

〈研究資料〉

運動前のスタティックストレッチングまたは経皮的電気神経刺激が筋力および筋硬度の経時変化に与える影響

井上 美佳¹⁾・入澤 水晶²⁾・窪田 敦之¹⁾³⁾

Time-courses of changes in muscle hardness and maximal isometric strength after prolonged static stretching or transcutaneous electrical nerve stimulation

Mika INOUE¹⁾, Mizuki IRISAWA²⁾ and Atsushi KUBOTA¹⁾³⁾

Abstract

本研究は、スタティックストレッチング(SS)または経皮的電気神経刺激(TENS)実施後における筋力および筋硬度の時間経過に伴う変化を明らかにすることを目的とした。健康成人男性10名(21.1±0.8歳)を対象に、一方の脚に合計6分間のSSを、もう一方の脚にTENSを実施した。SSまたはTENSの実施前および直後、10分後、20分後、30分後に等尺性膝関節伸展筋筋力および大腿直筋の筋硬度(SR)、筋力測定時の主観的な力の出しやすさを測定した。二元配置分散分析の結果、筋力とSR値ともに時間の主効果がみられ($p < 0.05$)、事後検定の結果、実施前(筋力:100%;SR値:SS条件 4.80 ± 1.34 , TENS条件 5.63 ± 2.55)と比較して30分後(筋力:SS条件 $94.4 \pm 5.9\%$, TENS条件 $94.3 \pm 7.7\%$;SR値:SS条件 3.14 ± 1.00 , TENS条件 4.19 ± 1.87)が低値を示した($p < 0.05$)。一方で筋力とSR値ともに条件の主効果および時間×条件の交互作用はみられなかった。以上の結果から、本研究のSSまたはTENSの実施は直後の筋力および筋硬度に変化を及ぼさず、実施時間の長いSS直後にみられる筋力や筋硬度の低下の可能性は低いことが示された。一方でいずれの方法も実施30分後には筋力が低下し筋硬度が増加したことから、30分後の変化に注意して実施を検討する必要がある。

Key words: コンディショニング, TENS, SS, ストレインエラストグラフィ, 大腿直筋

1. 緒 言

スポーツ競技においてコンディショニングとは、ピークパフォーマンスの発揮に必要なすべての要因

をある目的に向かって望ましい状況に整えることである⁹⁾。いずれの競技レベルにおいても広く用いられている一般的なコンディショニングの代表例がスタティックストレッチング(Static Stretching:以下,SS)であり、柔軟性の改善を目的とし、単回の実施でも一時的に関節可動域を増加させることが証明されている²⁾。その一方で1回の実施時間が45秒以上¹⁰⁾と長くなると、一時的に筋力が低下することが報告されている。このような筋力低下の一要因として、SSによる筋のstiffness低下が考えられている³⁾。筋のstiffnessは、「長軸方向に伸張される際の抵抗」と定義される硬さ指標の1つであ

¹⁾ 順天堂大学大学院スポーツ健康科学研究科
Graduate School of Health and Sports Science,
Juntendo University

²⁾ 専門学校社会医学技術学院理学療法学科
Department of Physical Therapy, Japanese School of
Technology for Social Medicine

³⁾ 順天堂大学スポーツ健康科学部
Faculty of Health and Sports Science, Juntendo
University

責任著者: 井上美佳

E-mail: sh4118006@juntendo.ac.jp

る⁶⁾。また、それとは区別される指標として、「垂直圧力に対して筋によって提供される抵抗力」と定義される筋硬度（muscle hardness）があり⁶⁾、この変化には筋 stiffness や筋内圧の変化が複合的に関与すると考えられている¹⁴⁾。これまでに5分間や6分間のSSにより筋硬度が低下した（筋が軟らかくなった）ことが報告されているが⁷⁾⁸⁾、筋力の低下を同時にみた研究はなく、実施時間の長いSSにより筋力が低下した際に筋硬度がどのように変化するのは明らかでない。

