

<研究論文 (査読あり) >

若齢女性に対する一過性の疲労困憊に至るレジスタンス運動実施後の時間経過に伴う筋硬度の変化について

Changes in muscle hardness over time after resistance exercise leading to transient exhaustion in young women

柴田 景子¹⁾, 沢井 史穂²⁾
Keiko SHIBATA, Shiho SAWAI

Abstract

Empirically, human skeletal muscles stiffen if subjected to excessive exercise and recover to its original state after a few days, although there are individual differences. Although there have been studies on muscle hardness after transient resistance exercise, no consensus has been obtained. Additionally, there are no studies targeting women. This study aimed to examine the upper arm of a young woman using muscle hardness ultrasonography (a device with a built-in pressure gauge in the probe of a B-mode ultrasound system that can measure the amount of muscle thickness displacement over time in response to applied pressure) and temporal changes in muscle hardness during transient muscle endurance exercise for the biceps. The participants were six young women. Temporary resistance exercises for the biceps comprised arm curls on the non-dominant side using dumbbells. The participants performed one set until they reached their limit, three sets with 2 min of rest in between. The exercise load was 30% MVC. Measurements of muscle hardness were performed during the menstrual period of the subjects, and measurements were taken five times in total, before and after transient resistance exercise, and 24, 48, and 72 hours after the end of exercise. Muscle hardness significantly improved 24 and 48 h after exercise compared to that of before exercise. It peaked 24 h after exercise and gradually decreased, and significantly decreased 72 h after exercise compared to that of 24 h after exercise. It was thought that I needed the time for around 72 hours for restoration and rebuilding of a line and the connective tissue that produced a microtear by a transient resistance campaign in the young woman.

Keywords: muscle hardness, resistance exercise, young female, upper arm

I. 緒言

ヒトの骨格筋は、過度な運動を行うと硬くなり、個人差はあるが数日後に筋は元の状態へと回復していくことは経験的に知られている。先行研究¹⁷⁾において、上腕二頭筋を対象に一過性の疲労困憊に至るレジスタンス運動を行った直後には筋硬度が上昇するが、時間が経つにつれ徐々に回復し、運動終了3日後には筋硬度が運動前程度になったという報告がある。一方、筋力増強運動における運動速度及び筋の収縮様式の違いが上腕二頭筋の微細損傷に及ぼす影響について検討し

た先行研究⁷⁾では、最大筋力の20%の低負荷で運動を行った結果、総運動時間及び総筋活動量が同じであれば、骨格筋が受ける微細損傷の程度は運動速度や収縮様式の条件の違いによらず同等であったこと、そしてその際の筋の微細損傷の程度は、筋内圧の上昇を招くほど大きくなかったため、筋硬度は変化しなかったことを報告している。このように、一過性のレジスタンス運動実施後の筋硬度の変化に関しては、実験条件の違いから一致した見解が得られていない。また、いずれの先行研究も対象者は男性であり、女性を対象とした報告はみあたらない。

安静時の筋硬度の性差については、中野ほか¹⁰⁾、柴田ほか¹⁵⁾は上腕二頭筋、川道ほか⁶⁾は大腿直筋及び腓腹筋内側頭において、いずれも有意な性差を認めて

¹⁾ 目白大学短期大学部 (助教)

²⁾ 日本女子体育大学 (教授)

いない。しかしながら、男性に比べて筋量や筋力の劣る女性におけるレジスタンス運動実施後の筋硬度の変化は男性とは異なる可能性が考えられる。さらに、月経周期のある女性では、性ホルモンの動態が最大筋力や筋硬度に影響を与えるという報告がある。岩本ほか⁵⁾は肘屈曲筋群、Sarwar et al.¹⁴⁾は大腿四頭筋を対象とした研究で、ともに月経期及び黄体期より排卵期において最大筋力が有意に増大したことを報告しており、須永¹⁶⁾は、排卵期に最大筋力が増大するのは、この時期にエストロゲンの分泌量が多くなることが関与していると指摘している。筋硬度については、岡崎ほか¹³⁾が、大腿直筋50%部位においては、月経期及び排卵期、黄体後期よりも黄体前期の方が、大腿二頭筋50%部位では、排卵期及び黄体後期よりも黄体前期の方が、筋硬度が高かったことを報告し、最大筋力同様、筋硬度も女性ホルモンの変動の影響を受けていることを指摘している。したがって、女性の場合は月経周期を考慮して筋硬度の変化を捉える必要があるといえる。

