

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04067

研究課題名（和文）ハムストリングス肉離れの発生に関与する筋構造と走動作の特徴

研究課題名（英文）Characteristics of muscle structure and sprinting motion affecting hamstring strain

研究代表者

藤井 範久 (Fujii, Norihisa)

筑波大学・体育系・教授

研究者番号：10261786

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、走動作遊脚期後半での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の特徴を明らかにすることであった。40名の大学男性アスリートを対象にし、動作計測を行い、最適化計算を用いて筋腱ダイナミクスを算出した。その結果、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ること、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いこと、3)膝関節の屈曲伸展軸における動作変化による影響がより大きいこと、などを明らかにすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究から、ハムストリングス肉離れの受傷リスクの評価や予防トレーニングへの示唆を抽出するためには、個々の選手、研究対象者の特性を評価することの必要性を主張できる。具体的には、超音波画像診断装置、磁気共鳴画像診断装置（MRI）、および力計測器を用いて筋腱の構造的・機械的特性を評価すること、また三次元動作分析装置、ハイスピードカメラ、および表面筋電計から走動作の特徴や走動作中のハムストリングスの表面筋電図を計測し、総合的に評価することが必要である。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to clarify the structural properties of hamstrings and the kinematical characteristics that affect the muscle-tendon dynamics in the hamstrings during sprinting. Sprinting motion of 40 collegiate male athletes were captured during the maximal sprinting phase. The results of this study revealed the following: 1) the differences of muscle-tendon dynamics between the hamstrings muscles during the swing phase of the sprinting motion were affected by muscle-tendon structural properties such as tendon slack length and optimal length of muscle fibers, 2) the influences on muscle-tendon dynamics were affected mainly by tendon slack length, maximal isometric exertion tension, and optimal length of muscle fibers, and 3) the effects of of knee-joint movement on muscle-tendon dynamics were greater than the other movements such as hip joint flexion/extension and pelvis movement.

研究分野：スポーツバイオメカニクス

キーワード：下肢動作 大腿二頭筋長頭 半膜様筋 半腱様筋 肉離れ 張力発揮ポテンシャル 伸張性収縮 筋間差

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

肉離れは、陸上競技、サッカー、ラグビー、アメリカンフットボール、および野球といった様々な運動中に発生し、下肢や体幹の筋群で好発することが多数報告されている(たとえば、Ahmad et al., 2014; Brooks et al., 2006; Kokubu et al., 2020; Woods et al., 2004, など)。肉離れの中でも大腿後面に位置するハムストリングス(大腿二頭筋長頭/biceps femoris long head: BF<sub>lh</sub>、半膜様筋/semimembranosus: SM、半腱様筋/semitendinosus: ST、大腿二頭筋短頭/biceps femoris short head: BF<sub>sh</sub>の総称)の受傷率が最も高い(たとえば、Kokubu et al., 2020; Orchard and Seward, 2002; Woods et al., 2004, など)。ハムストリングス肉離れは、再受傷率が高いことが報告されており、かつ初発の重症度と比べて再発時の重症度がより高くなる特徴をもっている(Brooks et al., 2006)。

ハムストリングス肉離れは、高速度の走動作中、特に遊脚期後半で発生しやすい。遊脚期後半では、ハムストリングスの筋張力、筋腱長、筋腱伸長速度、および表面筋電活動量が、他の局面より大きいことが報告されている(たとえば、Schache et al., 2012; Thelen et al., 2005; Yu et al., 2008, など)。したがって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と考えられている。さらにハムストリングスの中でも、BF<sub>lh</sub>の肉離れの受傷率が高く、肉離れの受傷率に関する筋間差が認められている(Brooks et al., 2006; Okoroha et al., 2019; Woods et al., 2004)。

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。しかしながら、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、ハムストリングスを構成する筋間差や筋腱の構造的・機械的特性および動作の特徴は明らかとなっていない。さらに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になっていない。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。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、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影響する筋腱の構造的・機械的特性および動作の特徴を明らかにすることである。

### 3. 研究の方法

#### (1) 走動作の計測実験

分析対象とした動作は、助走区間の設けた後の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(サッカー選手12名、野球選手15名、陸上短距離選手13名)を対象に、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および接地時の地面反力を計測した。なお実験に先立ち研究対象者には、実験の目的、危険性、なんらの不利益なく実験途中で参加を辞退できることなどを口頭および書面で説明し、実験に参加することに関する承諾を書面で得た。また本研究は、筑波大学体育系研究倫理委員会の承認(体020-9)を得て実施したものである。