また、機器を用いたコンディショニングの1つに経皮的電気神経刺激（Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation：以下、TENS）がある。TENSは設定する刺激強度や周波数により効果が異なり⁵⁾、低周波の電気刺激を痛みの感じない程度の強度で実施することで筋血流量が増加することが報告されている¹⁶⁾。このような効果からこれまでに運動後の疲労回復効果について検証されており¹⁾、運動後に実施することで筋疲労や筋の硬さからの回復を促進することが報告されている¹⁵⁾。一方でTENSを運動前に実施することが筋力や筋硬度に与える影響は明らかでない。TENSのコンディショニングとしての有用性を明らかにする上では運動前に行う一般的なコンディショニングであるSSと効果を比較検証することは重要である。

以上のことから本研究では、スタティックストレッチングまたは経皮的電気神経刺激を実施し、その後の筋力および筋硬度の時間経過に伴う変化を比較検証することとした。

2. 対 象

下肢に疾患のない健常な成人男性10名（21.1 ± 0.9歳，171.6 ± 4.6 cm，66.5 ± 4.4 kg）の20脚を対象とした。実験に先立ち、対象者には本研究の内容および参加に伴う危険性について口頭および文書にて十分に説明をし、同意書への署名押印が得られた者のみから実験参加の協力を得た。なお本研究は、順天堂大学スポーツ健康科学部研究等倫理委員会（順大ス倫30-15号）の承認のもと実施した。

3. 方 法

各対象者には、片脚にSSを実施する条件（以下、SS条件）ともう片脚にTENSを実施する条件（以下、TENS条件）を割り当てた。この際、各条件において利き脚と非利き脚で実施する者がそれぞれ5名ずつになるよう調整した。また、それぞれの介入条件下において、介入実施前から直後および10分後、20分後、30分後にかけての等尺性膝関節伸展筋筋力および大腿直筋の筋硬度（SR）、主観的評価（筋力測定時の力の出しやすさ）の変化を測定した。筋力測定がSR値の変化に影響する可能性や、同日に複数回の筋力測定を実施することが介入実施後の時間経過に伴う変化に影響する可能性を排除するため、全測定を図1のように5回に分けて別日に実施した（SR値測定×1日+筋力および主観的評価の測定×4日）。なお、SS条件とTENS条件は同日にランダムな順序で実施し、介入実施前の測定は必ず下肢に痛みや違和感がないことを確認した上で行った。

1) スタティックストレッチング（SS）

日本スポーツ協会公認アスレティックトレーナー専門科目テキスト¹²⁾に記載の大腿前面のパートナーストレッチングを参考にし、他動的な大腿四頭

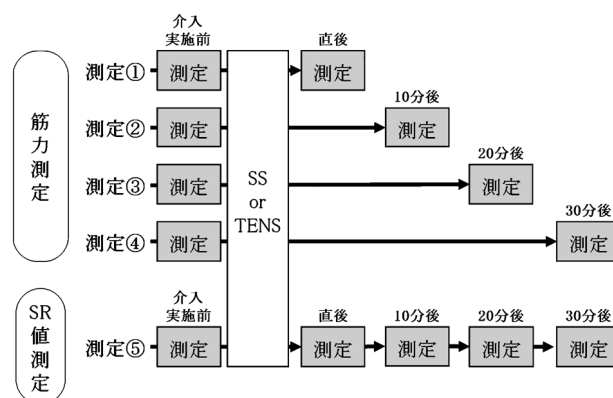


図1 実験手順
SS条件およびTENS条件は同日にランダムな順序で実施し、測定は①から⑤の5回に分けて別日に実施した。SS：スタティックストレッチング。TENS：経皮的電気神経刺激。



図2 スタティックストレッチ

痛みが出ない程度まで膝関節を他動的に最大屈曲させ、大腿前面が伸張されている感を訴えない場合は股関節の伸展を加えた。対象者は2分間のSSをセット間に30秒の休息をはさみ3セット実施した。

筋のSSを行った（図2）。実施肢位は伏臥位とし、痛みが出ない範囲で対象者の膝関節を他動的に最大屈曲させた。膝関節を最大屈曲させたにも関わらず大腿前面が伸張されている感を訴えない場合は、股関節の伸展角度を大きくすることで大腿四頭筋の伸張を強調させた。実施時間はSS直後に筋硬度低下がみられた先行研究⁷⁾を参考にし、2分間のSSを3セット、セット間に30秒の休息をはさみ実施した。

