

令和元年5月11日現在

機関番号：32619

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H05918

研究課題名(和文)筋疲労の機序の解明 - 超音波剪断波エラストグラフィを用いたアプローチ -

研究課題名(英文)Clarification of the mechanism of muscle fatigue: a shear wave ultrasound elastography study

研究代表者

赤木 亮太 (Akagi, Ryota)

芝浦工業大学・システム理工学部・准教授

研究者番号：20581458

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 22,000,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトの骨格筋はどのように疲れを抱えるのか、そして、どのように疲労を軽減しようとしているのか。その機序を知るために進めた本研究では、特に低強度の運動時の疲労に関して、以下の知見を得ることができた。1)いくつかの筋がお互いに協力し合いながら力を発揮する場合、疲労しやすい筋は休む回数が多くなり、それでも回復せずに疲れをためていく。2)女性の骨格筋の方が疲れにくい理由として、協力し合う複数の筋の内の特定の筋の疲れにくさの違いが影響している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、超音波剪断波エラストグラフィ(SWE)法という新しい手法を用いて、これまで長年に亘って果たされていない筋疲労の機序の全容解明に向けて取り組んだ。実際に骨格筋を疲労させるにあたり、低強度で長く運動させた場合と、強度を高くして短い運動で疲労させた場合とでは、SWE法の適用可否が異なってしまったが、少なくとも前者の運動に関しては、これまで明らかにすることができなかった機序の一端を掴むことができた。人々が日頃から疲労感を感じず、充実した生活を送るためには、疲れに強い体作りや日常のケアの方法を確立することが不可欠である。そのような面で、今回得られた知見が役立つことを期待する。

研究成果の概要(英文)：When performing sustained low-intensity contractions, the two findings were obtained in this study as follows: 1) The difference in the extent of fatigue of each plantar flexor synergist corresponds to the difference in the frequency of alternate muscle activity between the synergists (the synergist muscles are activated in an alternating pattern of activity and silence). 2) The sex difference in fatigability of the knee extensors is explained by that in peripheral fatigue, particularly the degree of peripheral fatigue of the lateral vastus muscle.

研究分野：スポーツ科学

キーワード：筋剛性率 膝関節伸筋群 足関節底屈筋群 等尺性収縮 強度依存性 活動交代 末梢性疲労 中枢性疲労

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人々が日常生活を送る際、様々な場面において、負荷や刺激が加えられて疲労し、休息を取ることにより回復している。それ故、人々の疲労や疲労感に対する関心は非常に高い。このことは、身体運動を生み出す源である、骨格筋にも当てはまることである。

筋疲労は、身体運動によって骨格筋の力・パワー発揮能力が減退する現象 (Gandevia 2001)、筋の最大張力・最大パワーが低下する現象 (和田ら 2006)、あるいは筋が一定のパワーを継続して発揮できなくなる現象 (和田ら 2006) として定義される。筋疲労の機序について、これまで生理学的・生化学的視点から検討されてきた (Bigland-Ritchie 1981) もの、骨格筋を材料として捉えた視点が欠落していたため、その全容解明には至っていない。

近年、剪断波エラストグラフィ (SWE) 機能を有した超音波診断装置が開発され、骨格筋の機械的性質を、硬さの指標である剛性率 (あるいはヤング率) として定量されるようになってきた (Akagi et al., 2013, 2014 など)。一般的に、筋のコンディションが悪くなると硬くなると考えられており、コンディション評価に SWE 法が利用されている。このアイデアを筋疲労に適用すると、疲労時の筋の硬さを測定することにより、その疲労度合を観察できる可能性が示唆される。事実、筋は疲労している時に十分にリラックスすることができず、その結果、安静時にも張力が生み出される (Gong et al., 2000, 2003)。そして、筋の硬さの理論的なモデル (Dresner et al., 2001) に基づけば、この張力が大きいほど筋が硬くなると考えるのが理にかなっている。それ故、本研究では、筋の疲労度合を筋の剛性率により評価できると考え、研究を進めた。

また、ヒトの身体運動は、複数の筋が協力し合って生みだしていることを考慮すると、特定の筋だけではなく、複数の筋の疲労度合を同時に捉えることが、筋疲労の機序解明に向けて不可欠である。ここで、超音波診断装置がベースとなる SWE 法を用いれば、協働筋各筋の疲労度合を個別に評価できることが期待された。

