

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K17865

研究課題名(和文)ハムストリングス肉離れ受傷後の中枢神経機構の変化分析

研究課題名(英文)Change in neuromuscular function following return to sports after a hamstring muscle strain injury

研究代表者

東原 綾子(Higashihara, Ayako)

慶應義塾大学・体育研究所(日吉)・助教

研究者番号：90724237

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文):本研究では、肉離れ受傷筋における筋活動動態や皮質脊髄路の興奮性を評価し、肉離れ受傷既往が末梢・中枢神経系を含めた神経筋の運動制御機構に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、以下の成果を得た。

(1)ハムストリングス肉離れ既往歴を有するアスリートは、競技復帰後であっても既往のあるハムストリングス自体の筋機能や伸張性が十分回復していない可能性があることが示唆され、受傷後のリハビリテーションにおけるハムストリングスおよびその周囲筋の筋機能評価の重要性が示された。

(2)皮質脊髄路の神経動員特性の評価を試み、これまで評価されてこなかったハムストリングスの神経-筋制御機能を評価できる可能性が見出された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ハムストリングス肉離れはスポーツ競技を問わず発生率が高く、さらに再発率が高いことからスポーツ選手の競技力低下に大きな影響をもたらす。この受傷・再受傷リスク因子を明らかにし、効果的な予防策を講じることはアスリートのパフォーマンス向上に大きく寄与するばかりか、一般のスポーツ愛好者にとっても健康的なスポーツ活動の継続が期待される。本研究では、運動指令の結果として生じる筋活動や動作特性の分析のみならず、筋出力を調整し、動作を生み出す神経-筋制御特性に着目することで、未だ全容がつかめていないハムストリングス肉離れ再受傷リスク要因の解明に大きく貢献できる。

研究成果の概要(英文):This study aimed to investigate the function of the hamstrings following injury and the recruitment properties of the corticospinal pathway of thigh muscles. In the case of some athletes, the function of the hamstring and its agonist muscles following injury may not have been entirely recovered despite rehabilitation, suggesting the importance of accurately evaluating the function of the hamstring muscles in rehabilitation practices. In addition, the recruitment properties of the corticospinal pathway in thigh muscles were clarified. These findings can aid the development of training approaches for athletes, to improve motor function or prevent injury through a better understanding of neuromuscular characteristics contributing to thigh muscle function. Future studies should determine whether these activation deficits after hamstring strain injury are a risk factor for reinjury to better understand the mechanisms of neuromuscular inhibition, including the central nervous system.

研究分野：スポーツ科学

キーワード：スポーツ外傷 肉離れ ハムストリングス 筋活動 筋腱長 皮質脊髄路興奮性 大腿二頭筋

1. 研究開始当初の背景

ハムストリングスは大腿後面に存在し、ヒトの身体運動において重要な役割を担う筋群である。この筋群に多く発生するスポーツ外傷である「ハムストリングス肉離れ」はスポーツ競技を問わず発生率が高い。トップアスリートが受傷する肉離れのうち約43% (奥脇, 2017)と最も高い割合で発生し、さらにその再発率の高さ(約31%: Orchard and Best, 2002)からスポーツ選手の競技力低下に大きな影響をもたらす。したがって、その受傷予防は近年のスポーツ医学分野において重要な研究テーマといえ、過去20年以上にわたりハムストリングスの肉離れの受傷・再受傷リスク要因解明のために多くの研究が行われてきた。

ハムストリングス肉離れは、活動中の筋が通常の長さ以上に引き伸ばされたときに発生する (Friden and Lieber, 2001)。このような受傷メカニズムから、筋が伸ばされながら収縮する伸張性収縮時の筋力低下が受傷リスクを高めるが、これに対応した筋力強化トレーニングによって発症率は半減することが示されており (Opar et al., 2015a)、科学的根拠に基づいた予防プログラムの普及が期待されている。しかし依然としてハムストリングス肉離れ受傷率は高く、欧州サッカーリーグにおける調査によると、2001年から13年間にわたる受傷数はむしろ毎年4%の割合で増加している (Ekstrand et al., 2016)。その要因として、高いトレーニング強度 (Goode et al., 2015) や予防プログラム実施率の低さ (Bahr et al., 2016) が指摘されているが、受傷・再受傷リスク因子やメカニズムの解明自体にまだ課題が残っていると考えられる。