2) 経皮的電気神経刺激（TENS）

TENSの実施には低周波治療器（Rehab400、日本シグマックス株式会社製）を用いた。あらかじめ設定されているプログラム35種類の中から、筋緊張の緩和を目的とする周波数が7 Hz（7分）-5 Hz（7分）-3 Hz（7分）と3段階にわたって変化するプログラム（合計21分間）を実施した。刺激強度は、TENSにより血流が増加したことを報告した先行研究¹⁾を参考に、対象者が痛みを感じない程度とし、明らかな筋収縮が確認できるまで徐々に電圧を上げた。主に大腿直筋へ電気刺激が加わるよう、電極（縦9 cm×横5 cm）を大腿直筋の起始-停止に沿って上前腸骨棘と膝蓋骨上縁を結んだ線上に、かつその線の中間距離を跨ぐ位置に2枚貼付した

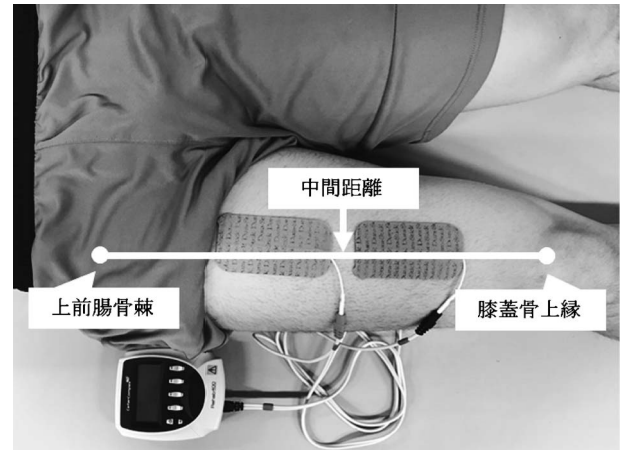


図3 経皮的電気神経刺激

主に大腿直筋へ電気刺激が加わるよう、電極を大腿直筋の起始-停止に沿って上前腸骨棘と膝蓋骨上縁を結んだ線上に、かつその中間距離を跨ぐ位置に2枚貼付した。

（図3）。

3) 等尺性膝関節伸展筋筋力

等速性筋力測定装置（Biodex System3, Biodex Medical System社製）を用い、等尺性収縮下にて膝関節伸展筋筋力を測定した。測定は、座位にて、対象者の上半身を3本のベルトで、また測定側の大腿部を1本のベルトで固定した状態で実施した。膝関節屈曲角度は60度、筋力発揮時間は5秒間とし、その際に記録された最大トルク（N・m）を採用した。

4) 大腿直筋の筋硬度

測定には超音波診断装置（Noblus、日立アロカメディカル社製）に搭載されたReal-time Tissue Elastography（以下、RTE）というアプリケーションを用いた。専用のアタッチメントとともに硬度基準物質（音響カプラーL65、日立アロカメディカル社製）を付属のリニア型プローブに取り付けた。その長軸が測定部位の筋の走行に沿うように当て、測定部位に手動にて軽い圧迫操作をリズムカルに伝えた。圧迫の程度は超音波画像上のグラフ（図4）を参考にして調整した。評価には、測定機器に内蔵

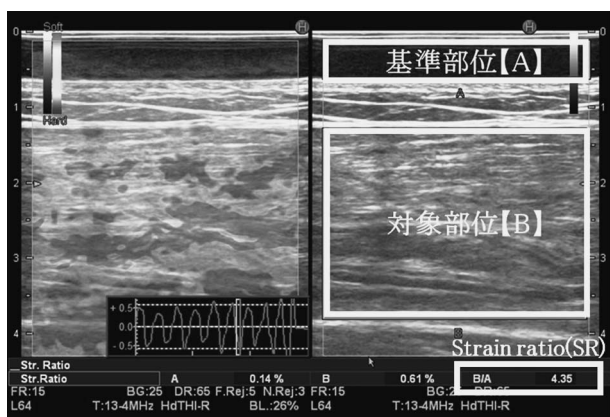


図4 筋硬度測定時の超音波画面下のグラフ
Aの枠内は硬度基準物質(音響カプラー)、Bの枠内は大腿直筋である。筋硬度は画像右下に表示されるAとBの歪み比(Strain ratio: SR)により評価した。

