

研究報告



下腿三頭筋筋力トレーニング中の局所振動刺激併用が 筋肥大効果に与える影響 ～超音波診断装置による筋厚の即時的変化を用いた検討～*

村上ま比呂^{1) 2)}・越智 亮^{1) 3)}・林 尊弘^{1) 3)}

【要 旨】

【目的】本研究の目的は、健常若年者を対象に下腿三頭筋の筋力トレーニング（以下、RT）中の局所振動刺激（以下、LV）の有無とLV機器の違いが筋肥大効果に及ぼす影響について明らかにすることである。【方法】健常若年者41名を対象とし、RTとして3分間の踵挙上のみを行う群、RTに低周波LVを加える条件のLV①群、高周波LVを加える条件のLV②群の3群を設定した。3群のRTの前後に超音波診断装置を用いて腓腹筋内側頭の筋厚と筋輝度、および足関節底屈の等尺性最大筋力発揮時の筋電図活動量、足関節他動的背屈の際の受動トルクからスティフネスを評価した。【結果】RTの後、筋厚は3群とも有意に増加し、筋輝度はLV②群を除き低下した。腓腹筋内側頭の筋電図活動量は3群とも同程度に筋活動量の低下が生じ、スティフネスは増加する傾向にあった。【結論】3つの群ともに同程度の筋肥大効果であり、振動刺激の有無や適用する機器の違いによる筋肥大への追加効果は明らかではなかった。

キーワード：超音波診断装置、下腿三頭筋、局所振動刺激

はじめに

近年、筋力トレーニング（resistance training；以下、RT）に電気刺激や振動刺激を併用することでRTの筋力増強や筋肥大の効果を促進させる運動療法がよく行われている。全身振動刺激（whole-body vibration；以下、WBV）装置と呼ばれる振動

プラットフォーム上でスクワット等のRTを行う運動療法は、地上でのRTと比べて筋力増強効果の促進や柔軟性の改善効果があるとされている¹⁾。また、RTとWBVの併用は、活動性が高い高齢者よりも虚弱な高齢者や高齢女性のような対象者の方で筋力増強効果が高いことが明らかにされている²⁾。さらにRittwegerら³⁾は、WBVを用いた静的スクワット運動は、WBVを用いない同一運動よりも筋疲労に至るまでの時間が短かったことを報告している。従って、振動刺激を併用したRTは効率よく虚弱高齢者の筋力増強に用いることができると考えられる。

WBV装置は高価であることと、振動盤上で立位姿勢を保持できる能力のある対象者に限られる等の制約がある⁴⁾。そのため、臨床に取り入れやすい振動刺激装置はマッサージ器のような局所振動刺激（local vibration；以下、LV）であると考えられるが、LVを併用したRTに関する報告はWBVに比べて少ない。Souronら⁵⁾は、100 HzのLVを若年者と高齢者の大腿直筋の筋腹に適用し、4週間の膝関節伸展筋のRTを実施したところ、両群

* Effects of resistance training for triceps surae muscle combined with local vibration stimuli on expected muscle hypertrophy ~ Validated by immediate changes in muscle thickness using the ultrasonic echo ~

1) 星城大学大学院健康支援学研究科
(〒476-8588 愛知県東海市富貴ノ台2丁目172番地)
Mahiro Murakami, PT, Akira Ochi, PT, Ph.D, Takahiro Hayashi, PT, Ph.D: Graduate School of Health Care Studies, Seijoh University
2) メイトウホスピタル リハビリテーション科
Mahiro Murakami, PT: Department of Rehabilitation, Meitoh Hospital
3) 星城大学 リハビリテーション学部
Akira Ochi, PT, Ph.D, Takahiro Hayashi, PT, Ph.D: Faculty of Rehabilitation and Care, Seijoh University

E-mail: mahiro.murakami93@gmail.com

(受付日 2023年6月6日／受理日 2023年9月13日)

