

スクワットジャンプ高の違いが筋力及び筋収縮特性に及ぼす影響

Effect of muscle force and contractile properties on squat jump performance

平塚和也, 角田直也

Kazuya HIRATSUKA and Naoya TSUNODA

ABSTRACT

The purpose of this study was to clarify the effect of muscle force and contractile properties on squat jump (SJ) performance.

The subjects were 142 male collegiate students. The experiment involved the subjects performing a SJ test. Their jump height of SJ were measured using mat switch. The subjects were extracted according to their jump height of SJ by following criteria: Excellent group (HSJ; n=21, M+1SD) and Poor group (LSJ; n=21 M-1SD). The peak torque of knee extension and flexion under the condition of isokinetic on angular velocity of 180deg/sec were measured using dynamometer (BIODEX system III). The contractile properties of rectus femoris (RF), vastus medialis (VM), vastus lateralis (VL) and biceps femoris (BF) in thigh were assessed by tensiomyography (TMG method). Contractile properties of contraction time (Tc) and maximal displacement of the muscle belly (Dm) were analyzed in each groups.

Jump height in HSJ was significant higher than LSJ. The peak torque of knee extension in HSJ was significantly higher value than LSJ. And also, same tendency was observed for knee flexion. Tc of RF in LSJ was significantly longer contraction time than HSJ. And also, same tendency was observed for BF.

In this study, peak torque for knee extension and flexion in HSJ were significantly differed compare to the LSJ. And contraction time for rectus femoris and biceps femoris in HSJ were significantly lower compared to the LHJ. From these results, it was considered that contraction time and muscle force may affect to squat jump performance.

Key words; tensiomyography, contraction time, squat jump

I. 緒 言

ヒトの身体運動は複数の関節運動が組み合わせられることによって成り立っており、個々の関節運動は骨格筋の収縮により引き起こされる。つまり、ヒトの身体活動の原動力は骨格筋であるため、その特性の情報はスポーツ科学及び臨床医療分野において活用され、広範囲な応用が期待できる。

骨格筋の特性を評価する新たな一手法として Tensiomyography (TMG) が開発された¹⁸⁾。TMGは、電気刺激装置を用いて骨格筋上の体表面に電気刺激を与え、骨格筋が収縮する際に、その径が側方へ変形・拡大するときに生じる変位を計測し、変位-時間曲線から変位とその時間的情報を算出して筋の収縮特性を評価したものである。この手法の利点は、自発的な努力を要せず、非侵襲性に加え、簡便性^{9) 11)} 及び再現性^{9) 13)} に優れている。そのため、被験者の負担が少なく、モチベーションによる影響を取り除くとともに、短時間の繰り返し測定を可能とする。また、測定手順は実施が容易であり、測定で得られたデータは特別な後処理やフィルタリングを必要としないため簡便に評価することが可能である。

Valenčič and Knez¹⁸⁾ は、TMGを用いて筋の収縮特性を評価した。その結果、TMGから算出された収縮速度は筋によって異なることを報告した。また、Dahmane et al.⁴⁾ 及びŠimunič et al.¹⁴⁾ は、TMGから算出された収縮時間が筋線維タイプと関連していることを報告している。つまり、TMGを用いることで、骨格筋の特性について貴重な情報を提供することができる。

跳躍動作は、ヒトのダイナミックな身体運動の一つである。その動作は日常生活や競技動作において多く用いられ、特に垂直跳びは、体力の指標を支持するものとしても重要な役割を果たしてきた⁵⁾。一般的に、垂直跳びの跳躍高は、踏切時の重心の鉛直速度によって決定される¹⁾。その鉛直速度は鉛直力積によって決まるため、鉛直速度を高めるためには鉛直方向に大きな力（パワー）を

地面に加える必要があると報告されている¹⁾。つまり、跳躍高を高めるためには、下肢の筋力・パワー発揮能力が重要であると考えられる。

これまでに、跳躍高と下肢の筋力・パワーとの関係について検討した研究は数多くある^{2) 6) 7) 12) 17)}。Rouis et al.¹²⁾ はバスケットボール選手を対象に跳躍高と異なる角速度における膝関節伸展・屈曲筋力との関連について検討したところ、跳躍高と180deg/sec及び240deg/secでの膝伸展・屈曲筋力には有意な相関関係があると報告されている。また、Tsiokanos et al.¹⁷⁾ は下肢の3関節の等速性筋力と跳躍高との間に有意な相関関係があると報告されている。これらの先行研究の結果から、跳躍高と下肢の筋力・パワーには密接な関係があり、跳躍高が高いと下肢の筋力・パワー発揮能力が優れていることが示唆され、このことは、下肢の筋力・パワーを生み出す筋の収縮特性においても同様な影響を示すことが予想される。しかしながら、跳躍能力の相違が筋の収縮特性に及ぼす影響について、筋ごとに検討したものは見当たらない。この未解決の事項を究明することは、跳躍能力の優劣が競技力の差としてあらわれる種目において、跳躍能力を評価する際の有益な知見になることが考えられる。