ハムストリングス肉離れの再受傷率が高い原因として、肉離れ受傷後に起こる筋機能低下が挙げられ、過去の受傷による神経筋ダメージにより運動制御に重要な役割を担う中枢神経系に生じる不適応が寄与していると推測されている (Fyfe et al., 2013)。しかし、実際のスポーツ動作において、特に、肉離れが多く発生するスプリント動作や体幹制御動作時における肉離れ既往の影響は不明であった。さらに、先行研究によると肉離れ受傷後の受傷脚のみならず対側脚においても筋機能低下が確認されている (Opar et al., 2015b) ことから、肉離れ受傷は中枢神経系に何らかの影響を及ぼしていると考えられる。しかし、これらの詳細は報告されておらず、神経-筋制御の観点から肉離れ受傷の影響やその原因となるメカニズムを明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、肉離れ受傷筋における筋活動動態や脳から筋に至る皮質脊髄路の興奮性を評価し、肉離れ受傷既往が末梢および中枢神経系を含めた神経筋の運動制御機構に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、以下の研究を実施した。

【研究1】ハムストリングス肉離れ既往がスプリント時の大腿二頭筋筋機能に及ぼす影響

ハムストリングス肉離れはスプリント動作時に多く発生する外傷である。本研究では、過去の肉離れ既往がスプリント動作時の大腿二頭筋筋機能に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

【研究2】ハムストリングス肉離れ既往者における体幹運動制御特性の解明

スポーツ活動時の急激な切りえし返し動作・ストップ動作では選手の予測に反する外乱に対する適切な体幹の運動制御が必要となり、体幹運動制御能力はハムストリングス肉離れ受傷と密接に関連することが明らかになっている。本研究では、ハムストリングス肉離れ受傷既往を有するスポーツ選手の体幹制御運動特性およびハムストリングスを含めた骨盤周囲筋の活動特性を明らかにし、受傷後のトレーニングに関する提言を得ることを目的とした。

【研究3】大腿二頭筋および大腿直筋における皮質脊髄路興奮性の分析

肉離れ既往脚における筋活動の低下には、末梢(筋)の機能不全のみならず運動制御に重要な中枢神経系の変容による神経筋機能低下が影響している可能性がある。しかし、これらの因果関係は実証されていない。本研究では、ハムストリングス肉離れ受傷における神経-筋制御機構の寄与の可能性について、神経生理学的アプローチを用いることにより解明を試みることを目的とし、その前段階としてまずは大腿部筋(大腿二頭筋および大腿直筋)における皮質脊髄路興奮性の評価を行い、2筋の皮質脊髄路入出力特性を明らかにすることを目的とした。

【研究4】ハムストリングスと大腿四頭筋における筋力比と皮質脊髄路入出力特性との関連

大腿部の筋機能評価としてハムストリングスと大腿四頭筋の筋力バランス(Torque H/Q)が用いられるが、運動制御に重要な役割を担う皮質脊髄路入出力特性との関連は明らかでない。本研究の目的は、大腿二頭筋および大腿直筋における皮質脊髄路入出力特性(I0)の比を算出し、Torque H/Qとの関係を明らかにすることとした。

3. 研究の方法

【研究1】

片側のハムストリングス肉離れ既往を有する陸上短距離走選手10名を対象に、屋内陸上走路上を最大努力で疾走した際の大腿二頭筋の筋活動を計測した。また、スプリント動作の三次元動作計測を行い、1ストライド(脚の接地から再び同側の脚が接地するまで)の関節角度(骨盤・股関節・膝関節)および大腿二頭筋長頭の筋-腱長を算出した。各データを既往脚および非既往脚

において算出し、健患側比較を行った。

【研究2】

下肢の既往歴を有さない男性スポーツ選手 10 名（健常群） ハムストリングス肉離れ受傷既往を有する男性スポーツ選手 11 名（既往群）を対象とし、胸部後面における後方牽引を予測下・非予測下で解除することにより体幹部に前方方向の外乱を与えた（図1）。その際の体幹加速度、体幹前傾・骨盤前傾・股関節屈曲・膝屈曲角度、および大腿二頭筋・半腱様筋・大殿筋・脊柱起立筋・内腹斜筋の筋活動潜時および外乱付与後の筋活動量を算出し、これらのパラメータについて、外乱予測条件、または非予測条件における差異を両群で比較した。