#### (2) ハムストリングスの筋腱ダイナミクスの推定および筋間差と部位差

取得した走動作データをもとに、ハムストリングス4筋(BF<sub>lh</sub>、SM、ST、BF<sub>sh</sub>)を含む右脚43筋(図1、Hill-typeモデル)から構成される筋骨格モデル(Zajac, 1989)を用いて、逆動力学計算および最適化計算を行うことで、走動作中の筋腱ダイナミクスを算出した。計算に必要な筋の最大張力、羽状角、腱の自然長などのパラメータは、先行研究(Delp et al., 2007; Hamner et al., 2010)を参考にして算出した。さらに外部腱、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(図2)、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の部位差を検討した。

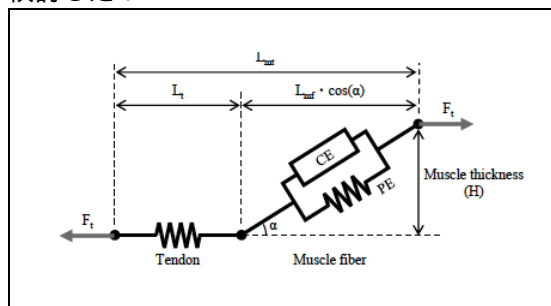


図1 解析に用いる Hill-type 筋モデル

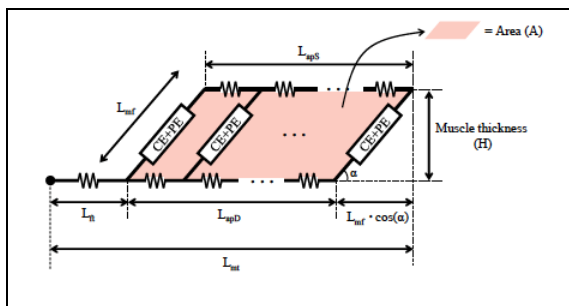


図2 複数の筋線維を有する筋モデル

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、筋間差が認められた(図3)。具体的には、筋張力の最大値はSMが最大であり、剪断応力の最大値はBF1hが最大であった。BF1hとSTの筋張力や剪断応力が最大となるタイミングは、SMと比べて早かった。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(筋活性度を100%とした際の筋張力)は、遊脚期後半の前半部分(図3の50~75%)ではBF1hとSMがSTより大きいことが明らかとなった。

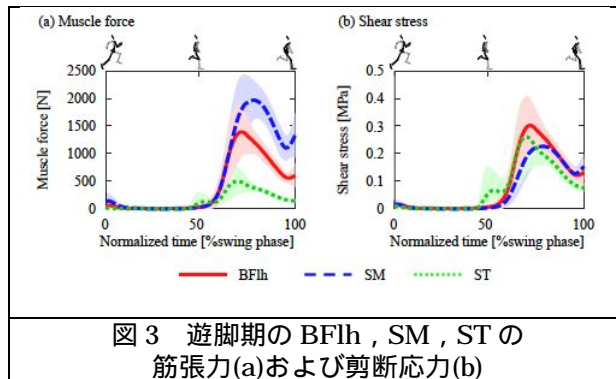


図3 遊脚期のBF1h, SM, STの筋張力(a)および剪断応力(b)

図3に示す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、筋骨格モデルを構成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。また筋張力の発揮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を構成する筋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、ハムストリングス肉離れの受傷リスクに筋間差がある要因として、筋の構造的・機械的特性が大きく影響していると考えられる。さらに、複数の筋線維を有する筋モデル(図2)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かを検討した結果、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、外部腱に近いほど大きくなることが明らかになった。これらの結果は、ハムストリングス肉離れが、BF1hの近位部、かつより外部腱に近い筋腱移行部で好発することの要因を示すものと考えられる。

(3)筋腱の構造的・機械的特性の違いが筋腱ダイナミクスやその筋間差に及ぼす影響

上述の(2)では、先行研究をもとに算出した筋腱パラメータをもとにしてハムストリングスの筋腱ダイナミクスを算出した。しかし、ヒトはそれぞれ最大等尺性発揮張力が異なり、腱の自然長なども異なる。そこで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。具体的には、走動作中遊脚期におけるハムストリングスの筋線維と腱膜の接触面に加わる剪断応力(図3(b)に示す Shear stress)に影響する筋腱の構造的・機械的特性を明らかにし、その筋腱ダイナミクスへの影響機序を検討した。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、羽状角などを基準値から変動させたモデルを構築し、それぞれのモデルを用いてハムストリングスの筋腱ダイナミクスを算出した。図4は一例として、BF1hの筋線維の至適長を-10%~+20%で変動させた結果を示している。その結果、筋張力と剪断応力の筋間差(大小関係)は、48の変動条件のうち、(2)で得られた筋間差と46条件で同様であった。また、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、そのほかの羽状角などの筋腱パラメータと比較して大きかった。