2. 研究の目的

本研究では、筋疲労課題前後の筋の機械的性質の変化を、SWE 法により定量した骨格筋内部の硬さ、すなわち、筋剛性率によりモニタリングした。そのデータに、従来の筋疲労評価法で得られるデータを加味することで、筋疲労の機序の全容解明にチャレンジし、筋疲労低減/除去のための方策を新たに創出するための科学的根拠を獲得することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、マラソンや日常生活でのウォーキング等で求められるような「最大下努力での持続的な筋力発揮」、サッカーやバスケットボール等の球技競技で求められるような「最大努力での繰り返しの筋力発揮」を想定し、2 つの筋疲労課題に大別して研究を実施した。具体的には、前者として、全力の 10% に相当する強度で 1 時間力を発揮し続ける課題、全力の 20% に相当する強度で疲労困憊まで力を発揮し続ける課題、及び、全力の 40% に相当する強度で疲労困憊まで力を発揮し続ける課題を、後者として、全力で断続的に 80 回力を発揮する課題を設定して研究を進めた。本研究では、等尺性関節トルクを筋疲労の指標とし、末梢性疲労を電気刺激による誘発トルクや筋剛性率、M 波で、中枢性疲労を M 波で正規化した筋活動量や随意的動員度で評価することとした。

(1) 全力の 10% に相当する強度での疲労課題

若年男性 19 名に、全力の 10% に相当する強度で、等尺性足関節底屈筋力を 1 時間発揮し続ける課題を実施させた。この強度では、主な足関節底屈筋群である腓腹筋内側頭 (MG) 及び外側頭 (LG)、ヒラメ筋 (SOL) の 3 筋が、交互に活動・休息を繰り返しながら力発揮を継続させようとする「活動交代」(Tamaki et al. 1998, 2011 など) というシステムが観察されることが期待されるため、筋剛性率を用いて各筋の疲労度合を定量し、活動交代がどのようなメカニズムで行われているか検討した。

(2) 全力の 20% に相当する強度での疲労課題

若年男性 18 名、若年女性 23 名を対象に、全力の 20% に相当する強度での等尺性膝関節伸展筋力を、疲労困憊まで発揮し続けさせた。一般的に、筋疲労耐性は女性の方が男性よりも高い (Hunter, 2016) と言われているため、その性差の要因について、筋剛性率による膝関節伸展筋群各筋の疲労度合の定量化を通じて検討した。

(3) 全力の 40% に相当する強度での疲労課題

若年男性 24 名に、全力の 40% に相当する強度で、等尺性膝関節伸展筋力を疲労困憊まで発揮し続けさせる課題を実施させた。その際に観察される筋疲労耐性の個人差について、筋剛性率を含めた各変数の疲労課題前後の変化から説明できるかどうか検討した。

(4) 全力での疲労課題

若年男性 36 名に、等尺性足関節底屈筋力を、全力で 3 秒間、3 秒間隔で 80 回 (2 セット × 40 回: セット間に 1 分間の休憩) 発揮する課題を実施させた。その際に観察される筋疲労耐性の

個人差について、筋剛性率を含めた各変数の疲労課題前後の変化から説明できるかどうか検討した。

4. 研究成果

(1) 全力の10%に相当する強度での疲労課題（足関節底屈筋群）

19名中1名は疲労課題を最後まで遂行できず、また、活動交代不検出者が2名いた。そこで、それら3名を除いた16名を対象とした結果について説明する。

疲労課題前後の全力時の関節トルクは、約25%低下した。このことは、筋疲労に中枢性疲労も末梢性疲労も含まれていることを示唆するものであった。

M波で正規化した、疲労課題前後の筋活動量を見てみると、いずれの筋も、疲労課題後に有意に低下しているものの、疲労課題前後の双方で、有意な筋間差は認められなかった。このように、従来の評価手法では、どの筋も一様に疲労していた、と考えるのが妥当となる。しかしながら、疲労課題前後の筋剛性率を見てみると、MGのみ課題前よりも課題後に有意に増加し、また、課題後のMGの筋剛性率はSOLのそれよりも有意に高い値を示した。一方、疲労課題前は、各筋間に有意な差は認められなかった。この筋剛性率の視点を加えることで、当該疲労課題の実施に伴い、MGの疲労が顕著であったことが示唆される。