そこで本研究では、跳躍高が高い群と低い群に選定し、跳躍高の違いが膝関節の伸展・屈曲筋力や大腿筋群の収縮特性に及ぼす影響について検討した。

II. 方 法

1. 被験者

被験者は、体育学部所属男子大学生142名を対象とした。跳躍動作はスクワットジャンプ（以下、SJ）とし、跳躍高の違いが筋力や収縮特性に及ぼす影響を調査するために、まず、跳躍高が高い群（以下、HSJ）、跳躍高が低い群（以下、LSJ）の2群を以下の手続きで選定した。全被験者にSJを行わせ、跳躍高の平均値（M）と標準

偏差 (SD) を算出したところ、 36.0 ± 6.0 cmであった。跳躍高の平均値 (M) 及び標準偏差 (SD) から HSJ は、 $M+1SD$ 以上 (42.0 cm 以上)、LSJ は、 $M-1SD$ 以下 (30.0 cm 以下) の者に分類した。この際、いずれの群にも属さない者 (跳躍高が $M+1SD$ 以下から $M-1SD$ 以上) は 2 群から除外した。その結果、HSJ が 21 名 (年齢: 20.4 ± 1.7 歳、身長: 172.0 ± 5.1 cm、体重: 74.0 ± 15.7 kg)、LSJ が 21 名 (年齢: 19.8 ± 1.2 歳、身長: 170.2 ± 6.6 cm、体重: 57.3 ± 8.7 kg) となった。実験を行うにあたり、全ての被験者に本研究の目的、方法及び実験に伴う危険性などを十分に説明し、実験に参加するための同意を得た。なお、本研究は、国士舘大学研究倫理評価委員会によって承諾された。

2. SJ における跳躍高の測定

SJ における跳躍高の測定は、ジャンプマット測定装置 (アプライドオーフィス社製) を用いた。SJ は、手を腰に当て、膝を 90° に曲げた姿勢から、股関節や膝関節の反動動作を用いずに最大努力で跳躍するように指示した。跳躍高は 2 回ずつ測定し、最大値を採用した。

3. 等速性筋力の測定

下肢の筋力を測定するために、多用途筋機能評価運動装置 (System 3、Biodex 社製) を用いた。利き脚において、膝関節伸展・屈曲筋力を $180\text{deg}/\text{sec}$ の角速度で実施した。測定肢位は、椅座位とし、シートに座った被験者の上半身、骨盤部及び測定脚の大腿部を専用のベルトでシートに固定した。ダイナモメーターの回転軸に膝関節の回転中心をアームの長さを調節して合わせ、足関節上部を専用パットで固定した。この筋力測定は、十分なウォーミングアップの後、最大努力で 3 回実施させ、その際の最大値 (ピークトルク) を採用した。

4. 筋収縮特性の測定

筋収縮特性は、TMG 法 (TMG-100、TMG 社製)

を用いて測定した。TMG 法の測定では、電気刺激装置を用いて筋上の体表面に電気刺激を与え、筋が収縮する際に、その径が側方へ変形するとき生じる変位を計測する (Fig.1-a)。被験筋は利き足の大腿直筋 (以下、RF)、内側広筋 (以下、VM)、外側広筋 (以下、VL) 及び大腿二頭筋 (以下、BF) の 4 筋とした。RF、VM 及び VL の測定姿勢は、測定用のベッド上にて仰臥位にさせ、その際、膝屈曲角度が 30 度となるように三角パットを使用した。BF の測定姿勢は、測定用のベッド上にて腹臥位にさせ、足関節の部分に付属の半円柱状パットを配置した。また、被験者には下腿の筋を弛緩させるように指示した。各筋における変位センサーの設置位置は、先行研究¹⁵⁾を参考に配置した。電極位置は、変位センサーを中心に近位部と遠位部に貼付し、電極間距離は 5 cm とした¹⁶⁾。また、電極を接触させる体表は、電極への抵抗を除去するために剃毛処理を行った。電気刺激における単一刺激のパルス幅は 1 ms とした。刺激範囲は 40 mA から 110 mA とし、最大変位が発現するまで 10 mA ずつ増加させた (Fig.1-b)。また、刺激によって筋の疲労及び増強の影響を最小限に防ぐ為、刺激間の休憩時間を 10 秒とした¹⁰⁾。本研究では、TMG の変位-時間曲線から算出した項目は、収縮時間 (以下、 T_c) であった (Fig.1-c)。また、各筋における T_c の合計 (以下、 ΣT_c) も算出し、評価項目として加えた。なお、TMG 法の測定は、習熟した 1 名の測定者が実施した。