された2領域の歪み比(Strain ratio: 以下, SR)を計算するSR機能を用いた。圧迫操作中にコンピュータが自動的に選出した画像を用い、大腿直筋を対象部位【B】、硬度基準物質を基準部位【A】として関心領域を設け、対象部位を基準部位で除した値【B/A】を算出した(図4)。これにより算出された値を本研究のSRとし、筋硬度を半定量的に評価した。SRは値が小さくなるほど対象部位が硬いことを示す。

対象部位は大腿直筋とし、上前腸骨棘と膝蓋骨上縁を結んだ線上の中央部(筋腹)を測定した。各測定時間において測定位置が同一になるよう、油性マーカーを用いて直接皮膚上にプローブ位置を印した。測定肢位は仰臥位で膝下をベッドから下した状態(股関節伸展位、膝関節屈曲位)とし、測定中は脱力するよう指示した。すべての測定におけるSR値の変動係数は、 $7.9 \pm 5.0\%$ であった。

5) 主観的評価(筋力測定時の力の出しやすさ)

筋力測定時の力の出しやすさは、100-mm Visual Analog Scale (VAS)を用いて主観的に評価した。SSまたはTENSの実施前の筋力測定時に感じた主観的な力の出しやすさをVAS直線の間中点と定め(50-mm)、それと比較して右端を「最も力が出し

やすい」、左端を「最も力が出しづらい」とし、SSまたはTENSの実施後の主観的な力の出しやすさの程度を直線上に記させた。

6) 統計処理

結果は平均値±標準偏差で示した。まず筋力において、測定日が異なっても測定①から④において介入実施前の状態が同様であることを確認するため各条件で一元配置分散分析を実施した。次に筋力とSR値において、介入実施前の値に条件間の差がないことを確認するため各測定項目で対応のないt検定を実施した。各測定項目には二元配置分散分析(混合計画)[被験者内要因=時間, 被験者間要因=条件]を実施し、有意な時間の主効果がみられた場合はDunnnett検定により運動前との比較を行った。なお筋力では実施前を基準(100%)とした相対値を分析に用い、介入実施前からの時間経過に伴う変化を評価した。統計処理にはSPSS version22(IBM社製)を用い、有意水準は $p < 0.05$ とした。

4. 結果

各条件の介入実施前における筋力およびSR値の結果は表1に示した。筋力とSR値ともに、介入実施前の値に条件間の有意差はみられなかった。また筋力ではSSとTENSともに測定①から④で介入実施前の値に有意差はみられなかった。各条件の介入実施前後における筋力およびSR値の結果はそれぞれ図5および図6に示した。二元配置分散分析の結果、筋力($p < 0.05$)とSR値($p < 0.001$)ともに有意な時間の主効果がみられ、事後検定の結果、いずれにおいても実施前(筋力: 100%; SR値: SS条件 4.80 ± 1.34 , TENS条件 5.63 ± 2.55)と比較して30分後(筋力: SS条件 $94.4 \pm 5.9\%$, TENS条件 $94.3 \pm 7.7\%$; SR値: SS条件 3.14 ± 1.00 , TENS条件 4.19 ± 1.87)が有意に低値を示した($p < 0.05$)。一方で、いずれにおいても条件の主効果(筋力 $p = 1.00$; SR値 $p = 0.10$)および両要因の交互作用(筋力 $p = 0.65$; SR値 $p = 0.24$)はみられなかった。

表1 介入実施前の筋力およびSR値

| | | 実施前の値 | | | | 条件間 |
|--------|-----|--------------|------|--------------|------|------|
| | | SS条件 | | TENS条件 | | |
| 筋力(Nm) | 測定① | 199.8 ± 31.0 | n.s. | 207.3 ± 33.6 | n.s. | n.s. |
| | 測定② | 186.1 ± 20.2 | | 205.6 ± 32.5 | | n.s. |
| | 測定③ | 197.2 ± 35.7 | | 206.7 ± 32.9 | | n.s. |
| | 測定④ | 200.0 ± 30.6 | | 206.1 ± 29.6 | | n.s. |
| SR値 | 測定⑤ | 4.81 ± 1.34 | | 5.63 ± 2.55 | | n.s. |

n.s.: non-significant(有意差なし)