筋の硬さを客観的に評価する方法としては、古くから押圧型筋硬度計が使われてきたが、村木ほか⁸⁾は、皮膚表面から押圧を加えた際の皮下組織全体の変位量を数値化するものであるため、筋組織そのものの硬さを測定しているとは言い難いと指摘している。一方、近年普及している超音波エラストグラフィは、超音波を用いて組織の硬さ分布を画像化できるため、多くの先行研究^{6) 12)}で使用されているが、経済性や汎用性の面で課題があるといえる。そこで藤田ほか⁴⁾は、押圧型筋硬度計と超音波エラストグラフィのそれぞれのもつ長所を取り入れて筋硬度を測定することができる荷重超音波装置を開発した。この装置は、リニア型プローブ(6MHz)に圧力計を内蔵しており、1gf単位で押圧をかけていく過程の筋厚の変位量を確認しながら0.1mm単位で筋厚を計測することができる。先行研究¹⁸⁾では一般的に硬さとは、他の物体によって変形を与えられた際に呈する抵抗の大小と定義されていることから、筋硬度も応力と歪みの関係から定量的に評価できると考えられる。実際、藤田ほか⁴⁾は、ファントムゲルを用いた測定により、本装置が物体の硬度を客観的かつ定量的に精度よく評価できることを確認している。

本研究は、この荷重超音波装置を用いて、若齢女性に対する一過性の疲労困憊に至るレジスタンス運動実施後の時間経過に伴う筋硬度の変化とともに筋厚及び筋力の変化についても検討することで、一過性の運動後の筋にどのような経時変化があるかを明らかにすることを目的とした。このことにより、女性における一過性のレジスタンス運動実施後の筋のコンディションを知り、効果的なトレーニング計画を実施するための一助となることが期待できる。

II. 方法

1. 対象者

対象者は、定期的な運動習慣を有していない健康な

若齢女性6名(年齢:20.0±0.8歳,身長:156.3±4.4cm,体重:50.0±3.5kg, BMI:20.5±2.8)であった。研究の実施に先立ち、対象者に対して事前に本研究の趣旨と倫理的配慮に関して口頭及び書面にて十分な説明を行い、研究参加の同意を得た。なお、本研究は、日本女子体育大学研究倫理委員会の承認(承認番号2020-1)を得て実施した。

2. 一過性のレジスタンス運動

一過性の上腕二頭筋に対するレジスタンス運動は、ダンベルを用いた非利き手側におけるアームカールとした。運動は立位姿勢で行い、壁に体の背面をつけた状態で脇を締め、利き手で非利き手の上腕前部を抑え、固定した。対象者には、メトロノーム音に合わせて一定のテンポ(1秒で上げ、1秒で下す)で上腕二頭筋の短縮性・伸張性動作を繰り返すよう指示した。その際、力が抜けないよう、また肘を伸ばし過ぎないように指示をした。運動負荷は最大随意筋力(Maximal voluntary contraction:MVC)の30%(30%MVC)、オールアウトするまで(一定のテンポについていけなくなるまで)を1セットとし、休息2分間を挟みながら計3セット実施した。運動の際、壁から背中や腕が離れないようにすること、肘を支点に前腕を動かすこと、手首は掌屈しないことを教示した。

3. 最大随意筋力測定(MVC測定)