5. 統計処理

本研究の分析項目の値は、平均値 \pm 標準偏差で示した。各項目間の差の検定には t 検定を用いた。さらに、平均値の差の程度を検討するために効果量 (d) を算出した。効果量 (d) が 0.2 以上 0.5 未満を効果小、 0.5 以上 0.8 未満を効果量中、 0.8 以上を効果量大とした³⁾。なお、すべての統計処理において 5% 水準未満をもって有意と判定した。

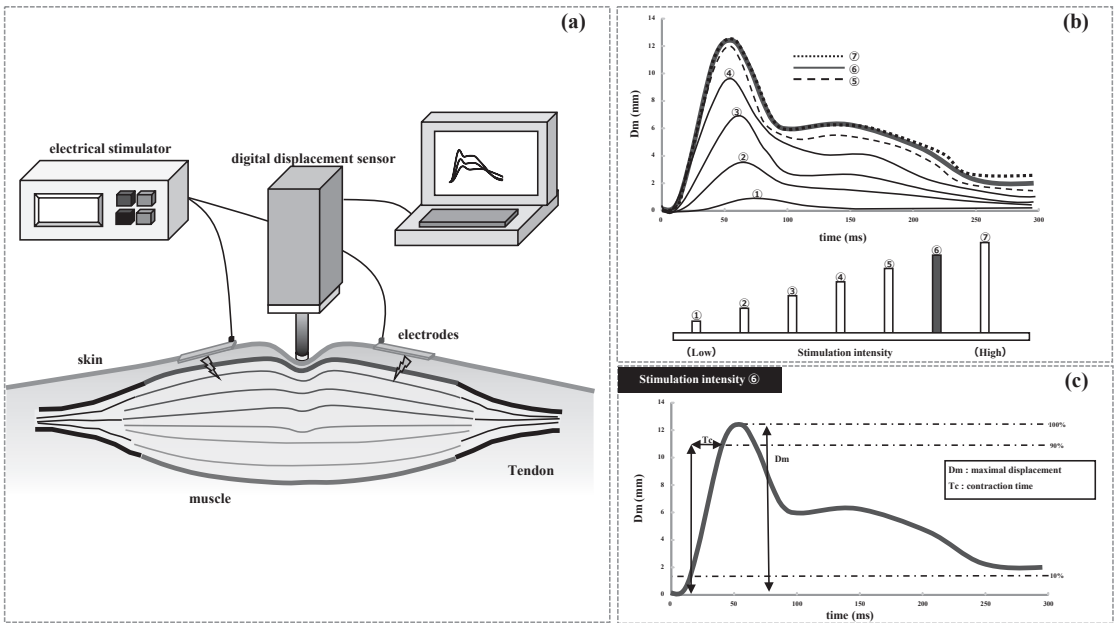


Fig.1 Principle of the TMG method (a), displacement-time curves with stimulation amplitude (b) and definitions of contractile properties (c). (a) : Electrical twitch evokes muscle contraction resulting also in thickening of the muscle belly that is measured by the displacement sensor. Displacement sensor is positioned perpendicularly to the skin surface above the muscle belly and the tip of the sensor is pressed to the muscle, slightly deforming the muscle belly. (b) : The increase in curve magnitude is induced by an increase in stimulation amplitude (typically up to 40–110 mA). Peak displacement is identified by a plateau in displacement curves, despite increased stimulation amplitude. (c) : Dm corresponds to the maximal radial movement of the muscle belly. Tc corresponds to the time lapse from 10% to 90% of Dm. Vc can be calculated as the rate of Dm between 10 and 90% relative to Tc. Dm : maximal displacement, Tc : contraction time.