データは全て平均値±標準偏差で示す。筋力測定は、SSまたはTENS実施前と直後(測定①)、実施前と10分後(測定②)、実施前と20分後(測定③)、実施前と30分後(測定④)の4回に分けてランダムな順序で実施した。

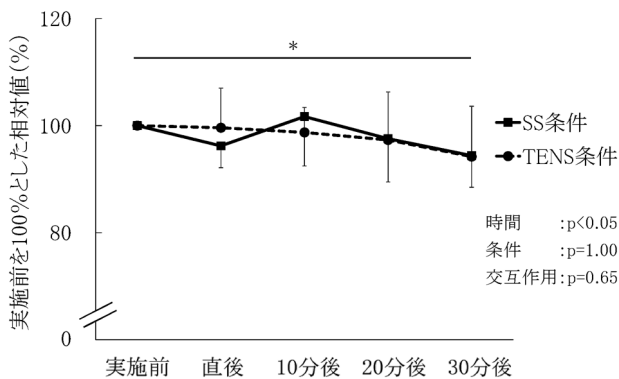


図5 SSまたはTENS実施後の等尺性膝関節伸展筋筋力の変化

データは全て平均値±標準偏差で示す。SS条件：スタティックストレッチング実施条件。TENS条件：経皮的電気神経刺激実施条件。SS条件とTENS条件ともに実施前と比較して30分後に筋力が有意に低下した。* $p < 0.05$ (実施前との比較)。

主観的評価の結果は図7に示した。二元配置分散分析の結果、時間($p = 0.17$)と条件($p = 0.72$)の主効果および両要因の交互作用($p = 0.76$)はみられなかった。

5. 考察

本研究は健常成人男性10名を対象に、一方の脚に合計6分間のSSを、もう一方の脚に「筋緊張緩和」を目的としたTENSのプログラムを、それぞれ大腿四頭筋に実施した。その結果、SSとTENS

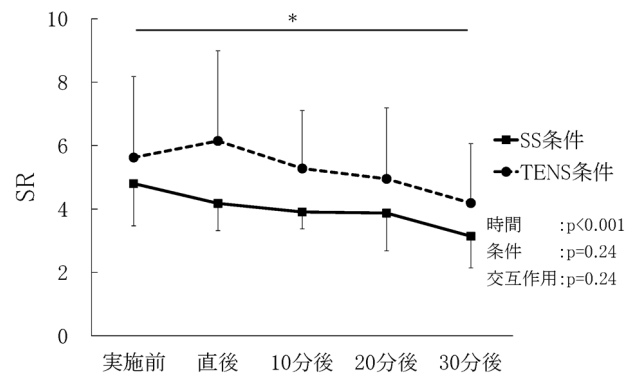


図6 SSまたはTENS実施後の大腿直筋の筋硬度変化

データは全て平均値±標準偏差で示す。SS条件：スタティックストレッチング実施条件。TENS条件：経皮的電気神経刺激実施条件。SR：筋硬度評価のために算出された硬度基準物質に対する大腿直筋の歪み比(Strain ratio)。SS条件とTENS条件ともに実施前と比較して30分後にSR値が低下した(筋硬度が増加した)。* $p < 0.05$ (実施前との比較)。

ともに実施30分後にのみ等尺性膝関節伸展筋筋力が低下し大腿直筋の筋硬度が増加する(筋が硬くなる)ことが示された。

SS直後の筋力低下には、筋活動の減少などの神経学的な要因とサルコメア長の増加などの構造学的な要因が影響すると考えられている³⁾。一方でSSの30分後には、神経学的な要因の変化¹⁸⁾と構造学的な要因による筋stiffnessや筋硬度の低下⁸⁾¹¹⁾は実施前の状態に回復することが報告されている。この