ともに最大筋力の増大と垂直跳びのパフォーマンスが向上したことを報告している。また、サルコペニアと診断された高齢者の筋に対する振動刺激の影響を調査した研究では、300 HzのLVを大腿部の筋に週1回15分～週3回15分を12週間与えた結果、対象者の最大等尺性筋力の向上と速筋線維の筋線維数の増加が認められている⁶⁾。LVによる筋力増強効果は適用される振動周波数によっても違いがあり、60-80 Hzの周波数帯よりも8-30 Hzの周波数帯の方が筋活動の活性化や最大筋力の向上に有効であると報告されているものの、限られた知見だけで適用時間、被験筋、対象者の年齢に違いがあり、筋肥大効果を向上させる振動設定については不明な点が多い⁷⁾。

一定期間のRT後の筋肥大がどの程度得られるかを予測する試みとして、超音波診断装置（エコー）を用いてRT直後の筋厚の即時的変化をみる方法がある。Hironoら⁸⁾は、6週間の膝関節伸展RT後の大腿四頭筋の筋厚増大量、すなわち筋肥大の程度が、1回目のRT直後の即時的筋厚増大量、すなわちRT直後の筋腫脹と有意な正の相関があることを認め、即時的な筋厚変化が大きいRTは一定期間後の筋肥大効果が高いトレーニングである可能性を示した。また、RT直後の筋腫脹により、筋の横断方向や長軸方向の硬さの指標である筋硬度や受動トルクが増加することが明らかにされている^{9) 10)}。

我々は将来的に廃用症候群により下腿三頭筋の筋萎縮を呈した虚弱高齢者に対し、起立運動や立位保持運動にLVを併用したトレーニングの実施を考えている。そこで、臨床で用いやすい2種類のLV機器に着目し、LV適用が下腿三頭筋の筋肥大効果を高めるか、また筋肥大効果が認められるとすればより効果が高いのはどちらのLV機器かをまず明らかにすることを考えた。本研究の目的は、健常若年者を対象に、下腿三頭筋RTの間のLV適用の有無とLV機器の違いが、下腿三頭筋の筋肥大効果に及ぼす影響について明らかにすることである。

対象および方法

1. 対象

対象は健常若年者41名とした（年齢 20.5 ± 1.2 歳、BMI 21 ± 2.1 kg/m²、男性17名）。足関節に整形外科的疾患や疼痛を有する者、または既往により足関節に重篤な関節可動域制限がある者は除外した。各対象者には研究内容を説明し書面にて参加の同意を得た。対象者にボールを蹴る足がど

ちらかを聴取し、蹴る側の足を対象肢とした。後述の下腿三頭筋のRTにおける振動刺激併用の有無とLV機器の違いにより3群を設定し、ランダムに3群に振り分けた。本研究は星城大学研究倫理委員会の承認を得て実施した（承認番号：2022C0010）。

2. 下腿三頭筋のRT課題

下腿三頭筋のRT課題は3分間の踵挙上とした。対象者の前に設置されたテーブルの台上を、対象者に両手の指尖で触れさせた上で最大限の踵挙上位を保持するよう指示した。課題実施中は最大努力を保持するよう、検査者から適宜声掛けを行った。このRTのみを行う群をLV無群とした。RTに2つの条件のLVを併用した群をそれぞれLV①群とLV②群とし、表1に各群の対象者の基本情報を示した。LV①の条件として家庭用マッサージ器（ATEX社、AX-HXL195）を使用し、下腿最大周径部に振動子が当たる高さで対象者がやや圧迫感を感じる強度で巻きつけた（図1）。なお、振動刺激中にマッサージ器が落下しやすいため、マッサージ器と対象者の下腿外側部を粘着テープで貼り止めた。LV②の条件としてハンディーマッサージャー（スライヴ社、MD-013 VT）を使用し、腓腹筋内側頭筋腹部に軽度の圧迫が加わる程度に徒手的に振動子を当てた（図1）。