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いた。図5は、BF1hの筋

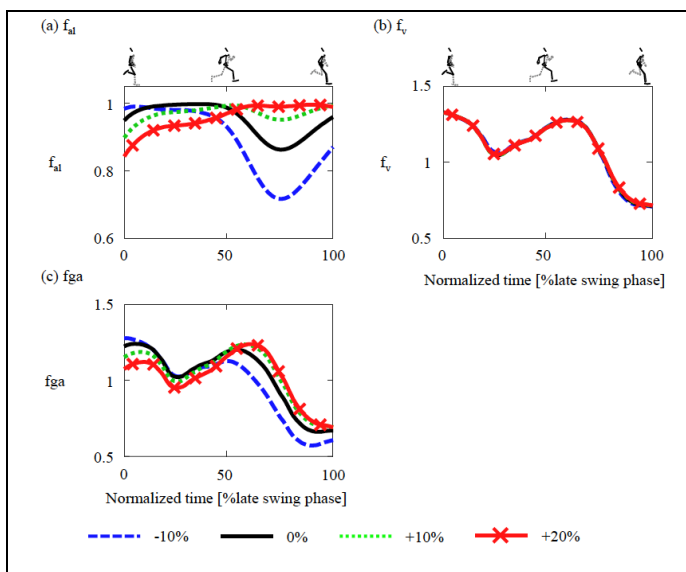


図4 遊脚期後半のBF1h筋線維の至適長変化が張力発揮特性に及ぼす影響。張力-長さ特性(a), 張力-速度特性(b), 力発揮ポテンシャル(c)

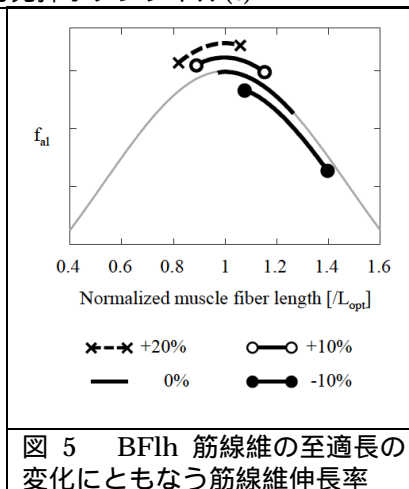


図5 BF1h筋線維の至適長の変化にともなう筋線維伸長率

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いた。図5は、BF1hの筋

線維の至適長を-10%~+20%で変動させた場合の至適長に対する筋線維長の比率（筋線維伸長率）の変動範囲（最小値 - 最大値）を示している。至適長が長くなるにしたがい（-10% 0% +10% +20%），筋線維伸長率の移動範囲はより左側に移動し，+10%や+20%では至適長近傍（横軸の1付近）で変動している。この変動が，図4(a)に示す張力-長さ特性の変化に繋がったと考えられる。

#### (4) 走動作の特徴が筋腱ダイナミクスやその筋間差に及ぼす影響

上述(2)や(3)においては，研究対象者間の走動作の相違についてまでは検討していない。そこで，ハムストリングスの筋腱ダイナミクスに大きく影響すると考えられる骨盤 - 下肢関節の角度を変動させた仮想的な走動作を作成し（図6），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。

その結果，BFlh と SM 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，膝関節の屈曲伸展軸における関節角度，角速度が最も大きい変動要因であることが明らかとなった。このような動作の変化は，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ていた。このとき，BFlh と SM の一方の筋腱長および筋腱伸長速度を選択的に増減させる動作は抽出できなかった。さらに，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影響する骨盤や下肢関節の角度変化などの動作的特徴の影響は抽出できなかった。