1時間の疲労課題中の様相については、活動交代が最も起きたのはMGで、その回数はSOLよりも有意に高い値となったこと（図1）、疲労課題中の筋活動量は、MG及びSOLが、LGよりも有意に高い値を示したことで、この2つが主な結果となった。これらの結果と、筋剛性率の結果を合わせて解釈すると、「低強度での持続的な等尺性足関節底屈トルク発揮中の活動量が多いMGとSOLの内、疲労耐性の低いMGにおいて、頻りに活動交代が発生し、疲労に伴う筋剛性率増加が顕著であった」となる。

以上のことから、その機序について不明な点が多かった活動交代について、筋剛性率の視点を加えることにより、新たな知見を獲得することができたといえる。

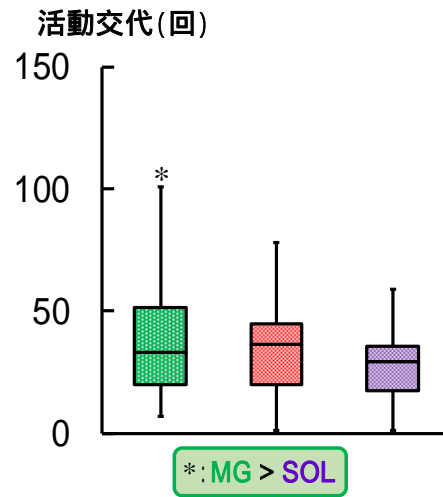


図1 全力の10%に相当する強度で等尺性足関節底屈筋力を1時間発揮し続けた際の、腓腹筋内側頭(MG)及び外側頭(LG)、ヒラメ筋(SOL)の活動交代の回数(n=16)

(2) 全力の20%に相当する強度での疲労課題（膝関節伸展筋群）

疲労課題前後の全力時の関節トルクは、男女ともに、疲労課題後に有意に低下した。男性では $44.5 \pm 15.0\%$ 低下したのに対し、女性では $32.4 \pm 16.8\%$ 低下し、男性の方が大きく低下する結果となった。このように、本研究は、一般的に言われている、女性の筋疲労耐性が男性よりも高い(Hunter, 2016)という考えを支持するものであった。そこで、各指標の内、疲労課題前後の変化の傾向に性差が観察されたものに絞って結果を列記する。

疲労課題前後の筋剛性率（図3）に関しては、外側広筋（VL）において、男女間でその変化に異なる傾向がみられた。男性では、疲労課題後に有意に増加したのに対し、女性では有意な変化はみられなかった。一方、大腿直筋（RF）及び内側広筋（VM）では、男女で異なる傾向は示さなかった。疲労課題前後の変化率（RF: $-3.4 \pm 19.6\%$ [男性], $-4.6 \pm 18.6\%$ [女性]; VL: $21.7 \pm 32.4\%$ [男性], $0.4 \pm 20.4\%$ [女性]; VM: $1.6 \pm 16.5\%$ [男性], $-0.8 \pm 14.2\%$ [女性]）には、筋 × 性の有意な交互作用が確認され、VLのみ、男性の変化率は女性の変化率よりも有意に高い値を示した。また、男性のVLの変化率は、RF及びVMよりも有意に高値となった一方、女性では、筋間に有意な差は認められなかった。その他の変数に関しては、末梢性因子にしても中枢性因子にしても、筋疲労に伴い変化しているものが多数見られたものの、筋疲労耐性の性差について説明し得るものはなか

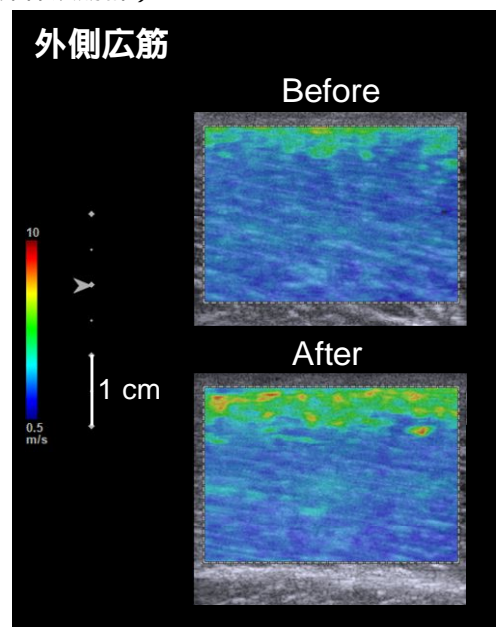


図2 全力の20%に相当する強度で等尺性膝関節伸展筋力を疲労困憊まで発揮し続けた前後での、外側広筋の超音波剪断波エラストグラフィ画像の典型例

った。以上の結果から、全力の 20%に相当する低強度での、持続的な膝関節伸展筋力発揮によってもたらされる筋疲労は、末梢性疲労・中枢性疲労の双方に影響されているものの、筋疲労耐性の性差に関しては、末梢性疲労、特に、VL の疲労度合いによって説明できることが示唆された。