3. 計測項目

前述の筋疲労課題の前後に、対象肢の腓腹筋内側頭の筋厚、筋輝度、下腿三頭筋の筋腱複合体ステイフネス、足関節底屈最大等尺性筋力発揮時の腓腹筋内側頭の筋活動量を計測した。

腓腹筋内側頭の筋厚と筋輝度の測定には超音波診断装置（キャノンメディカルシステム社、Viamo100）を使用した。対象者には測定部位を十分に露出できるように短いズボンを着用させた。測定肢位は股関節、膝関節90°とした座位とし、下腿長の距離近位30%の位置¹¹⁾にマーキングを行った後に8～12 MHzリニア型プローベにてBモードで測定した。下腿三頭筋全体が描出できる深度（5～6 cm）に設定し、対象者に応じて対応した。ゲインはすべて160 dBに統一し、フォーカスは最上部に設定した¹²⁾。測定時、ジェルを塗布したプローベを長軸に対して垂直に接触させ、筋を圧迫しないように固定し、静止画を3枚保存した。得られた画像に対して超音波診断装置に内蔵されているデジタルメジャーを使用し、腓腹筋内側頭の筋厚を測定した。その際、骨膜と筋膜は除

表 1. 各群の対象者の基本情報

	LV 無群 (n = 13)	LV ①群 (n = 14)	LV ②群 (n = 14)
男 / 女	6 / 7	7 / 7	4 / 10
年齢 (歳)	20.6 ± 0.9	21.5 ± 1.1	19.6 ± 0.8
身長 (cm)	165.0 ± 8.1	163.9 ± 8.4	161.4 ± 6.6
BMI (kg/m ²)	21.5 ± 2.4	20.2 ± 1.8	21.1 ± 1.9

平均±標準偏差. LV 無; 下腿三頭筋の RT (踵挙上) のみ, LV ①; 57 Hz の振動マッサージ器を下腿に巻き付ける LV ①群, LV ②; 101 Hz の振動ハンディマッサージャーを腓腹筋に徒手的に加える LV ②群の対象者の基本属性.