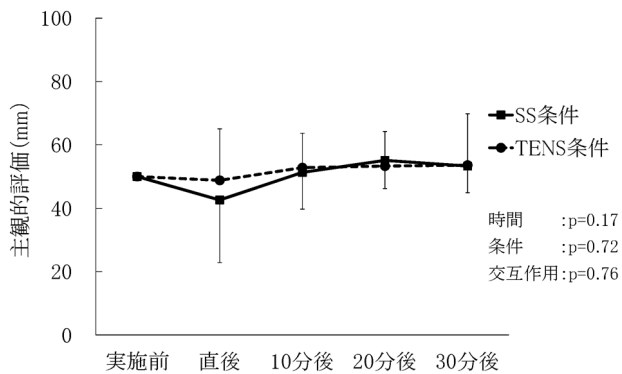


図7 SSまたはTENS実施後の主観的評価（筋力測定時の力出しやすさ）の変化
データは全て平均値±標準偏差で示す。SS条件：スタティックストレッチング実施条件。TENS条件：経皮的電気神経刺激実施条件。

ことから、本研究のSSの30分後における筋力低下には神経学的な要因や構造学的な要因ではない他の要因が影響したことが考えられる。またSSの30分後には筋硬度の増加がみられた。これにはSS後に低下した筋膜の含水率がその後過度に増加する¹⁷⁾ことが影響した可能性があるが、その変化が筋力低下にまで影響したのかは明らかではない。さらに本研究ではTENSの30分後にも筋力の低下と筋硬度の増加がみられた。SSでは30分後の筋力低下の要因としてSS時の虚血とその後の再灌流のサイクルが考えられていることから¹⁸⁾、筋の収縮・弛緩により虚血・再灌流が繰り返されるTENSではそのサイクルが何らかの形で筋力低下に影響した可能性がある。しかし実際に、TENSの実施により虚血・再灌流はどのように生じ、30分後の筋力低下や筋硬度増加にどのように影響したのかは明らかではない。

一方で、SSとTENSともに20分後まで筋力と筋硬度の変化はみられなかった。本研究はSS後に筋硬度が低下したという報告⁷⁾を基に実施時間を6分間と設定したが、対象の筋が異なったことにより結果に相違がみられた可能性がある。実際に筋stiffnessに関する研究では、2分間のSSにより腓腹筋内側頭のstiffnessは低下するものの¹³⁾、大腿直筋のstiffnessは変化しないという報告がある⁴⁾。SS

後の筋力低下には前述のような構造学的要因の変化があることから、筋硬度が変化しなかった本研究では20分後まで筋力の変化がみられなかった可能性がある。もしくは、筋stiffnessは低下していたとしても等尺性最大筋力には影響しない程度の変化であった可能性がある。また、本研究はTENS後に等尺性膝関節伸展筋筋力と大腿直筋の筋硬度変化を評価した新規性のあるデザインであったが、筋力と筋硬度ともに20分後まで変化はみられなかった。これまで「筋緊張緩和」を目的としたTENSが運動後の筋疲労や筋硬度の回復を促進したという報告はあるものの¹⁾、本研究のように安静時に実施した後に20分間も筋力と筋硬度が変化しなかった原因は不明である。

以上のように、本研究のSSとTENSは実施後すぐには筋力や筋硬度に変化を及ぼさず、実施時間の長いSS直後にみられる筋力や筋硬度の低下の可能性は低いことが示された。一方でいずれの方法も実施30分後には筋力が低下し筋硬度が増加したことから、30分後の変化に注意して実施を検討する必要がある。

6. 結 論

大腿四頭筋を対象としたスタティックストレッチングまたは経皮的電気神経刺激の実施は直後から20分後までは等尺性膝関節伸展筋筋力および大腿直筋の筋硬度に変化を及ぼさないものの、いずれの方法も実施30分後には筋力が低下し筋硬度が増加することが示された。

利益相反

本研究に関わる利益相反はない。

文 献

- 1) Babault, N., Cometti, C., Maffiuletti, NA. and Deley, G. (2011) Does electrical stimulation enhance post-exercise performance recovery? *Eur J Appl Physiol*, 111(10), 2501-2507.