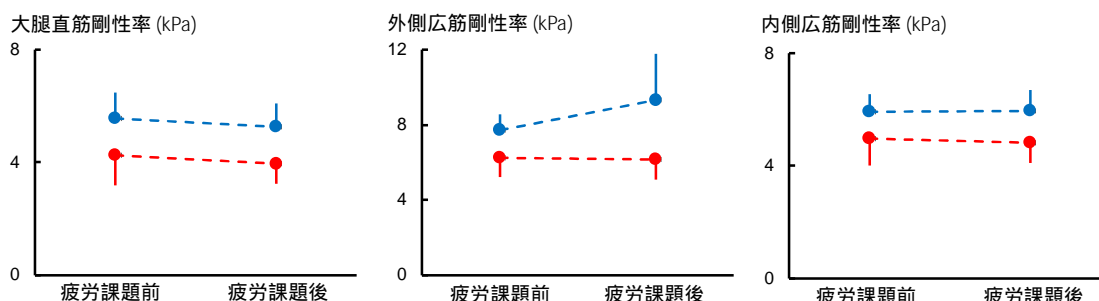


図 3 全力の 20%に相当する強度で等尺性膝関節伸展筋力を疲労困憊まで発揮し続けた前後での、大腿直筋、外側広筋及び内側広筋の剛性率 (青：男性，赤：女性)

(3) 全力の 40%に相当する強度での疲労課題 (膝関節伸展筋群)

疲労課題前の全力時の関節トルクは 184 ± 38 Nm、疲労課題後のそれは 127 ± 40 Nm と、疲労課題実施に伴い $32 \pm 11\%$ 、有意に低下した。同様に、誘発トルク (triplet トルク) も 76 ± 13 Nm (疲労課題前) から 47 ± 16 Nm (疲労課題後) と、 $39 \pm 15\%$ 、有意に低下した。一方、随意的動員度は、疲労課題前後で有意な変化がみられなかった。そして、関節トルクと誘発トルクの、疲労課題前後での変化率の関係を検討したところ、有意な正の相関がみられた (図 4)。以上の結果から、当該疲労課題でもたらされる筋疲労は、主に末梢性疲労であったことが推察される。

そこで、筋剛性率の変化を確認したところ、RF、VL、VM いずれの筋においても、疲労課題前後で有意な変化は認められなかった。しかしながら、全力時の関節トルクと VL の筋剛性率の間には、疲労課題前後での変化率に有意な正の関係が認められた (図 5)。このことは、相関関係だけを見ても、VL の疲労度合いの個人差が、筋疲労度合いの個人差に影響を及ぼした可能性が示唆される。この可能性に基づけば、今回の剛性率には、筋疲労以外の要因、例えば、筋の温度や血流の影響が反映されていて、その結果、疲労課題前後で VL の筋剛性率は有意に増加しなかったかもしれない。この点については、今後、さらなる研究を進め、詳細に検討する必要がある。

(4) 全力での疲労課題 (足関節底屈筋群)

疲労課題直後のデータの再現性を考慮し、本研究では、疲労課題直後の結果は、全力時の関節トルク、筋剛性率及び随意的動員度に絞って検討した。

関節トルクに関しては、疲労課題前の 121 ± 20 Nm に対し、疲労課題後は 76 ± 14 Nm と、 $36 \pm 16\%$ 、有意に低下していた。全力で断続的に力発揮を行った先行