A. LV①条件



B. LV②条件



図 1. 下腿三頭筋の筋カトレーニング (踵挙上) と併用した局所振動刺激装置の 2 種類

A. 57 Hz の振動マッサージ器を下腿に巻き付ける LV ①条件, および B. 101 Hz の振動ハンディマッサージャーを腓腹筋に徒手的に加える LV ②条件.

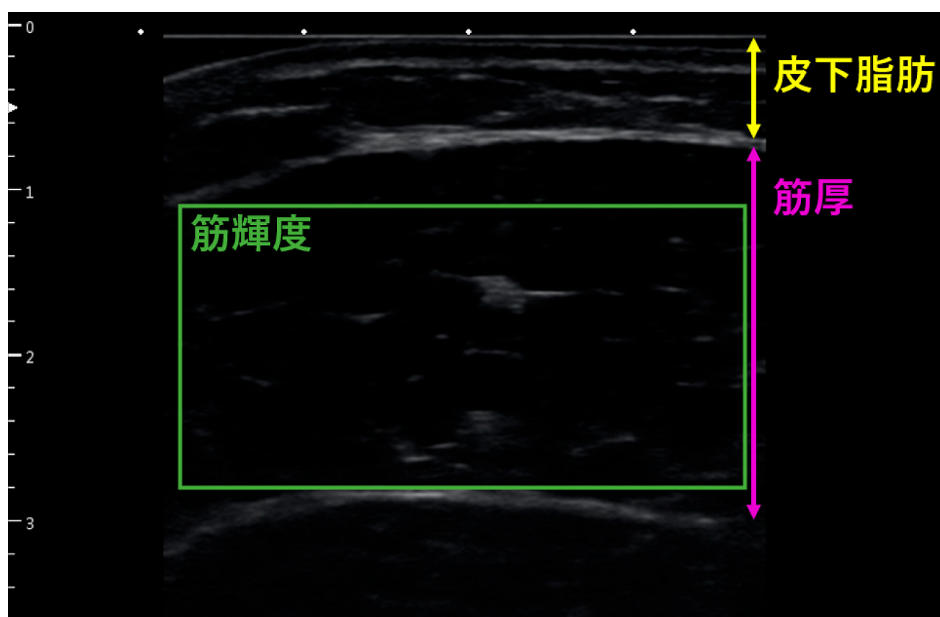


図 2. 超音波診断装置を用いた画像から得られる筋厚, 筋輝度の測定範囲

外した。筋輝度は、筋厚と同様に骨膜と筋膜は除外した腓腹筋内側頭の範囲を四角形で囲って測定範囲とした¹²⁾。なお、測定範囲は対象者毎に筋疲労課題前後で同じ測定範囲の面積になるように設定した。筋輝度解析には、Image J (ver. 1.53) を使用し、8bit gray-scale のヒストグラム分析により 0 から 255 の 256 段階でピクセルの白さの評価を行った。筋厚、筋輝度はそれぞれ 3 枚の画像から抽出し、3 つのデータの平均値を採用した (図 2)。

下腿三頭筋の筋腱複合体スティフネスの測定には、特別制作した受動トルク測定器を使用した¹³⁾。測定肢位は背臥位とした。下腿三頭筋の柔軟性は約 3°, 6°, 9°, 12° に測定器を背屈方法に動かした際の底屈力を記録し、フィットさせた直線の一次関数式の傾きを算出した。

腓腹筋内側頭の筋活動の導出には表面筋電計 (Noraxon 社, Ultium) を用いた。腓腹筋内側頭の筋腹中央部に十分な皮膚処理の後、ディスプレイ電極 (Ambu 社, ブルーセンサー P-00-S) 電極間距離 3 cm で貼付した。筋電計本体に内蔵されているアース電極はそれぞれの筋の電極貼付部の近傍とした。前述の受動トルク測定器を使用し、底屈筋力発揮時に機器や身体がずれないようにするため双方をベルト固定した。検査者の合図の下で足関節底屈の最大等尺性筋力発揮を行うよう指示し、3 秒間の筋電図活動量を記録した。最大筋力発揮は 2 回実施し、筋活動量が大きい方をデータとして採用した。

4. 統計処理

まず、3 群間の基本属性の比較を、連続変数につ

いては一元配置分散分析を、カテゴリー変数については χ^2 検定を用いて行った。一元配置分散分析の事後解析については Bonferroni の多重比較検定を用いて行った。次に、振動条件と筋力トレーニング前後の変化との関連性の検討には、線形混合モデルを用いた二元配置分散分析を用いた。振動条件 (3 群)、時間 (2 時点)、刺激条件×時間の交互作用項を検討した。多重比較検定には、Bonferroni 法を用いた。統計学的有意水準は 5%、有意傾向水準は 10% とし、すべての統計解析は IBM SPSS Statistics 29 (IBM Corp.) を用いて実施した。

結果

対象者の基本属性について年齢、身長、体重、BMI のすべての項目で群間差は認められなかったが、男女比においては有意差を認めた。

線形混合モデルを用いた二要因分散分析の結果を表 1 に示した。筋厚は時間の主効果が有意 ($F = 19.224$, $p < 0.001$) であり、筋厚は 3 条件共に介入後に有意に増加した。筋輝度は刺激条件×時間の交互作用が有意 ($F = 6.437$, $p = 0.004$) であり、LV 無群と LV ①群の介入後に有意な減少が認められた (LV 無群: $F = 6.067$, $p = 0.030$, LV ①群: $F = 20.629$, $p < 0.001$)。下腿三頭筋の筋腱複合スティフネスは主効果が有意であり ($F = 5.108$, $p = 0.030$)、全体として増加していたが、交互作用が有意な傾向を示し (交互作用の $F = 2.865$, $P = 0.069$)、LV ①群のみが減少する傾向にあった。腓腹筋の筋活動量は時間の主効果が有意であり ($F = 4.299$, $p = 0.045$)、3 条件とも介入後に有意に低下していた。