運動側の等尺性肘屈曲筋のMVC測定は、上腕筋力測定器S-09010A(竹井機器社製)を用いて測定した。対象者は、座位姿勢で掌側手首皮線の高さに筋力測定器のストラップの上端部を合わせ、手関節を前腕回内外中間位で固定した。肩と肘関節が90度屈曲位になるよう、上半身は測定台に対して正面を向いて上腕を置き、足が床につく高さに椅子を調整した。測定に先立ち、上腕のみで力発揮すること、力発揮は3秒かけてMVCに達するよう徐々に力発揮すること、MVCに達した場合、約2秒間維持するよう指示した。MVC測定は休息を入れ2回実施し、数値が高い方を採用した。

4. 筋硬度及び筋厚測定

筋硬度及び筋厚の測定は、荷重超音波装置(グローバルヘルス社製)を使用した(図1)。筋硬度と筋厚の測定位置は、先行研究¹⁾の手法に倣い、上腕長近位(肩峰外側端から上腕骨外側上顆)60%部位の位置とし、立位で計測した。筋硬度と筋厚は仰臥位で測定した。対象者は、肩関節外転90度位、肘関節伸展0度位、前腕回外位で、全身の筋を十分に弛緩させるよう指示した。測定部位の皮膚表面に荷重超音波装置のプローブを筋の長軸方向に対して直行するように当て、藤田ほか⁴⁾に倣い、0~1000gf超の範囲で60bpmのメトロノーム音に合わせて一定のリズムで押圧をかけた。得られた超音波画像データから、専用解析ソフト(mirucubeY ver.1.0:グローバルヘルス社製)を使って、プローブ圧の増加に伴う筋厚の変位量を計測し(図

