度を減少させる方略が重要であると考えられる。

推定した走動作における骨盤前傾角度の変化率は、そのほかの変化率と比較して、個人間のばらつきが大きかった (図5)。特に、筋腱長減少条件では骨盤前傾角度が増大する対象者も存在し、筋腱長増大条件では骨盤前傾角度が減少する対象者も存在した。骨盤の運動は、体幹と両側股関節からのトルクおよび力入力によって制御される。そのため、骨盤の運動の個人差は、3つの関節からの入力に個人差があるため生じたと考えられる。加えて、これまでの研究から、骨盤の前傾角度の増大がハムストリングス肉離れの受傷リスクに関係がある可能性が報告されている¹³⁾。また、骨盤の前傾運動の修正がハムストリングス肉離れの

予防につながる可能性もある¹⁴⁾。そのため、骨盤前傾後傾運動の制御は、肉離れの受傷予防に貢献する可能性もある。本研究結果から、膝関節の過度な伸展運動と骨盤の過度な前傾運動の修正を同時に進める必要があることが示唆された。

本研究では、測定した走動作データを基準とし、大腿二頭筋長頭の筋腱長が増大する走動作と減少する走動作を推定した。結果として、それぞれの条件では、大腿二頭筋長頭の筋腱長および伸長速度の増大が認められた(図2)。そのため、本研究で適用した角度入力による動作シミュレーションは、大腿二頭筋長頭の筋腱長を増減させる走動作を推定できることを示している。ハムストリングス肉離れは伸張性収縮状態で発生する⁶⁻⁸⁾ことから、大腿二頭筋長頭の筋腱長が増大した走動作は肉離れの受傷リスクが増大した動作、および大腿二頭筋長頭の筋腱長が減少した走動作は肉離れの受傷リスクが減少した動作を模擬していると考えられる。一方で、本研究で適応した動作シミュレーションでは、肉離れの受傷リスクに関わり得る大腿二頭筋長頭の筋張力を制御していない。そのため、本研究で推定された走動作が、十分に肉離れの受傷リスクの増減を表現していない可能性もある。

4. 結 論

本研究は、動作シミュレーションを使用し、疾走動作中遊脚期後半における大腿二頭筋長頭の筋腱長に影響する骨盤・下肢関節運動を明らかにすることを目的とした。本研究のシミュレーションによって、大腿二頭筋長頭の筋腱長が増大した走動作および減少した走動作を推定することができた。結果として、疾走動作中遊脚期後半において、大腿二頭筋長頭の筋腱長の増大には膝関節伸展運動が最も影響し、筋腱長の減少には膝関節伸展運動と骨盤の前傾運動が最も影響することが明らかとなった。以上から、ハムストリングス肉離れの

受傷リスク減少を目指すための走動作として、大腿二頭筋長頭の筋腱長を制御するためには膝関節の屈曲伸展運動および骨盤の前傾後傾運動の制御が寄与する可能性があり、股関節の屈曲伸展運動は筋腱長の制御への寄与は少ないことが考えられた。

謝 辞

本研究は、公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団の研究助成に支援いただきました。また、筑波大学体育系スポーツバイオメカニクス研究室に所属する学生の多大な協力を得て行われました。

文 献

- 1) Ahmad C.S., Dick R.W., Snell E. et al., Major and Minor League Baseball Hamstring Injuries: Epidemiologic Findings From the Major League Baseball Injury Surveillance System., *Am. J. Sports Med.*, **42**(6): 1464-70(2014)
- 2) Brooks J.H.M., Fuller C.W., Kemp S.P.T., Reddin D.B., Incidence, Risk, and Prevention of Hamstring Muscle Injuries in Professional Rugby Union., *Am. J. Sports Med.*, **34**(8): 1297-306(2006)
- 3) Opar D.A., Drezner J., Shield A. et al., Acute hamstring strain injury in track-and-field athletes: A 3-year observational study at the Penn Relay Carnival: Hamstring injury in track-and-field athletes., *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, **24**(4): e254-9(2014)
- 4) Orchard J.W., Intrinsic and Extrinsic Risk Factors for Muscle Strains in Australian Football., *Am. J. Sports Med.*, **29**(3): 300-3(2001)
- 5) Woods C., Hawkins R.D., Maltby S., Hulse M., Thomas A., Hodson A., The Football Association Medical Research Programme: An audit of injuries in professional football - Analysis of hamstring injuries., *British Journal of Sports Medicine.*, **38**(1): 36-41(2004)
- 6) Lieber R.L., Friden J., Muscle damage is not a function of muscle force but active muscle strain., *Journal of Applied Physiology.*, **74**(2): 520-6(1993)
- 7) Brooks S.V., Zerba E., Faulkner J.A., Injury to