表 2. 下腿三頭筋の筋力トレーニング前後の各パラメータの測定値

		LV 無群 (n = 13)	LV ①群 (n = 14)	LV ②群 (n = 14)	時間主効果 p 値	群間主効果 p 値	交互作用 p 値
筋厚 (mm)	RT 前	18.1 ± 4.2	32.1 ± 14.5	64.9 ± 17.0	<0.001	0.978	0.716
	RT 後	18.9 ± 4.5	18.5 ± 5.4	18.5 ± 3.3			
筋輝度 (a.u.)	RT 前	6.1 ± 5.0	6.8 ± 3.1	4.2 ± 1.3	<0.001	0.251	0.004
	RT 後	5.3 ± 4.1	5.4 ± 2.7	4.2 ± 1.2			
Stiffness (N/deg)	RT 前	2.6 ± 1.4	2.9 ± 1.3	2.0 ± 1.0	0.030	0.156	0.069
	RT 後	3.3 ± 1.4	2.7 ± 1.0	2.5 ± 0.7			
GCM EMG (μ V)	RT 前	383.0 ± 174.6	377.1 ± 145.2	275.7 ± 125.0	0.045	0.052	0.797
	RT 後	329.0 ± 116.5	354.5 ± 189.1	232.0 ± 83.2			

平均±標準偏差。LV 無; 下腿三頭筋の RT (踵挙上) のみ, LV ①; 57 Hz の振動マッサージ器を下腿に巻き付ける LV ①群, LV ②; 101 Hz の振動ハンディマッサージャーを腓腹筋に徒手的に加える LV ②群, RT 前; 筋力トレーニング前, RT 後; 筋力トレーニング後, 筋輝度の単位 a.u.; arbitrary unit, GCM EMG; 腓腹筋内側頭筋活動量。

考察

本研究の下腿三頭筋のRTにおいて、3条件とも筋厚が有意に増加した。また、腓腹筋内側頭の筋活動量はRT後に3条件とも有意に低下していた。このことはLVの適用有無、周波数の違いにおいて3条件間で違いはなく、同程度に筋腫脹と筋疲労が生じていたことを意味する。一方で、筋輝度については下腿三頭筋のRT後にLV無群とLV①群において減少し、LV②群は不変であった。またスティフネスにおいてもRT後に3条件間で違いが認められ、LV無群とLV②群で有意に増加し、LV①群では減少する傾向を認めた。したがって本研究における下腿三頭筋のRTの間のLV適用の有無とLV周波数の違いについて、筋肥大効果の違いは明らかにできなかった。

一般的にRT後の即時的な筋厚増大は筋がRTによる刺激を受け、一時的に筋損傷が生じることによる筋線維外の浮腫、すなわち筋腫脹に起因すると報告されている¹⁴⁾。LV刺激による当該筋の背景筋電図活動を調査した先行研究では高周波数帯よりも低周波数帯の方で筋活動電位が高かったとする報告もあり、例えばPamukoffら¹⁵⁾は大腿四頭筋に適用したLV刺激において、60 Hzよりも30 Hzの低周波数の方が大腿直筋の背景筋電図活動が高かったとしている。本研究で使用したLV刺激においてLV①群は57 Hzであり、Pamukoffら¹⁵⁾が報告した60 Hzに周波数帯が近似している。したがって、本研究のLV①よりも低い周波数帯の方がRT中の背景筋活動量が大きくなることが予想され、LV無との違いが明確にならなかった可能性がある。またLV②群は101 Hzであり、100 HzのLVを大腿四頭筋と前脛骨筋に適用したSouronら^{5) 16)}の報告は周波数帯が近く、彼らは4週もしくは8週のLVを併用したRT後に参加者の最大筋力が増加したことを報告している。このように、LV併用なしと比べてLVを併用したRTでは筋肥大効果が現れることが報告されているが、長期的な介入が必要になる可能性があり、即時的な筋厚変化を調査した本研究のLV②においてLV無との違いが明らかにならなかったものと思われる。さらに、本研究ではLV①とLV②で振動子の体表面への接触面積や圧迫量などに違いがあり、結果に影響を及ぼした可能性もある。これらによる影響が報告された先行研究は見当たらないため、今後のさらなる検討が必要である。