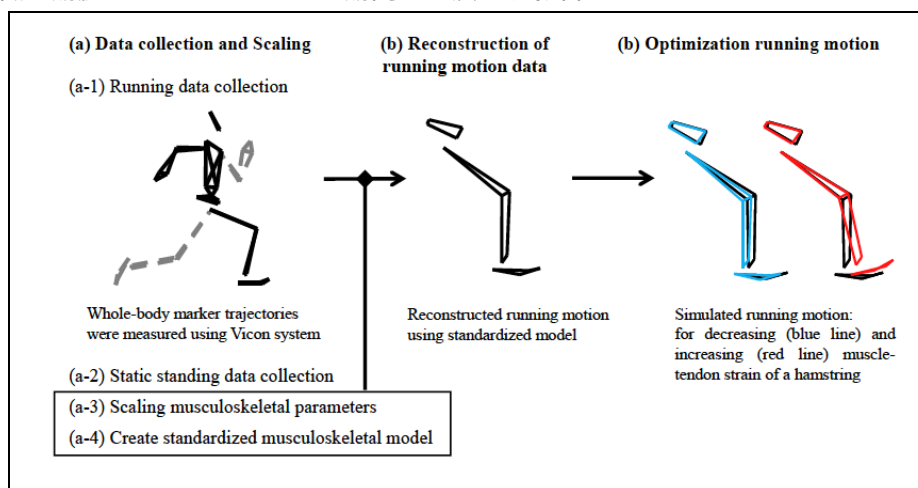


図6 仮想的な走動作の作成

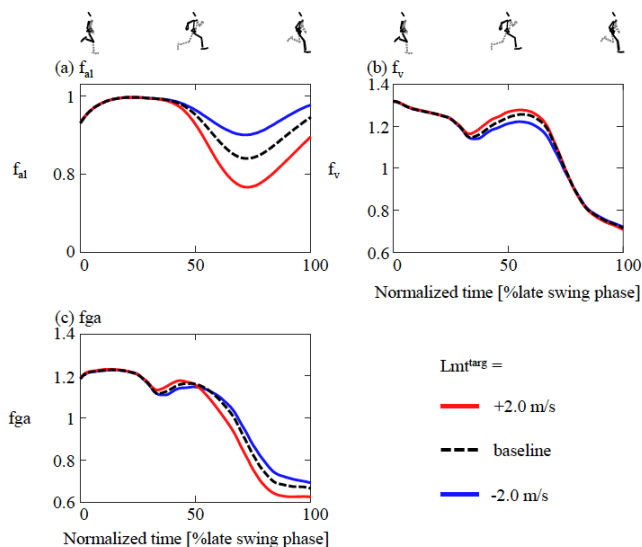


図7 BFlh の筋腱伸長・短縮速度の増減による筋腱ダイナミクスの変化。張力-長さ特性(a)，張力-速度特性(b)，力発揮ポテンシャル(c)

#### (5) 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の提示

上述の(2)~(4)で得られた結果をもとに，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。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した。具体的には，ハムストリングス肉離れがBFlhで好発することの一つの要因として，ハムストリングスの構造的・機械的特性の筋間差であること，また膝関節の伸展角速度がハムストリングスの伸長速度に最も大きく影響していることが考えられた。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，さらに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。

#### 4. 研究成果

本研究の結果をまとめると，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腱ダイナミクスの筋間差が生じ，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筋間差を生じさせる大きな要因である

こと、3) 骨盤や股関節の動きよりも、膝関節の屈曲伸展軸における動作変化による影響がより大きかったこと、などが明らかとなった。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の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を明らかにすることができた。

さらにハムストリングス肉離れの受傷リスクの評価や予防トレーニングへの示唆を抽出するためには、ハムストリングス肉離れの受傷リスクに関わる潜在的な要因であると考えられる筋腱の構造的・機械的特性とキネマティクスの特徴を抽出した。これらに関して、個々の選手の特性を評価することが、ハムストリングス肉離れの受傷リスクの評価や予防トレーニングに必要であると考えられる。そのため、超音波画像診断装置、磁気共鳴画像診断装置 (MRI)、および力計測器を用いて筋腱の構造的・機械的特性を評価し、三次元動作分析装置、ハイスピードカメラ、および表面筋電計から走動作の特徴や走動作中のハムストリングスの表面筋電図を評価することが必要であろう。なお、2022 年度に実施を計画していた全力疾走からの減速期における筋腱ダイナミクスについては、研究対象者を増やすことができたが、分析して結果をまとめるまでには至らなかったことは反省点である。