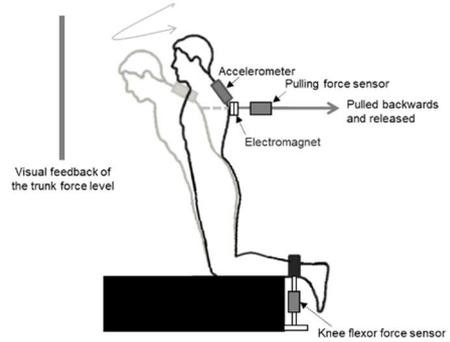


図1. 研究2の実験模式図

【研究3】

大腿筋（大腿二頭筋および大腿直筋）において皮質脊髄路興奮性の評価を試みた。健常成人男性 32 名を対象とし、経頭蓋磁気刺激（TMS）を用いて大腿二頭筋および大腿直筋における刺激 応答曲線を取得し、皮質脊髄路興奮性調節の指標である最大傾斜、定常値、閾値の3つのパラメータを算出した（図2）。

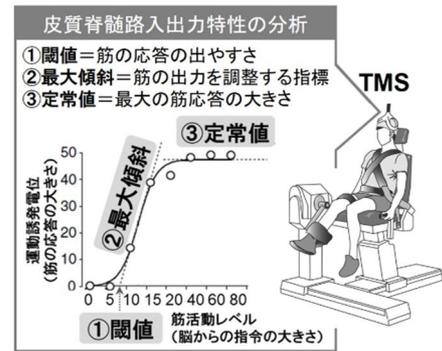


図2 TMS実験図と各指標の意味

【研究4】

成人男性 32 名の右脚を対象とし、BIODEX を用いて座位にて等速性膝関節屈曲・伸展運動(60deg/s)を行い、Torque H/Q を算出した。最大随意筋活動の20%に相当する筋活動レベルで等尺性膝屈曲または伸展を行い、それぞれの課題時に左一次運動野に経頭蓋磁気刺激を与え、各筋において運動誘発電位の振幅から入出力曲線における最大傾斜を算出することで、BF のRF に対する比率 (10 H/Q) を求め、Torque H/Q との関連を検討した。

4. 研究成果

【研究1】

スプリント動作時のハムストリングス筋腱長は、遊脚期後半（図3）で最も伸張される。この遊脚期後半において、既往脚の膝関節屈曲角度が非既往脚と比較して有意に大きく、大腿二頭筋筋腱長は有意に短かった（図4A）。また、ハムストリングス肉離れ既往脚の大腿二頭筋の筋活動が有意に低かった（図4B）。本結果から、過去にハムストリングス肉離れを受傷した脚では、スプリント動作の中でハムストリングスが最も伸張される局面において筋の伸張を避けた動作や筋活動低下