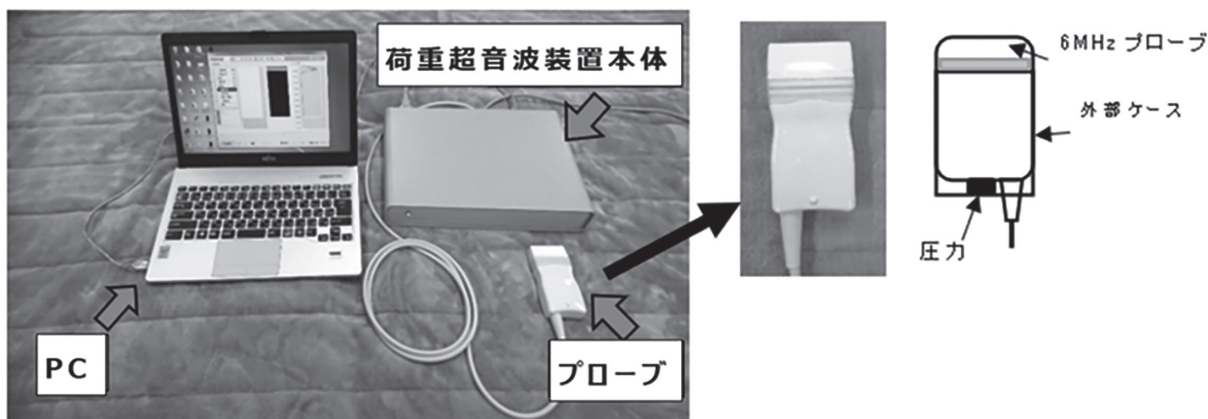


図1. 荷重超音波装置本体, プローブの拡大版と構造図

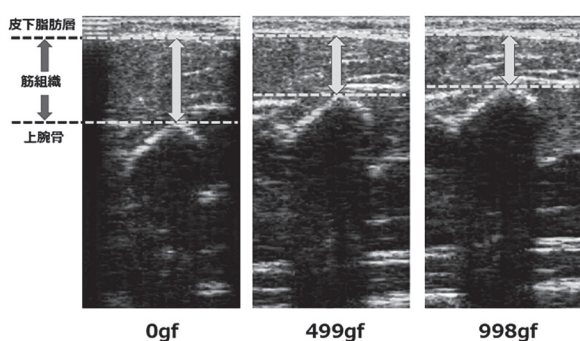


図2. プローブ圧の増加に伴う上腕前部の筋厚の変化の様子

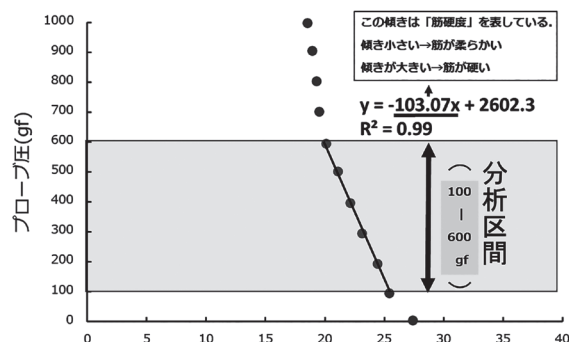


図3. プローブ圧の変化に伴う上腕前部の筋厚の変化 (gf/mm) プローブ圧 100 ~ 600gf の区間における両変数の回帰式の傾きを筋硬度の評価とした。

2), プローブ圧と筋厚との間に直線関係が認められる区間 (プローブ圧 100 ~ 600gf) の一次回帰式を求め、その傾き, すなわち“荷重/変位量” (図3) を筋硬度の指標として評価した. この値が高いと筋が硬く, 低いと筋が柔らかいことを意味している. 筋厚については, プローブを皮膚表面に当て, 圧力をかけないときの画像から評価した.

上腕前部の筋硬度和筋厚, MVC測定後, 一過性のレジスタンス運動を行った. 運動前と直後, 運動終了24, 48, 72時間後の計5回, 測定を行った.

なお, 月経周期を有する年齢の女性においては, 先行研究^{5) 13) 16)} から女性ホルモンの分泌状態が運動器のコンディションに影響を及ぼす可能性が考えられることから, 上記測定は対象者それぞれの月経周期の同時期, すなわちエストロゲンとプロゲステロンの血中濃度の変動が比較的少ない月経期 (エストロゲン, プロゲステロンともに血中濃度が低い時期) とした.

5. 統計処理

すべての測定値は, 平均値と標準偏差で示した. 各測定項目及び一過性のレジスタンス運動の各セット回数については, 繰り返しのある一元配置分散分析を行い, 主効果が有意であった場合, Bonferroni法の多重比較を行った. すべての統計処理には, SPSS Statistics 23 (IBM社製) を使用し, 有意水準は危険率5%とした.

III. 結果

1. 時間経過に伴う上腕前部の筋硬度的変化

一過性のレジスタンス運動後の時間経過に伴う上腕前部の筋硬度的変化を図4-aに示す. 運動前 ($119.0 \pm 14.1\text{gf/mm}$) と比べて, 運動終了24時間後 ($139.4 \pm 22.3\text{gf/mm}$) 及び48時間後 ($133.9 \pm 18.0\text{gf/mm}$) に筋硬度は有意に高い値を示した. その値は, 運動終了24時間後が最も高く, その後徐々に低下していき, 運動終了72時間後 ($128.7 \pm 20.6\text{gf/mm}$) には24時間後に比べ有意に低い値を示した.

2. 時間経過に伴う上腕前部の筋厚の変化

一過性のレジスタンス運動後の時間経過に伴う上腕前部の筋厚の変化を図4-bに示す. 運動前 ($15.6 \pm 1.4\text{mm}$) に比べ, 運動直後 ($17.8 \pm 2.1\text{mm}$) に有意に高い値を示したが, それ以外に有意差はみられなかった.

3. 時間経過に伴う上腕前部のMVCの変化

一過性のレジスタンス運動後の時間経過に伴う上腕前部のMVCの変化を図4-cに示す. MVCは, 運動前より運動直後に低下傾向がみられたものの, 時間経過に伴う有意な変化はみられなかった.