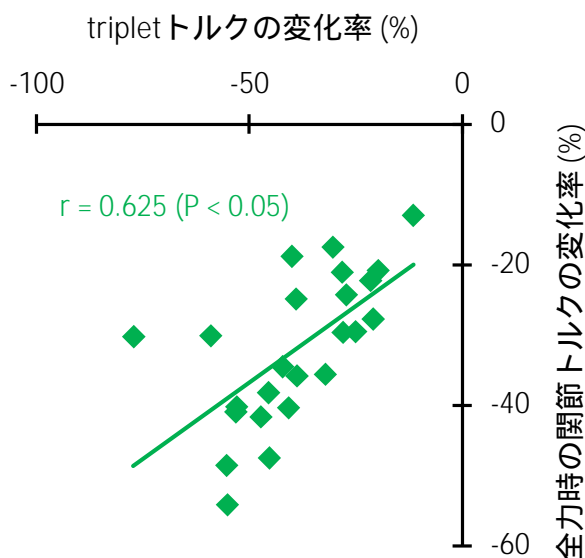


図 4 全力の 40%に相当する強度で等尺性膝関節伸展筋力を疲労困憊まで発揮し続けた前後での、誘発トルクの変化率と全力時の関節トルクの変化率の関係 (n = 24)

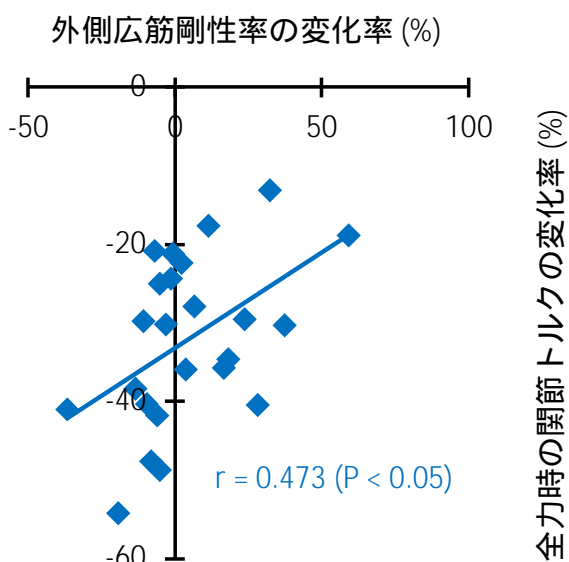


図 5 全力の 40%に相当する強度で等尺性膝関節伸展筋力を疲労困憊まで発揮し続けた前後での、外側広筋剛性率の変化率と全力時の関節トルクの変化率の関係 (n = 24)

研究や、当該研究課題の他の強度での疲労課題と比較しても、予想通りの疲労度合いが観察された。

筋剛性率に関しては、LG 及び SOL では疲労課題前後で有意な変化がみられなかったのに対し、MG では、疲労課題後に有意に低下していた。もともと、疲労により硬くなる、という前提で研究を進めていたため、予想していた結果とは相反する結果となった。直近では、全力で5秒間の等尺性膝関節伸展運動を60回行った時、VLの筋剛性率が有意に低下した、という報告もなされている(Siracusa et al., 2019)。彼らは、筋剛性率の低下が筋の疲労度合いを評価すると考えているが、筋剛性率の値には、筋の温度や血流などの影響も考慮する必要があることを踏まえると、本研究の結果と合わせて考えても、そう結論付けていいかは判断が分かれるところである。また、疲労課題前後の変化率に関しては、いずれの筋剛性率も、関節トルクとの間に有意な相関はみられなかった。

随意的動員度に関しては、疲労課題前が $87 \pm 13\%$ 、疲労課題後が $66 \pm 15\%$ と、 $23 \pm 16\%$ 、有意に低下していた。そして、随意的動員度の疲労課題前後の変化率は、関節トルクのそれと有意な正の相関がみられた(図6)。

以上の結果から、全力での疲労課題で生じる筋疲労に関しては、筋剛性率の観点から新たな知見を得ることができたかどうか、結論付けるのは難しい。その一方で、当該疲労課題で生じる筋疲労の個人差は、主に中枢性疲労に起因していることが明らかにされた。

(5) まとめ

本研究のメインテーマとなる「SWE 法を用いたアプローチ」という観点から考えた場合、全力の10%あるいは20%という低強度での疲労課題に関しては、SWE 法により得られる筋剛性率を疲労課題前後で取得することにより、新たな知見を得ることができ、筋疲労の機序解明に向けて順調に進めることができた。その一方で、中強度以上で疲労課題を実施した場合には、筋剛性率の値に、筋疲労以外の要因(筋の温度や血流など)が影響を及ぼしてしまい、個々の筋の疲労度合いの評価が難しくなる現象も散見された。今後は、筋剛性率に及ぼす因子を改めて整理し、さらなる研究を進めていくことで、筋疲労の機序解明に役立つこと、研究の限界になることを見極める必要がある。

