

疾走動作遊脚期におけるハムストリングスの筋腱ダイナミクス

令和3年度

宮崎輝光

筑波大学大学院人間総合科学研究科体育科学専攻

緒論

ハムストリングス肉離れは、陸上競技、サッカー、ラグビー、および野球といった走動作を含む様々な競技種目で好発するスポーツ傷害である。ハムストリングス肉離れの再発率は高く、再受傷する度に重症度も高くなる。そのため、ハムストリングス肉離れの受傷予防は競技パフォーマンスの向上のためにも重要である。ハムストリングス肉離れは、高速度の走動作中に発生し、特に遊脚期後半で発生すると考えられている。これまでの研究から、走動作中遊脚期後半の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より高い区間であることが明らかとなっている。ハムストリングスの中でも、特に、大腿二頭筋長頭で肉離れが最も多く発生する。しかしながら、走動作中遊脚期後半におけるハムストリングスの筋腱ダイナミクスに関して、ハムストリングス内の筋間差および影響する筋腱の構造的・機械的特性および動作的特徴は明らかとなっていない。加えて、ハムストリングス肉離れが好発する近位部の筋腱移行部に加わる負荷も明らかとなっていない。これらの点を明らかにすることで、ハムストリングス肉離れが大腿二頭筋長頭での発生率が最も高い理由の解明、および肉離れの受傷リスク評価方法と予防トレーニングの開発に寄与すると考えられる。

本博士論文の目的は、走動作中遊脚期におけるハムストリングスの筋腱ダイナミクスに影響する筋腱の構造的・機械的特性および動作的特徴を明らかにすることである。この研究目的達成のため、3つの研究課題を設定した。具体的には、研究課題1では、走動作中遊脚期後半のハムストリングスの筋腱ダイナミクスおよび損傷組織である近位部筋腱移行部に加わる剪断応力に関するハムストリングス内の筋間差を明らかにする。研究課題2では、研究課題1で明らかとなった筋腱ダイナミクスやその筋間差に対して、影響する筋腱の構造的・機械的特性を明らかにする。研究課題3では、ハムストリングスの筋腱長や筋腱伸長速度が変動する場合の走動作を角度入力によるシミュレーションから推定し、筋腱ダイナミクスに影響する骨盤-下肢関節の動作的特徴を明らかにする。さらに、総合考察では、得られた結果を基に、ハムストリングス肉離れに関する受傷リスク評価および予防トレーニングの開発に向けた基礎的知見を提示することとした。

方法

実験試技は、40m以上の助走区間を設定し、最大速度付近の走動作である。40名の大学男性アスリートを対象（サッカー選手12名；野球選手15名；陸上短距離選手13名）とし、三次元動作分析装置と地面反力計を用いて、身体特徴点に貼付した赤外線反射マーカーおよび接地時の地面反力を取得した。取得した走動作データを基に、ハムストリングス4筋（大腿二頭筋長頭、半膜様筋、半腱様筋、大腿二頭筋短頭）を含む右脚43筋から構成される筋骨格モデルを用いて、走動作中の筋腱ダイナミクスを推定した。

研究課題 1

走動作中遊脚期におけるハムストリングスの筋腱ダイナミクスおよび筋線維と腱膜の接触面に加わる剪断応力を推定し、ハムストリングス内の筋間差とその筋間差の要因を検討した。加えて、外部腱、腱膜、および複数の筋線維から構成される筋モデルを提案し、筋腱ダイナミクスや筋腱移行部に加わる力に関する筋内部位差を検討した。

走動作中遊脚期後半におけるハムストリングスでは、筋張力の最大値および近位部の筋線維と腱膜の接触面に加わる剪断応力の最大値に関して、ハムストリングス内で筋間差が認められた。筋張力の最大値は半膜様筋が最大であり、剪断応力の最大値は大腿二頭筋長頭が最大であった。大腿二頭筋長頭と半腱様筋の筋張力や剪断応力の最大となるタイミングは、半膜様筋と比べて早いタイミングであった。また、筋線維の長さや伸長速度、および張力-長さ-速度特性も、ハムストリングス内で筋間差が認められた。特に、張力-長さ-速度特性に基づく力発揮ポテンシャルは、遊脚期後半の前半部分では大腿二頭筋長頭と半腱様筋が半膜様筋より大きく、遊脚期後半の前半部分では大腿二頭筋長頭と半腱様筋が半膜様筋より小さいことが明らかとなった。このような筋腱ダイナミクスに関するハムストリングス内の筋間差は、筋骨格モデルに入力する筋腱パラメータである最大等尺性発揮張力、筋線維の至適長、腱の自然長、および筋線維と腱膜の接触面積の筋間差が要因であることが考えられた。特に、筋の発揮張力のタイミングに関する筋間差は、筋線維の至適長と腱の自然長がハムストリングス内で異なることによって、張力-長さ-速度特性に筋間差が生じたことが要因であることが考えられた。そのため、ハムストリングス肉離れに関する受傷リスクは筋間で異なることが考えられ、研究課題 1 の結果は、ハムストリングス肉離れの受傷率が筋間で異なることの 1 要因であることを示すものである。さらに、複数の筋線維を有する筋モデルを用いることで、筋腱ダイナミクスの筋内部位差や筋厚変化といった筋の形状変化を推定できることが明らかとなった。肉離れの損傷部位とされる筋腱移行部に加わる筋走行方向の力は、外部腱に近いほど増大傾向となることが明らかとなった。この結果は、ハムストリングス肉離れは近位部、かつより外部腱に近い筋腱移行部が好発する部位であることを示すものである。