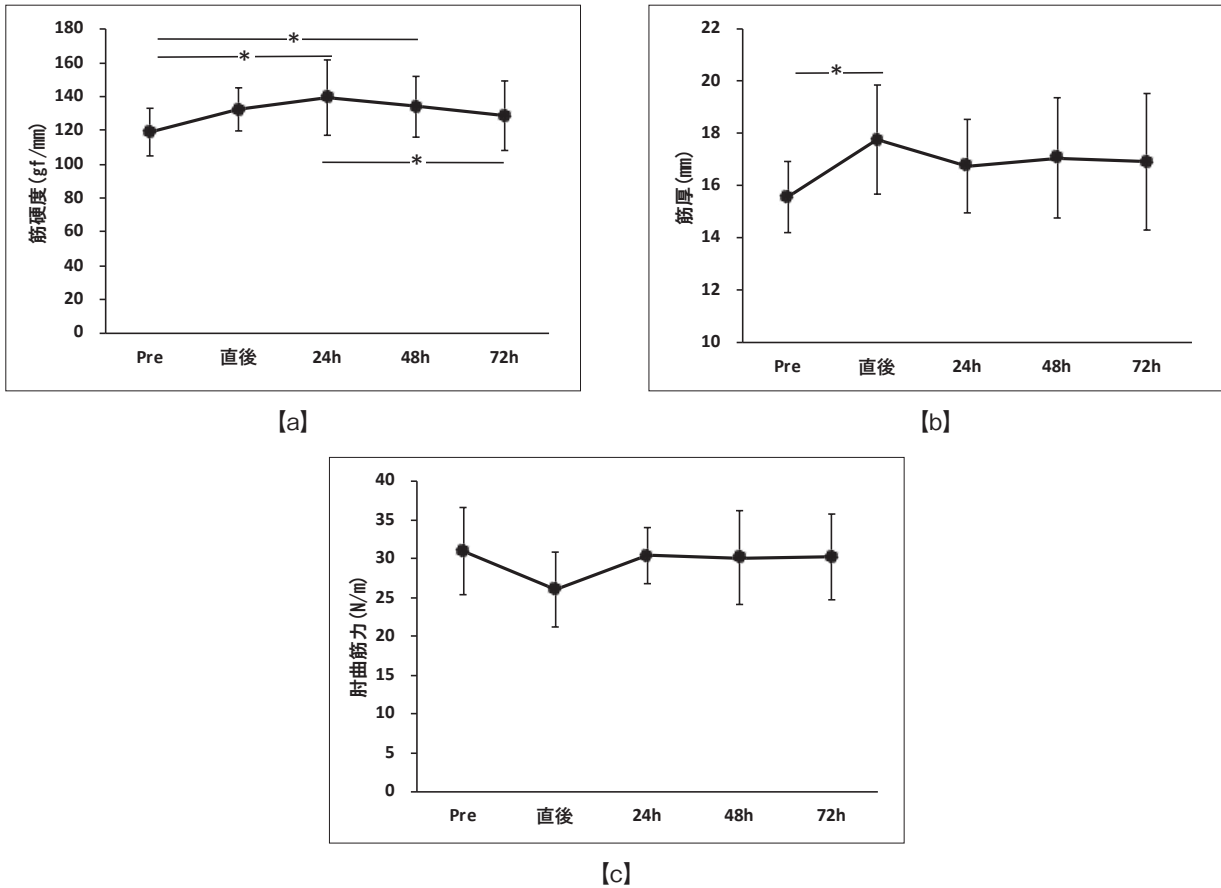


図4. 一過性のレジスタンス運動前後の時間経過に伴う上腕前部の筋硬度 (a), 筋厚 (b), 最大筋力 (c) の変化 (*: $p < 0.05$ Pre: 運動前 直後: 運動直後 24h: 運動 24 時間後 48h: 運動 28 時間後 72h: 運動 72 時間後)

4. 対象者の運動負荷及び各セットの実施回数

対象者の運動負荷及び各セットの実施回数を表1に示す。2, 3セット目は1セット目よりも有意に回数が増加した。一方, 2セットと3セット間には差はみられなかった。

IV. 考察

本研究は, 若齢女性における上腕二頭筋に対する一過性のレジスタンス運動を行い, 時間経過に伴う筋硬度の変化とともに筋厚及び筋力についてもみていくことで, 一過性の運動後の筋にどのような変化があるかを明らかにすることを目的とした。