5. 主な発表論文等(研究代表者に下線)

[雑誌論文](計3件) 査読あり

- (1) Ema R, Suzuki M, Kawaguchi E, Saito I, Akagi R. Effects of sex and joint action on voluntary activation. PeerJ, 6: e5968, 2018, DOI: 10.7717/peerj.5968. eCollection 2018.
- (2) Akagi R, Suzuki M, Kawaguchi E, Miyamoto N, Yamada Y, Ema R. Muscle size-strength relationship including ultrasonographic echo intensity and voluntary activation level of a muscle group. Archives of Gerontology and Geriatrics, 75: 185-190, 2018, DOI: 10.1016/j.archger.2017.12.012.
- (3) Akagi R, Fukui T, Kubota M, Nakamura M, Ema R. Muscle shear moduli changes and frequency of alternate muscle activity of plantar flexor synergists induced by prolonged low-level contraction. Frontiers in Physiology, 8: 708, 2017, DOI: 10.3389/fphys.2017.00708.

[学会発表](計5件) 既に採択が決まっている発表予定の物も含む

- (1) Hirata N, Hirata K, Akagi R. Individual differences in knee extensor fatigue induced by sustained middle-level contraction. XXVII Congress of the International Society of Biomechanics. 2019年8月, カルガリー (カナダ).
- (2) Sato S, Hirata N, Tanimoto H, Imaizumi N, Ando R, Hirata K, Akagi R. Can low-intensity squat exercise improve knee and hip flexion and extension strength simultaneously? XXVII Congress of the International Society of Biomechanics. 2019年8月, カルガリー (カナダ).

随意的動員度の変化率 (%)

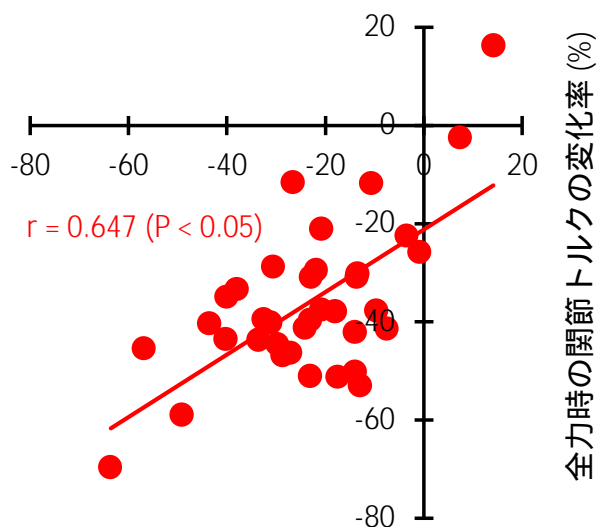


図6 全力で等尺性足関節底屈筋力を断続的に発揮し続けた前後での、随意的動員度の変化率と全力時の関節トルクの変化率の関係 (n = 36)

- (3) 佐藤伸哉, 江間諒一, 赤木亮太 . 8 週間の高強度スクワットトレーニングが単関節動作における筋力に及ぼす効果 . 第 25 回日本バイオメカニクス学会大会 2018 年 9 月 5 日 , 東京 .
- (4) 江間諒一, 川口恵実, 鈴木桃香, 赤木亮太 . 足関節底屈における瞬発的な筋力の加齢変化をもたらす要因: 神経筋活動の筋間差という視点から . 日本体育学会第 69 回大会 . 2018 年 8 月 25 日, 徳島 .
- (5) 赤木亮太, 江間諒一 . 低強度での持続的な関節トルク発揮に伴う筋剛性率変化から協働筋間の活動交代を考える - 足関節底屈筋群を対象として - . 日本体育学会第 68 回大会 . 2017 年 9 月 9 日, 静岡 .

6 . 研究組織

(1) 研究分担者

該当せず

(2) 研究協力者

江間 諒一 (Ryoichi Ena)

静岡産業大学・講師

研究者番号 : 10768196

平田 浩祐 (Kosuke Hirata)

芝浦工業大学大学院・日本学術振興会特別研究員 (PD)

研究者番号 : 00835746

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、研究者個人に帰属されます。