筋輝度においては、RT直後では筋線維の微細損傷による炎症反応や間質液の増加による浮腫が輝度の値の上昇を引き起こすとされている¹⁷⁾。本研

究ではLV②において筋輝度が不変であったものの、LV無とLV①では低下しており、先行研究とは異なる結果となった。一方でRT後の筋輝度の急性反応については輝度の増減に関して一貫性がないことが一部の先行研究で報告されている¹⁸⁾。そのため本研究における下腿三頭筋RTの3条件間の筋輝度の即時的な変化の違いについて解釈するには限界があった。

スティフネスは筋の長軸方向の他動的伸張に対する抵抗、すなわち筋の硬さを表しており、筋の横断方向の硬さを示す筋硬度と関連している¹⁹⁾。高負荷のRT後に筋の「硬さ」が増加する要因として、筋線維の微細損傷、組織間での水分移動の増加、疲労物質である乳酸の蓄積等による筋内圧の上昇変化が影響しているとされる²⁰⁾。筋に対するLVの適用により、体表面の血流量が増加することが報告されている²¹⁾。本研究におけるLV無のスティフネスがRT後に増大したのに対しLV①群において減少が認められたことは、LV刺激によって組織の血流量増加により、疲労物質の蓄積や筋浮腫を軽減させた可能性が考えられる。ただし、本研究のLV②についてはLV無と同様にRT後にスティフネスの増加が認められた。このことについてLV①では振動子が下腿後面全体に接触していたのに対し、LV②では振動子の刺激範囲が限定的であったというLV適用の方法や振動の接触面積の違いが影響を与えたのではないかと考えた。

本研究にはいくつかの限界が挙げられる。まず、対象者が健常若年者であったことから、対象者によっては下腿三頭筋のRT課題を実施しても十分な筋疲労が生じていなかった可能性がある。また、LV②とLV①では固定方法の違いによる圧迫の程度や刺激範囲等、振動刺激の適用方法が異なっていた。これらの要因により筋厚の即時変化等においてLV②やLV①の追加効果が反映されなかった可能性がある。今後は、RTに振動刺激を併用した際の筋肥大効果について、虚弱高齢者を対象に振動刺激の適用方法も検討して明らかにしていく必要がある。

結論

下腿三頭筋のRT課題中に周波数の異なる2種類の振動刺激を加え、筋厚の即時変化からそれぞれの筋肥大効果に違いがあるかどうかを調査した。本研究の結果からLV②もLV①もLV無と同程度の筋肥大効果であり、振動刺激の有無や適用する周波数の違いによる追加効果は明らかではなかった。