筋硬度は運動前と運動直後では差はみられなかったが, 運動終了24時間後及び48時間後に運動前よりも

高い値を示し, 72時間後には運動前の値に近づいた。運動終了24時間後及び48時間後に, 筋硬度が運動前より高値を示した要因として, Murayama et al⁹⁾ は筋線維の微小断裂による腫脹及び筋線維の張力変化, すなわち疲労困憊に至る運動によって筋損傷を起こし, 筋のクロスブリッジの重なりが強くなった結果, 筋張力が発生し, 筋が硬くなると報告している。そして, 一過性のレジスタンス運動終了72時間後に筋硬度が運動前の値に戻ったという本研究の結果は, 骨格筋の基であるたんぱく質を合成する役割のmRNAの動態から, 1回のレジスタンス運動によって微小断裂を来した筋やその結合組織の修復と再構築を行うためには48~72時間の休息が必要であることを示唆した先行研究²⁾の知見を支持するものであるといえよう。

一過性のレジスタンス運動実施後の筋厚の経時的変

表1. 対象者の運動負荷及び各セットの実施回数

No.	A	B	C	D	E	F	mean ± SD
30%MVC(kg)	4.5	3.7	3.9	4.6	4.8	4.7	4.3 ± 0.4
1set (回数)	10	8	13	15	12	9	11.2 ± 2.6
2set (回数)	8	7	10	11	8	6	8.3 ± 1.9*
3set (回数)	8	6	9	10	7	7	7.8 ± 1.5**

(mean ± SD; 平均値±標準偏差 *; 1set vs 2set $p < 0.05$, **; 1set vs 3set $p < 0.05$)

化については運動直後のみ運動前との間に有意な増加が見られ、小林ほか⁷⁾と同様の結果を示した。Brancaccio et al.³⁾は、筋厚の増加は血流増加や炎症反応に起因する腫脹であると報告しているが、富永¹¹⁾は、一般に細胞損傷は速やかに炎症を惹起し、皮膚組織では炎症細胞集積が速やかに起こるが、筋細胞はサイトカインシグナル抑制因子SOCS-1が発現し、ケモカインの産生等炎症細胞の集積がすぐに起こらないということから、本研究で、運動直後に筋厚が増加した要因は炎症ではなく、血流増加による腫脹であったと考えられた。

一方、先行研究^{7) 17)}では、運動直後にMVCの有意な低下を認めているが、本研究ではMVCについては統計的に有意な変化は認められなかった。この原因として測定方法における精度の問題点が挙げられる。今回、MVC測定では、休息を入れ2回実施し、数値が高い方を採用した。しかし、本研究の対象者は最大筋力発揮に慣れていない者が多く、MVCが的確に測定できていなかった可能性が疑われる。また、MVC測定は対象者のやる気等の心理面に影響を受けることが知られている。岩本ほか⁵⁾は、心理的コンディションを評価するため、感情プロフィール検査を行った結果、排卵期及び黄体期と比較し、月経期では検査因子の「怒り」及び「疲労」の得点が有意に高かったと報告している。そのため、月経期にMVCを測定する際、最大限に力が発揮しにくい可能性が高いため、より一層の声掛けや助言等、検者のスキルを上げる必要がある。また、最大筋力発揮に慣れていない対象者の場合、事前に練習を重ねてから行う必要があることも考えられた。

V. 結論

若齢女性を対象に、疲労困憊に至る一過性の上腕二頭筋のレジスタンス運動を行ったときの時間経過に伴う筋硬度の変化について検討した。

その結果、一過性のレジスタンス運動終了後の筋硬度の変化は筋厚の変化に遅れて生じ、運動前よりも運動終了24～48時間後に筋が硬くなり、72時間後にはほぼ運動前の値に近づくことが示された。このことから、若い女性においても一過性のレジスタンス運動により微小断裂を生じた筋やその結合組織の修復と再構築には72時間程度の時間を要すると考えられた。本研究により、女性がレジスタンス運動を安全かつ効果的に実施するための休息期間の目安を示すことができたといえよう。