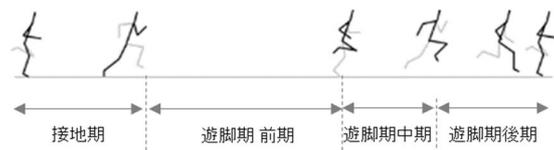


図3. 1ストライドにおける動作局面

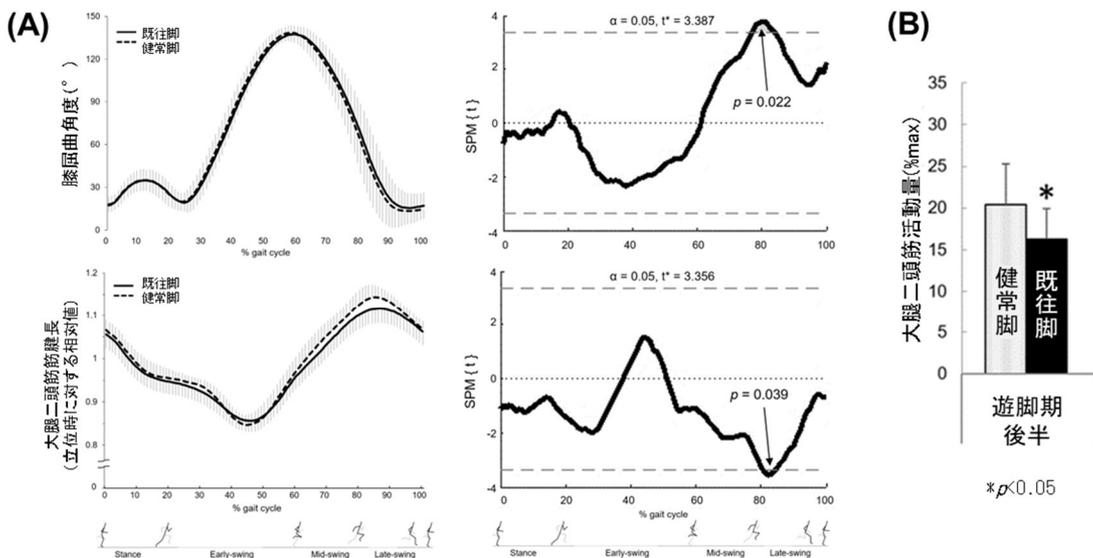


図4. (A)1ストライドにおける膝屈曲角度と大腿二頭筋筋腱長の比較、(B)遊脚期後半における大腿二頭筋の筋活動量

が認められることが明らかとなった。つまり、競技復帰後であっても既往のあるハムストリングス自体の筋機能や伸張性が十分回復していない可能性が示唆され、ハムストリングス肉離れ受傷後のリハビリテーションにおける筋機能評価の重要性を示唆するものであった。

本研究成果は以下の雑誌論文において発表した。

Higashihara, A., Ono, T., Tokutake, G., Kuramochi, R., Kunita, Y., Nagano, Y., & Hirose, N. (2019). Hamstring muscles' function deficit during overground sprinting in track and field athletes with a history of strain injury. *J Sports Sci*, 37(23), 2744-2750. doi:10.1080/02640414.2019.1664030

【研究2】

ハムストリングス肉離れ既往群、非既往群ともに非予測条件下における体幹加速度および体幹前傾変位量が予測条件下と比較して有意に高かった。既往群において、大殿筋と脊柱起立筋の筋活動開始時間が有意に遅延していた(図5)。外乱付与後の筋活動量については両群ともに条件による有意な差は認められなかった。

本結果より、ハムストリングス肉離れ既往を有する選手は、非予測的な外乱が体幹部に加わった際に、体幹・骨盤制御に関わる筋の活動開始時間が有意に遅延することを明らかになった。この筋活動開始時間の遅延は、骨盤や体幹部の制御動態に影響を与える可能性が高いことから、ハムストリングス肉離れ受傷後のリハビリテーションにおいては受傷筋のみならず協働筋も含めた包括的な機能回復を目指す必要があることが示唆された。

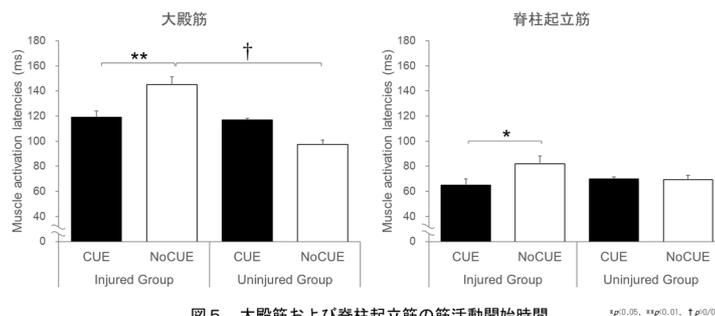


図5. 大殿筋および脊柱起立筋の筋活動開始時間 * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, † $p < 0.05$

本研究成果は以下の雑誌論文において発表した。

Higashihara, A., Mendiguchia, J., Ono, T., Nagano, Y., Sasaki, S., Mineta, S., & Hirose, N. (2022). Neuromuscular responses of the hamstring and lumbopelvic muscles during unanticipated trunk perturbations. *J Sports Sci*, 40(4), 431-441. doi:10.1080/02640414.2021.1996986