Ⅲ. 結 果

Fig.2は、HSJとLSJの跳躍高を示した。跳躍高において、HSJが $45.38 \pm 2.66\text{cm}$ であったのに対し、LSJは $26.80 \pm 2.28\text{cm}$ であった。HSJの跳躍高はLSJと比較して有意に高値を示した ($p = 0.00$)。

Fig.3は、等速性 (180deg/sec) の膝関節伸展・屈曲筋力におけるHSJとLSJの比較を示した。膝関節伸展筋力において、HSJが $170.8 \pm 35.6\text{Nm}$ であったのに対し、 $111.3 \pm 20.4\text{Nm}$ であった。膝関節屈曲筋力は、HSJが $107.1 \pm 14.7\text{Nm}$ であったのに対し、 $67.9 \pm 11.4\text{Nm}$ であった。HSJの膝関節伸展・屈曲筋力は共にLSJと比較して有意に高値を示した (膝関節伸展筋力: $p = 0.00$ 、膝関節屈曲筋力: $p = 0.00$)。

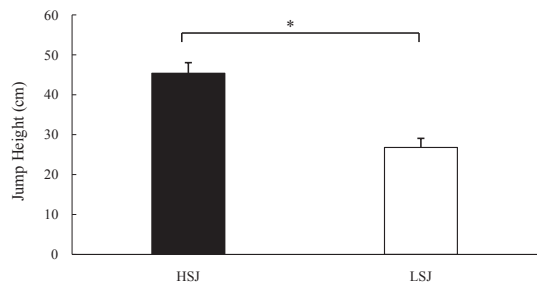


Fig.2 Comparison between HSJ and LSJ groups in squat jump height (cm). *Significant difference between HSJ vs LSJ groups at $p < 0.01$.

Fig.4、Table 1は、TcにおけるHSJとLSJの比較を示した。Σ Tcは、LSJがHSJよりも有意に高値を示した ($p = 0.00$)。RFのTcにおいては、LSJがHSJよりも有意に高値を示し、その効果量は大きであった ($p = 0.00$ 、 $ES = 1.39$)。また、BF

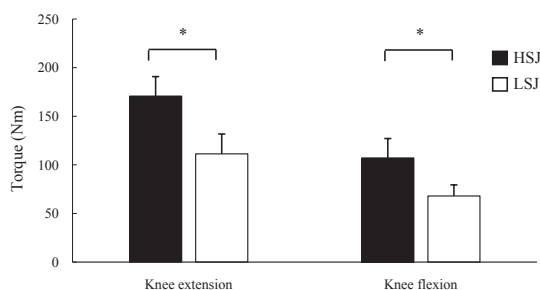


Fig.3 Comparison of isokinetic knee extension and flexion between HSJ and LSJ groups in 180 deg/sec. *Significant difference between HSJ vs LSJ groups at $p < 0.01$.

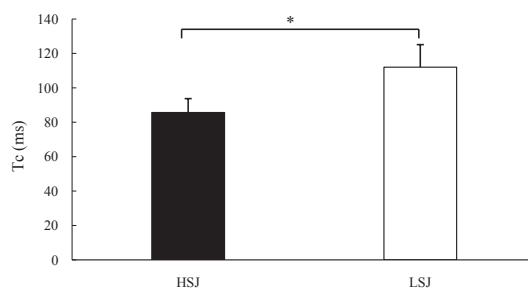


Fig.4 Comparison of ΣTc in HSJ and LSJ groups. *Significant difference between HSJ vs LSJ groups at $p < 0.01$.

Table 1 Comparison of Tc in HSJ and LSJ groups.

	Muscles	HSJ (n=21)	LSJ (n=21)	t (40)	p	ES	Rating
Tc (ms)	RF	22.60 (2.97)	27.39 (3.88)	-4.494	0.00 *	1.39	Large
	VM	21.52 (2.33)	22.89 (2.44)	-1.849	0.07	0.57	Medium
	VL	21.95 (2.50)	23.54 (3.14)	-1.809	0.08	0.56	Medium
	BF	19.58 (5.14)	38.21 (9.75)	-7.750	0.00 *	2.39	Large

Values are mean (standard deviation). ES: effect size; RF: rectus femoris; VM: vastus medialis; VL: vastus lateralis; BF: biceps femoris; Tc: contraction time. *Significant difference between HSJ vs LSJ groups at $p < 0.05$.