付記

本研究は令和2年度二階堂奨励研究費の補助を受けて行ったものである。

引用文献

- 1) 安部孝, 福永哲夫 (1995) 日本人の体脂肪と筋肉分布, 95-97. 杏林書院, 東京.
- 2) Bickel CS, Slade J, Mahoney E, Haddad F, Dudley GA, Adams GR (2005) Time course of molecular response of human skeletal muscle to acute bouts of resistance exercise, *Journal of Applied Physiology*, 98 (2) :482-488.
- 3) Brancaccio Paola, Limongelli Francesco Mario, D'Aponte Antonio, Narici Marco, Maffulli Nicola (2008) Changes in skeletal muscle architecture following a cycloergometer test to exhaustion in athletes, *Journal of Science and Medicine in Sport; Belconnen*, 11 (6) : 538-541.
- 4) 藤田英二, 沢井史穂, 田中寿志, 福永哲夫 (2015) 圧力計を搭載した超音波装置によるヒト筋硬度の評価, *理学療法学*, 42 (3) : 255-261.
- 5) 岩本陽子, 久保潤二郎, 伊藤雅充, 竹宮隆, 浅見俊雄 (2002) 月経周期に伴う等尺性随意最大筋力の変動, *体力科学*, 51 : 193-202.
- 6) 川道幸司, 山口鉄生, 宮脇鈴子, 岡本和久, 植村直子, 高田信二郎 (2017) 健常者の下肢骨格筋における筋硬度の特性—超音波エラストグラフィを応用した筋硬度の解析—, *The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine*, 54 : : 800-807.
- 7) 小林拓也, 中村雅俊, 梅垣雄心, 池添冬芽 (2014) 筋力増強運動における運動速度と収縮様式の違いが骨格筋の微細損傷に及ぼす影響, *理学療法学*, 41 (5) : 275-281.
- 8) 村木里志, 福田修, 福元清剛 (2009) 筋の厚さ(量)と硬さ(質)から筋力を推定する方法の開発, 第24回健康医科学研究助成論文集, 24 : 126-133.
- 9) Murayama M, Nosaka K, Yoneda T, Minamitani K (2000) Changes in hardness of the human elbow flexor muscles after eccentric exercise, *European Journal of Applied Physiology*, 82 (5-6) : 361-367.
- 10) 中野雅之, 角田直也, 西山一行, 佐藤三千雄, 堀川浩之, 久光正 (1995) 長距離走者の筋硬度からみた性差, *国士舘大学体育研究所報*, 14 : 53-56.
- 11) 永富良一 (2014) 骨格筋と炎症, *体力科学*, 63 (1) : 15.
- 12) Niitsu M, Michizaki A, Endo A, Takei H, Yanagisawa O (2011) Muscle hardness measurement by using ultrasound elastography: a feasibility study. *Acta Radiologica*, 52 : 99-105.
- 13) 岡崎倫江, 那須千鶴, 吉村和代, 曾田武史, 津田拓郎, 高畑哲郎, 矢倉千昭 (2008) 健常若年女性における月経周期中の大腿筋群筋硬度の変動, *理学療法科学* 23 (4) : 509-513.
- 14) Sarwar R, Beltran Niclos B, Rutherford OM (1996) Changes in muscle strength, relaxation rate and

fatiguability during the human menstrual cycle,
The Journal of Physiology, 493 (1) : 267-72.

- 15) 柴田景子, 田中寿志, 沢井史穂 (2020) 荷重超音波装置を用いた上腕及び大腿における筋硬度の年齢差と性差の検討, 東京体育学会, 11 : 31-38.
- 16) 須永美歌子 (2022) 月経周期に伴うコンディションの変化はスポーツパフォーマンスに影響するのか, 女性心身医学, 26 (3) : 294-298.
- 17) 鈴木正寛, 佐藤崇, 小宮秀明 (2013) 上腕筋群における局所運動後の骨格筋の硬化と筋肉痛との関係, 理学療法科学, 28 (3) : 389-393.
- 18) 寺沢正男, 岩崎昌三 (1981) 硬さのおはなし一, pp. 29-52, 日本規格協会, 東京.