- muscle fibres after single stretches of passive and maximally stimulated muscles in mice., *Journal of Petrology*., **488**(2) : 459–69(1995)
- 8) Warren G., Hayes D., Lowe D., Armstrong R., Mechanical factors in the initiation of eccentric contraction-induced injury in rat soleus muscle., *Journal of Physiology*., **464**:457–75(1993)
- 9) Chumanov E.S., Heiderscheit B.C., Thelen D.G., Hamstring musculotendon dynamics during stance and swing phases of high-speed running., *Medicine and Science in Sports and Exercise*., **43**(3) : 525–32 (2011)
- 10) Miyazaki T., Fujii N., Intermuscular differences in force generation ability among biarticular hamstring muscles during the late swing phase in maximal speed sprinting., *Sports Biomechanics*., 1–18(2023)
- 11) Schache A.G., Dorn T.W., Blanch P.D., Brown N.A.T., Pandy M.G., Mechanics of the human hamstring muscles during sprinting., *Medicine and Science in Sports and Exercise*., **44**(4) : 647–58 (2012)
- 12) Schuermans J., Danneels L., Van Tiggelen D., Palmans T., Witvrouw E., Proximal Neuromuscular Control Protects Against Hamstring Injuries in Male Soccer Players: A Prospective Study With Electromyography Time-Series Analysis During Maximal Sprinting., *Am. J. Sports Med.*, **45**(6) : 1315–25(2017)
- 13) Schuermans J., Van Tiggelen D., Palmans T., Danneels L., Witvrouw E., Deviating running kinematics and hamstring injury susceptibility in male soccer players: Cause or consequence? *Gait & Posture*., **57**:270–7(2017)
- 14) Mendiguchia J., Gonzalez De La Flor A., Mendez-Villanueva A., Morin J.-B., Edouard P., Garrues M.A., Training-induced changes in anterior pelvic tilt: potential implications for hamstring strain injuries management., *Journal of Sports Sciences*., **39**(7) : 760–7(2021)
- 15) Miyazaki T., Fujii N., Effects of changes in optimal muscle fibre length in the biceps femoris long head on muscle force during the late swing phase of maximal speed sprinting: a simulation study., *Sports Biomechanics*., 1–16(2022)
- 16) Winter D.A., Biomechanics and Motor Control of Human Movement: *Fourth Edition*., 1–370 p(2009)
- 17) Delp S.L., Anderson F.C., Arnold A.S. et al., OpenSim: Open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement., *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*., **54**(11) : 1940–50(2007)
- 18) Hamner S.R., Seth A., Delp S.L., Muscle contributions to propulsion and support during running., *Journal of Biomechanics*., **43**(14) : 2709–16 (2010)
- 19) Dumas R., Chèze L., Verriest J.P., Adjustments to McConville et al. and Young et al. body segment inertial parameters., *Journal of Biomechanics*., **40**(3) : 543–53(2007)
- 20) Dumas R., Chèze L., Verriest J.P., Corrigendum to “Adjustments to McConville et al. and Young et al. body segment inertial parameters” [J. Biomech.(2006) in press](DOI:10.1016/j.jbiomech.2006.02.013)., *Journal of Biomechanics*., **40**(7) : 1651–2(2007)