#### <引用文献>

- Ahmad, C.S., Dick, R.W., Snell, E., Kenney, N.D., Curriero, F.C., Pollack, K., Albright, J.P., Mandelbaum, B.R., 2014. Major and minor league baseball hamstring injuries: Epidemiologic findings from the major league baseball injury surveillance system. *American Journal of Sports Medicine* 42, 1464-1470.
- Brooks, J.H.M., Fuller, C.W., Kemp, S.P.T., Reddin, D.B., 2006. Incidence, risk, and prevention of hamstring muscle injuries in professional rugby union. *American Journal of Sports Medicine* 34, 1297-1306.
- Kokubu, T., Mifune, Y., Kanzaki, N., Hoshino, Y., Kakutani, K., Inui, A., Hashimoto, S., Kuroda, R., 2020. Muscle Strains in the Lower Extremity of Japanese Professional Baseball Players. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 8, 1-7.
- Woods, C., Hawkins, R.D., Maltby, S., Hulse, M., Thomas, A., Hodson, A., 2004. The Football Association Medical Research Programme: an audit of injuries in professional football - analysis of hamstring injuries. *British Journal of Sports Medicine* 38, 36-41.
- Orchard, J., Seward, H., 2002. League, seasons 1997 - 2000. *British Journal of Sports Medicine* 36, 39-45.
- Schache, A.G., Dorn, T.W., Blanch, P.D., Brown, N.A.T., Pandy, M.G., 2012. Mechanics of the human hamstring muscles during sprinting. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 44, 647-658.
- Thelen, D.G., Chumanov, E.S., Best, T.M., Swanson, S.C., Heiderscheit, B.C., 2005. Simulation of biceps femoris musculotendon mechanics during the swing phase of sprinting. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 37, 1931-1938.
- Yu, B., Queen, R.M., Abbey, A.N., Liu, Y., Moorman, C.T., Garrett, W.E., 2008. Hamstring muscle kinematics and activation during overground sprinting. *Journal of Biomechanics* 41, 3121-3126.
- Okoroha, K.R., Conte, S., Makhni, E.C., Lizzio, V.A., Camp, C.L., Li, B., Ahmad, C.S., 2019. Hamstring Injury Trends in Major and Minor League Baseball: Epidemiological Findings From the Major League Baseball Health and Injury Tracking System. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 7, 1-7.
- Delp, S.L., Anderson, F.C., Arnold, A.S., Loan, P., Habib, A., John, C.T., Guendelman, E., Thelen, D.G., 2007. OpenSim: open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 54, 1940-1950.
- Hamner, S.R., Seth, A., Delp, S.L., 2010. Muscle contributions to propulsion and support during running. *Journal of Biomechanics* 43, 2709-2716.
- Zajac, F.E., 1989. Muscle and tendon: properties, models, scaling, and application to biomechanics and motor control. *Critical Reviews in Biomedical Engineering* 17, 359-411.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 宮崎輝光, 藤井範久	4. 巻 45
2. 論文標題 筋厚変化を考慮した筋モデルが走動作中における大腿二頭筋長頭の筋線維動態に及ぼす影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 バイオメカニズム学会誌	6. 最初と最後の頁 179-187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3951/sobim.45.3_179	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 宮崎輝光, 藤井範久	4. 巻 25
2. 論文標題 走動作中遊脚期後半における大腿二頭筋長頭と半膜様筋の筋腱移行部に加わる剪断応力	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 バイオメカニズム	6. 最初と最後の頁 97-111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3951/biomechanisms.25.97	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Miyazaki Terumitsu, Fujii Norihisa	4. 巻 -
2. 論文標題 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	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sports Biomechanics	6. 最初と最後の頁 1~16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/14763141.2022.2140070	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Terumitsu MIYAZAKI, Norihisa Fujii
2. 発表標題 Influence of pelvic and lower limb joint kinematics on hamstring muscle-tendon strain during the late swing phase of maximal speed sprinting
3. 学会等名 XXIX Congress of the International Society of Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮崎輝光, 藤井範久
2. 発表標題 走動作中のハムストリングスにおける伸張性収縮状態の力発揮に対する腱組織の長さ変化の影響
3. 学会等名 第42回バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Terumitsu MIYAZAKI, Norihisa Fujii
2. 発表標題 Optimization of the whole-body motion to minimize the muscle-tendon length of biceps femoris long head during the late swing phase of high-speed running
3. 学会等名 XXVIII Congress of the International Society of Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮崎輝光, 藤井範久
2. 発表標題 走動作中遊脚期後半における大腿二頭筋長頭の筋腱動態に影響する下肢関節運動
3. 学会等名 第26回日本バイオメカニクス学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮崎輝光, 藤井範久
2. 発表標題 走動作遊脚期後半におけるハムストリングスの筋腱動態を変動させる下肢関節運動
3. 学会等名 第41回バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Terumitsu MIYAZAKI, Norihisa Fujii
2. 発表標題 A comparison of hamstring musculotendon dynamics during high-speed running before and after a fatigue exercise
3. 学会等名 38th International Conference on Biomechanics in Sports (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	宮崎 輝光  (Miyazaki Terumitsu)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------