も同様な結果を示した ($p = 0.00$, $ES = 2.39$)。一方、VM及びVLは、HSJとLSJ間に有意な差が確認されなかったが、いずれも効果量は中であった (VM: $p = 0.07$, $ES = 0.57$, VL: $p = 0.08$, $ES = 0.56$)。

IV. 考 察

本研究では、全被験者に対してSJを実施させ、跳躍高が高い群 (HSJ) と跳躍高が低い群 (LSJ) の2群に選定した。その結果、跳躍高において、HSJが 45.38 ± 2.66 cmであったのに対し、LSJは 26.80 ± 2.28 cmであった。対応のないT検定をしたところ有意にHSJが高い跳躍高を示していた。大学陸上競技部に所属し、短距離走もしくは混成競技を専門とする男子陸上競技者を対象にSJの

跳躍高を測定した研究⁸⁾によると、SJの跳躍高は 43 ± 5 cmであったことが報告されている。従って、本研究のHSJの跳躍高は、先行研究の結果と同等もしくはそれ以上の跳躍高を示しており、陸上競技の走・混成種目を専門とする競技者と同等以上の高い跳躍高を示すグループであったことが示唆された。

次に、等速性の膝関節伸展・屈曲筋力をHSJとLSJで比較した。その結果、180deg/secの膝関節伸展・屈曲筋力はHSJが有意に高値を示していた。跳躍高と下肢の筋力・パワーとの関係について検討した研究は数多くある。このうち跳躍高と異なる角速度の膝関節伸展・屈曲筋力との関連について検討したRouis et al.¹²⁾によると、跳躍高と180deg/sec及び240deg/secでの膝伸展・屈曲筋力には有意な相関関係があると報告されている。

また、低速、中速及び高速の等速性膝伸展筋力と跳躍高との関係について検討した研究^{2) 6) 7)}では、低速における等速性膝伸展筋力と跳躍高との間に有意な相関関係が認められなかったが、中速及び高速（180deg/sec～300deg/sec）における等速性膝伸展筋力と跳躍高との間に有意な相関関係が認められている。本研究の膝関節伸展・屈曲筋力の角速度は180deg/secであり、中速及び高速に分類される。これらのことから、本研究の結果は、先行研究を支持するものであり、SJにおける跳躍高が高いと中速及び高速の角速度において、膝関節伸展・屈曲筋力も高いことが示唆された。

このように跳躍高が高い人の特徴として、先行研究や本研究の結果から膝関節伸展・屈曲筋力が優れていることが証明されたが、筋力及びパワーを生み出す筋の収縮がどのような特徴を示しているのか不明である。そこで、本研究は、TMGを用いて筋の収縮時間（Tc）をHSJとLSJで比較した。その結果、 ΣTc （Tcの合計）は、LSJと比較してHSJが有意に低値を示した。また、筋ごとにTcをHSJとLSJで比較したところ、RF及びBFにおいてHSJが有意に低値を示した。つまり、SJの跳躍高が高いと大腿筋群における収縮時間が短く、特に、大腿直筋及び大腿二頭筋の収縮時間に差が生じることが示された。股関節－膝関節伸展運動の無負荷最大速度と跳躍高との関係について検討した先行研究¹⁹⁾によると、股関節－膝関節伸展運動の無負荷最大速度の増加に伴い跳躍高が増加することが報告されている。この先行研究と本研究の結果を併せて考えると、股関節及び膝関節伸展動作で活動する大腿直筋や大腿二頭筋の収縮能力（収縮時間の長さ）が跳躍高の高さに寄与したのではないかと推察された。

以上のことから、SJの跳躍高が高い人は、等速性の膝関節伸展・屈曲筋力が高く、大腿直筋及び大腿二頭筋の収縮時間が短いことが明らかとなった。また、TMGを用いて大腿直筋と大腿二頭筋の収縮時間を測定することで跳躍高を評価することができるのではないかと考えられた。しかし

ながら、今回の跳躍動作はSJであり他の跳躍動作においても同様な結果を示すのかは不明である。今後は、反動を用いて行うカウンタームーブメントジャンプ、連続して行うリバウンドジャンプ、台から降りて足が床についた瞬間に再び素早くジャンプするドロップジャンプなども調査していく必要があるだろう。

V. ま と め

本研究では、跳躍高が高い群と低い群に選定し、跳躍高の違いが膝関節の伸展・屈曲筋力や大腿筋群の収縮特性に及ぼす影響について検討した。その結果は以下の通りであった。

1. 等速性（180deg/sec）の膝関節伸展・屈曲筋力は、HSJがLHJよりも有意に高いことが明らかとなった。
2. TMGを用いた大腿筋群の収縮時間は、HSJがLHJよりも有意に短く、特に、大腿直筋と大腿二頭筋に大きな差が生じることが明らかとなった。