【研究3】

大腿直筋の刺激応答曲線の定常値、最大傾斜、および閾値は大腿二頭筋と比較して有意に高かった(図6)。このことから、大腿直筋は大腿二頭筋に比べ運動単位の活動動員を急激に増加させることで力を発揮することができる、つまり、大腿直筋は大腿二頭筋に比べ、脳からの同

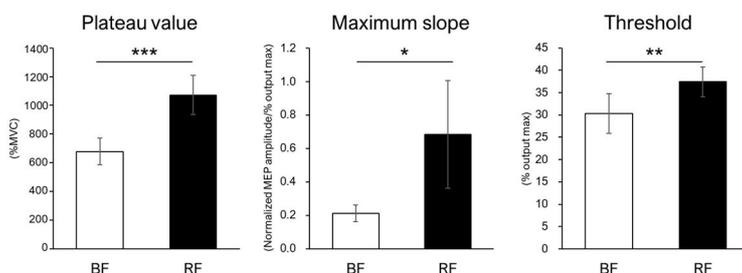


図6. 大腿二頭筋(BF)および大腿直筋(RF)における定常値、最大傾斜、閾値の比較

じ指令量に対して大きな力を出せることが示された。一方、大腿二頭筋は大きな力を発揮するために、より大きな、あるいはより同期した運動指令を必要とすることが示唆された。TMSを用いた皮質脊髄路における運動単位動員特性の評価は随意運動時の動員特性に類似していることが示されており、本研究の結果から、スポーツ活動で多く経験する瞬間的な最大筋力発揮時の神経動員特性が大腿部の前面と後面の筋で大きく異なることが明らかとなった。これらの知見は、大腿筋機能に寄与する神経筋特性をより深く理解することで、運動機能の向上や傷害予防のためのアスリート向けトレーニング手法の開発に役立つと考えられる。

本研究成果は以下の雑誌論文において発表した。

Higashihara, A., Nakagawa, K., Fitatsubashi, G., Sekiguchi, H., Nagano, Y., & Hirose, N. (2022). Differences in the recruitment properties of the corticospinal pathway between the biceps femoris and rectus femoris muscles. *Brain Res*, Accepted for publication.

【研究4】

IO H/Q と Torque H/Q の間に有意な相関関係は認められなかった。ハムストリングスと大腿四頭筋の筋力比が同程度であっても、筋出力の調整に関わる神経動員特性のバランスに個人差があり、筋力比とは同様の傾向を示さないことが明らかとなった(図7)。つまり、ハムストリングス肉離れ受傷リスク評価の一つとしてスポーツ現場で実施されている大腿部の最大筋力評価は、瞬間的に最大筋力を発揮する際の神経動員特性を反映していない可能性が示唆された。事実、大腿部の筋力バランスとハムストリングス肉離れ受傷との関係性は低いことが近年報告されている(Green et al., 2018)。スポーツ動作時に発生するハムストリングス肉離れは、様々なレベルで筋出力調整する状況下で生じることから、本研究結果は怪我の発生メカニズムを神経生理学的側面から考察する上で非常に重要な視点となる。上述の我々の研究成果により、従来の最大筋力評価に加えて、新たにハムストリングスにおける皮質脊髄路の神経動員特性を評価できる可能性が見出された。

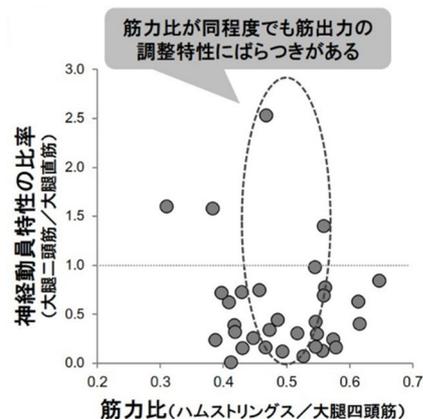


図7 大腿部筋の筋力比と神経動員特性の比率の関係

上述の我々の研究成果により、従来の最大筋力評価に加えて、新たにハムストリングスにおける皮質脊髄路の神経動員特性を評価できる可能性が見出された。

これらの研究により、以下の成果が得られた。

(1) ハムストリングス肉離れ既往歴を有するアスリートは、競技復帰後であっても既往のあるハムストリングス自体の筋機能や伸張性が十分回復していない可能性があることが示唆され、ハムストリングス肉離れ受傷後のリハビリテーションにおけるハムストリングスおよびその周囲筋の筋機能評価の重要性が示された。