研究課題 2

筋骨格モデルに入力する筋腱パラメータである最大等尺性発揮張力、腱の自然長、筋線維の至適長、羽状角、付着点 (起始点、停止点)、および腱の弾性特性を対象とし、これらの筋腱パラメータを変動させたことによる筋腱ダイナミクスへの影響を検討した。このことから、走動作中遊脚期におけるハムストリングスの筋腱ダイナミクスおよび筋線維と腱膜の接触面に加わる剪断応力に影響する筋腱の構造的・機械的特性を明らかにし、また、その筋腱ダイナミクスへの影響機序も検討した。

研究課題 2 から、走動作におけるハムストリングスの筋腱ダイナミクスに対して影響する筋骨格モデルに入力する筋腱の構造的・機械的特性、およびその影響する機序が明らかとなった。筋腱パラメータである最大等尺性発揮張力、腱の自然長、筋線維の至適長、羽状角、および付着点を基準値から±10%変動させた場合、筋張力と筋線維と腱膜の接触面に加わる剪断応力の筋間差は、48 の変動条件のうち、研究課題 1 で得られた筋間差と 46 条件で同様であった。筋張力に対する影響は、最大等尺性発揮張力、腱の自然長、および筋線維の至適長が、そのほかの筋腱パラメータと比較して、より大きいことが明らかとなった。また、筋腱の構造的・機械的特性を変動させたことによる発揮張力の変動は、張力-長さ-速度特性が変動することによって生じており、この張力-長さ-速度特性に影響する筋腱特性として、腱の自

然長、筋線維の至適長、および腱組織の弾性特性が挙げられた。特に、大腿二頭筋長頭において、筋線維の至適長の変動による筋線維の発揮張力の変動量に対して、走動作中の筋腱長最大値が関連することが明らかとなった。この結果は、走動作の特徴となる筋腱長は、筋線維の至適長の変動による遊脚期後半における力発揮特性の変動に影響を与えることが考えられ、予防トレーニングを実施する際に走動作の特徴を評価することの必要性を示すものである。

研究課題3

角度入力による身体運動のシミュレーション方法を用いて、大腿二頭筋長頭と半膜様筋の筋腱長および筋腱伸長速度が変動する走動作を推定した。そして、大腿二頭筋長頭と半膜様筋の筋腱ダイナミクスに影響する骨盤-下肢関節の動作的特徴を検討した。

大腿二頭筋長頭と半膜様筋の筋腱長および筋腱伸長速度を増減させる動作的特徴の変動として、骨盤-下肢関節の中でも、膝関節の屈曲伸軸における関節角度、関節トルク、および関節トルクパワーが最も大きい変動であることが明らかとなった。このような動作変化は、筋線維長や筋線維伸長速度に影響し、結果として、筋の張力-長さ-速度特性および発揮張力に影響した。このとき、大腿二頭筋長頭および半膜様筋の一方を選択的に筋腱長および筋腱伸長速度を増減させる動作は認められなかった。加えて、筋張力や張力-長さ-速度特性の変動にも筋間差は認められなかった。このことから、ハムストリングスの中でも肉離れ受傷率の筋間差に対する骨盤-下肢関節の角度変化や力発揮変化といった動作的特徴の影響は抽出できなかった。

総合考察

研究課題 1-3 から、走動作中遊脚期におけるハムストリングスの筋腱ダイナミクスに影響する筋腱の構造的・機械的特性および動作的特徴が明らかとなった。ハムストリングス肉離れが大腿二頭筋長頭で最も多いことの1要因として、ハムストリングスの筋腱の構造的・機械的特性の筋間差であることが考えられた。ハムストリングス各筋の筋腱ダイナミクスを評価することによって、選手のトレーニングや肉離れ受傷による筋腱の構造的・機械的特性および動作的特徴の変動が走動作パフォーマンスに与える影響および肉離れの受傷リスクを評価できる可能性がある。したがって、ハムストリングス肉離れの受傷リスク評価および予防トレーニングを構築するためには、ハムストリングス肉離れに関わる筋腱の構造的・機械的特性と走動作の特徴も測定し、総合的に選手の個別性を検討することが必要性であると考えられた。

結論

走動作中遊脚期におけるハムストリングスの筋腱ダイナミクスに関して、1) ハムストリングス内で筋間差が生じ、その要因は腱の自然長や筋線維の至適長といった筋腱の構造的・機械的特性の筋間差であったこと、2) 腱の自然長、最大等尺性発揮張力、および筋線維の至適長の変動による影響がより大きかったこと、3) 膝関節の屈曲伸軸における動作変化による影響がより大きかったこと、が明らかとなった。また、ハムストリングスの発揮張力への影響機序を、筋骨格モデルを用いることで明らかにすることができた。その影響機序として、筋腱の構造的・機械的特性および動作的特徴の変動によって、筋線維の伸長率および伸長速度が変化し、次に筋線維の伸長率および伸長速度で決定される張力-長さ-速度特性が変化し、結果として、筋の発揮張力が変化することが明らかとなった。