本研究は、国土舘大学体育学部附属体育研究の2020年度研究助成によって実施した。

参考文献

- 1) 阿江通良・浜川侃二（1983）. その場から高く跳ぶ跳躍－垂直跳のバイオメカニクス－. Japanese Journal of Sports Sciences, 2 (8) : 590-599
- 2) Bosco, C., Mogroni, P., & Luhtanen, P. (1983). Relationship between isokinetic performance and ballistic movement. European journal of applied physiology and occupational physiology, 51 (3), 357-364.
- 3) Cohen, J. (1992) A power primer. Psychol Bull. 112 : 155-159.
- 4) Dahmane, R., Valenčič, V., Knez, N., Eržen, I. (2001). Evaluation of the ability to make non-invasive estimation of muscle contractile properties on the basis of the muscle belly response. Medical and biological engineering and

- computing, 39 (1), 51-55.
- 5) 深代千之. (2007). 跳躍のしくみ (特集 跳躍動作のバイオメカニクス). 体育の科学, 57 (7), 492-500.
 - 6) Genuario, S. E., & Dolgener, F. A. (1980). The relationship of isokinetic torque at two speeds to the vertical jump. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 51 (4), 593-598.
 - 7) Iossifidou, A., Baltzopoulos, V., & Giakas, G. (2005). Isokinetic knee extension and vertical jumping: are they related?. *Journal of sports sciences*, 23 (10), 1121-1127.
 - 8) 梶谷亮輔, 前村公彦, 山元康平, 関慶太郎, 尾縣貢, & 木越清信. (2018). ジャンプ運動における個人の反動動作特性を評価する方法の開発. 体育学研究, 16106.
 - 9) Križaj, D., Šimunič, B., Žagar, T. (2008). Short-term repeatability of parameters extracted from radial displacement of muscle belly. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 18 (4), 645-651.
 - 10) Latella, C., Ruas, C. V., Mesquita, R. N., Nosaka, K., & Taylor, J. L. (2019). Test-retest reliability of elbow flexor contraction characteristics with tensiomyography for different elbow joint angles. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 45, 26-32.
 - 11) Rey, E., Lago-Peñas, C., Lago-Ballesteros, J. (2012). Tensiomyography of selected lower-limb muscles in professional soccer players. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 22 (6), 866-872.
 - 12) Rouis, M., Coudrat, L., Jaafar, H., Filliard, J. R., Vandewalle, H., Barthelemy, Y., & Driss, T. (2015). Assessment of isokinetic knee strength in elite young female basketball players: correlation with vertical jump. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 55 (12), 1502-1508.
 - 13) Šimunič, B. (2012). Between-day reliability of a method for non-invasive estimation of muscle composition. *Journal of electromyography and kinesiology*, 22 (4), 527-530.
 - 14) Šimunič B., Degens H., Rittweger J., Narici M., Mekjavić IB., Pišot R. (2011). Noninvasive estimation of myosin heavy chain composition in human skeletal muscle. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 43 (9), 1619-25.
 - 15) Šimunič, B., Koren, K., Rittweger, J., Lazzar, S., Reggiani, C., Rejc, E., Degens, H. (2019). Tensiomyography detects early hallmarks of bed-rest-induced atrophy before changes in muscle architecture. *Journal of applied physiology*, 126 (4), 815-822.
 - 16) Tous-Fajardo, J., Moras, G., Rodríguez-Jiménez, S., Usach, R., Doutres, D. M., & Maffiuletti, N. A. (2010). Inter-rater reliability of muscle contractile property measurements using non-invasive tensiomyography. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 20 (4), 761-766.
 - 17) Tsiokanos, A., Kellis, E., Jamurtas, A., & Kellis, S. (2002). The relationship between jumping performance and isokinetic strength of hip and knee extensors and ankle plantar flexors. *Isokinetics and exercise science*, 10 (2), 107-115.
 - 18) Valenčič, V., & Knez, N. (1997). Measuring of skeletal muscles' dynamic properties. *Artificial organs*, 21 (3), 240-242.
 - 19) Yamauchi, J., & Ishii, N. (2007). Relations between force-velocity characteristics of the knee-hip extension movement and vertical jump performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 21 (3), 703-709.