(2) 従来スポーツ現場で実践されている最大筋力評価に加え、皮質脊髄路の神経動員特性の評価を試み、これまで評価されてこなかったハムストリングスの神経筋制御機能を評価できる可能性が見出された。

研究開始当初の目標であった、ハムストリングス肉離れ受傷既往を有するアスリートを対象とした大腿部筋における皮質脊髄路興奮性の計測については、現在データ分析中であり、研究期間中に完了することはできなかった。しかし、受傷筋の活動制御特性を明らかにするためには今後多くのデータを蓄積していく必要があり、引き続き受傷筋の神経筋活動低下に至る神経生理学的機序の解明に向けた検証を継続していく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Higashihara Ayako, Nakagawa Kento, Inami Takayuki, Fukano Mako, Iizuka Satoshi, Maemichi Toshihiro, Hashizume Satoru, Narita Takaya, Hirose Norikazu	4. 巻 15
2. 論文標題 Regional differences in hamstring muscle damage after a marathon	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0234401
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0234401	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 Higashihara Ayako, Ono Takashi, Tokutake Gaku, Kuramochi Rieko, Kunita Yasuhiro, Nagano Yasuharu, Hirose Norikazu	4. 巻 37
2. 論文標題 Hamstring muscles' function deficit during overground sprinting in track and field athletes with a history of strain injury	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Sports Sciences	6. 最初と最後の頁 2744 ~ 2750
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/02640414.2019.1664030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Higashihara Ayako, Mendiguchia Jurdan, Ono Takashi, Nagano Yasuharu, Sasaki Shogo, Mineta Shinshiro, Hirose Norikazu	4. 巻 40
2. 論文標題 Neuromuscular responses of the hamstring and lumbopelvic muscles during unanticipated trunk perturbations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Sports Sciences	6. 最初と最後の頁 431 ~ 441
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/02640414.2021.1996986	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Higashihara, A., Nakagawa, K., Fitatsubashi, G., Sekiguchi, H., Nagano, Y., & Hirose, N.	4. 巻 -
2. 論文標題 Differences in the recruitment properties of the corticospinal pathway between the biceps femoris and rectus femoris muscles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Brain Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 東原綾子、二橋元紀、関口浩文、中川剣人、広瀬統一
2. 発表標題 ハムストリングスと大腿四頭筋における筋力比と皮質脊髄路入出力特性との関連
3. 学会等名 日本体力医学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Higashihara, J Mendiguchia, T Ono, Y Nagano, S Sasaki, S Mineta, N Hirose
2. 発表標題 Neuromuscular responses of the hamstring and trunk muscles during unanticipated trunk perturbations
3. 学会等名 IOC World Conference on Prevention of Injury & Illness in Sport (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Higashihara A, Ono T, Tokutake G, Kuramochi R, Kunita Y, Nagano Y, Hirose N
2. 発表標題 The kinematics of overground sprinting in track and field athletes with previous hamstring injuries.
3. 学会等名 36th International Conference on Biomechanics in Sports (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 東原綾子, 小野高志, 徳武岳, 倉持梨恵子, 國田泰弘, 永野康治, 広瀬統一
2. 発表標題 ハムストリングス肉離れ既往脚におけるスプリント時の股関節伸展筋の筋活動および走動作特性
3. 学会等名 第29回日本臨床スポーツ医学会学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Higashihara A, Nakagawa K, Inami T, Fukano M, Hashizume S, Iizuka S, Maemichi T, Narita T, Hirose N
2. 発表標題 Regional differences in damage among the hamstring muscles after a full marathon
3. 学会等名 24th Annual Congress of the European College of Sport Science (国際学会)
4. 発表年 2019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

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		
スペイン	Zentrum	Rehabilitation and Performance Center	