【文 献】

- 1) 越智亮：シンプル理学療法学シリーズ，物理療法学テキスト改訂第3版．木村貞治，沖田実，Goh Ah Cheng（編），南江堂，東京，2021，pp. 316-321.
- 2) Rehn B, Lidström J, et al.: Effects on leg muscular performance from whole-body vibration exercise: a systematic review. *Scand J Med Sci Sports*. 2007; 17 (1) : 2-11.
- 3) Rittweger J: Vibration as an exercise modality: how it may work, and what its potential might be. *Eur J Appl Physiol*. 2010; 108 (5) : 877-904.
- 4) Wollersheim T, Haas K, et al.: Whole-body vibration to prevent intensive care unit-acquired weakness: Safety, feasibility, and metabolic response. *Crit Care*. 2017; 21 (1) : 9.
- 5) Souron R, Besson T, et al.: Neural adaptations in quadriceps muscle after 4 weeks of local vibration training in young versus older subjects. *Appl Physio Nutr Metab*. 2018; 43 (5) : 427-436.
- 6) Pietrangelo T, Mancinelli R, et al.: Effects of local vibrations on skeletal muscle trophism in elderly people: mechanical, cellular, and molecular events. *Int J Mol Med*. 2009; 24 (4) : 503-512.
- 7) Masud AA, Shen CL, et al.: Impact of Local Vibration Training on Neuromuscular Activity, Muscle Cell, and Muscle Strength: A Review. *Crit Rev Biomed Eng*. 2022; 50 (1) : 1-17.
- 8) Hirono T, Ikezoe T, et al.: Relationship Between Muscle Swelling and Hypertrophy Induced by Resistance Training. *J Strength Cond Res*. 2022; 36 (2) : 359-364.
- 9) Murayama M, Nosaka K, et al.: Changes in hardness of the human elbow flexor muscles after eccentric exercise. *Eur J Appl Physiol*. 2000; 82: 361-367.
- 10) Janecki D, Jarocka E, et al.: Muscle passive stiffness increases less after the second bout of eccentric. *J Sci Med Sport*. 2011; 14 (4) : 338-343.
- 11) Ikezoe T, Nakamura M, et al.: Association between walking ability and trunk and lower-limb muscle atrophy in institutionalized elderly women: a longitudinal pilot study. *J Physiol Anthropol*. 2015; 34 (1) : 31.
- 12) 川上裕貴，瀧原純・他：超音波診断装置を用いた大腿直筋と中間広筋の筋厚および筋輝度評価の信頼性．*日本基礎理学療法学雑誌*. 2019; 22 (1) : 48-53.
- 13) 越智亮，福本将久・他：特別制作した受動トルク計測器で得られた下腿三頭筋スティフネスの基準関連妥当性と再現性の検証．*理学療法科学*. 2018; 33 (4) : 591-596.
- 14) Damas F, Phillips SM, et al.: Early resistance training-induced increases in muscle cross-sectional area are concomitant with edema-induced muscle swelling. *Eur J Appl Physiol*. 2016; 116 (1) : 49-56.
- 15) Pamukoff DN, Ryan ED, et al.: The acute effects of local muscle vibration frequency on peak torque, rate of torque development, and EMG activity. *J Electromyogr Kinesiol*. 2014; 24 (6) : 888-894.
- 16) Souron R, Farabet A, et al.: Eight weeks of local vibration training increases dorsiflexor muscle cortical voluntary activation. *J Appl physiol*. 2017; 122 (6) : 1504-1515.
- 17) 池添冬芽：超音波エコーを用いた筋肉の評価と理学療法への応用．*理学療法ジャーナル*. 2016; 50 (2) : 203-213.
- 18) Wong V, Abe T, et al.: The influence of biological sex and cuff width on muscle swelling, echo intensity, and the fatigue response to blood flow restricted exercise. *J Sports Sci*. 2019; 37 (16) : 1865-1873.
- 19) Nakamura M, Ikezoe T, et al.: Relationship between Muscle Stiffness Measured by the Muscle Hardness Meter and Passive Torque or Myotendinous Junction Displacement. *Journal of the Japanese Physical Therapy Association*. 2014; 17 (1) : 193-199.
- 20) 山口和之，宮下智・他：筋疲労の評価法．*理学療法*. 1997; 14: 219-227.
- 21) Zange J, Molitor S, et al.: In the unloaded lower leg, vibration extrudes venous blood out of the calf muscles probably by direct acceleration and without arterial vasodilation. *Eur J Appl Physiol*. 2014; 114: 1005-1012.