- 2) Behm, DG., Blazevich, AJ., Kay, AD. and McHugh, M. (2015) Acute effects of muscle stretching on physical performance, range of motion, and injury incidence in healthy active individuals: a systematic review. *Appl Physiol Nutr Metab*, 41(1), 1-11.
- 3) Chaabene, H., Behm, DG., Negra, Y. and Granacher, U. (2019) Acute effects of static stretching on muscle strength and power: an attempt to clarify previous caveats. *Front Physiol*, 10, 1468.
- 4) Caliskan, E., Akkoc, O., Bayramoglu, Z., Gozubuyuk, OB., Kural, D., Azamat, S. and Adaletli, I. (2019) Effects of static stretching duration on muscle stiffness and blood flow in the rectus femoris in adolescents. *Med Ultrason*, 21(2), 136-143.
- 5) Chesterton, LS., Foster, NE., Wright, CC., Baxter, GD. and Barlas, P. (2003) Effects of TENS frequency, intensity and stimulation site parameter manipulation on pressure pain thresholds in healthy human subjects. *Pain*, 106(1-2), 73-80.
- 6) Inami, T. and Kawakami, Y. (2016) Assessment of individual muscle hardness and stiffness using ultrasound elastography. *J Phys Fitness Sports Med*, 5(4), 313-317.
- 7) Inami, T. and Shimizu, T. (2017) The change in muscle hardness after static stretching evaluated by different ultrasound elastography techniques may be equivalent. *J Sports Med Phys Fitness*, 57(1-2), 161-162.
- 8) 稲見崇孝, 清水卓也, 水野貴正, 野坂和則 (2014) ヒト骨格筋に対するストレッチングが筋硬度に及ぼす影響 超音波組織弾性イメージング技術 (ultrasound elastography) と音響カプラーによる定量的評価. 一般財団法人上月財団スポーツ研究助成事業報告書, 11, 1-17.
- 9) 石山修盟 (2017) コンディショニングとは. 公益財団法人日本スポーツ協会, 公認アスレティックトレーナー専門科目テキスト第6巻, 東京, 文光堂, 3-5.
- 10) Kay, AD. and Blazevich, AJ. (2012) Effect of acute static stretch on maximal muscle performance: A systematic review. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 44(1), 154-164.
- 11) Konrad, A., Reiner, MM., Thaller, S. and Tilp, M. (2019) The time course of muscle-tendon properties and function responses of a five-minute static stretching exercise. *Eur J Sport Sci*, 19(9), 1195-1203.
- 12) 小柳好生, 和久貴洋 (2017) 障害予防を目的としたコンディショニングの方法と実際. 公益財団法人日本スポーツ協会, 公認アスレティックトレーナー専門科目テキスト第6巻, 東京, 文光堂, 178-213.
- 13) Maeda, N., Urabe, Y., Tsutsumi, S., Sakai, S., Fujishita, H., Kobayashi, T., Asaeda, M., Hirata, K., Mikami, Y. and Kimura, H. (2017) The acute effects of static and cyclic stretching on muscle stiffness and hardness of medial gastrocnemius muscle. *J Sports Sci Med*, 16(4), 514-520.
- 14) 村山光義 (2016) 押し込み反力計測による筋硬度評価の意義. *バイオメカニズム学会誌*, 40(2), 79-84.
- 15) Namuun, G., Endo, Y., Abe, Y., Nakazawa, R. and Sakamoto, M. (2012) The effect of muscle fatigue using short term transcutaneous electrical nerve stimulation. *J Phys Ther Sci*, 24(5), 373-377.
- 16) Sandberg, ML., Sandberg, MK. and Dahl, J. (2007) Blood flow changes in the trapezius muscle and overlying skin following transcutaneous electrical nerve stimulation. *Phys Ther*, 87(8), 1047-1055.
- 17) Schleip, R., Duerselen, L., Vleeming, A., Naylor, IL., Lehmann-Horn, F., Zorn, A., Jaeger, H. and Klingler, W. (2012) Strain hardening of fascia: static stretching of dense fibrous connective tissues can induce a temporary stiffness increase accompanied by enhanced matrix hydration. *J Bodyw Mov Ther*, 16(1), 94-100.
- 18) Trajano, GS., Nosaka, K., Seitz, LB. and Blazevich, AJ. (2014) Intermittent stretch reduces force and central drive more than continuous stretch. *Med Sci Sports Exerc*, 46(5), 902-910.

(令和2年1月17日 受付)
(令和2年10月9日 受理)