１．実践研究

プライオメトリック運動による下肢筋群への至適トレーニング負荷の検討

横沢　翔平*
平塚　和也**　田中　重陽***

抄録

【背景】プライオメトリックトレーニング（PT）は反動動作における骨格筋の伸張性収縮によって筋や腱に力学的ストレスを生じさせるトレーニング方式であるが、PT の負荷設定については知見が散見されており、明確にされていない。【目的】PT を連続的に実施し、どの程度の回数から骨格筋の収縮特性に影響を及ぼすのか検証することを目的した。【方法】競技スポーツ経験を有した健康な成人男性 17 名（年齢：22.5±1.2）がデプスジャンプを連続 10 回×5 セット行う PT プログラムに参加した。そのセット間にカウンタームーブメントジャンプ（CMJ）および Tensiomyogrphy（TMG）法による筋収縮特性の測定を行った。また、TMG 法を施す被験筋は大腿直筋とし、最大変位量（Maximal displacement：Dm）および収縮時間（Contraction time：Tc）を測定した。さらに Dm と Tc の値から筋の変位速度（Velocity of deformation：Vd、Vd＝（90% Dm-10%Dm）/Tc）を算出した。【結果】跳躍高はセット間に有意な差は認められなかった（$p>0.05$）。TMG の測定値に関して、Dm では 2 セットと比較して 3 セット、4 セット、5 セットにおいて有意に低い値を示した（$p<0.05$）。Tc ではセット間に有意な差は認められなかった（$p>0.05$）。Vd では Pre および 2 セットと比較して、5 セットは有意に低い値を示した（$p<0.05$）。また、2 セットと比較して、4 セットは有意に低い値を示した（$p<0.05$）。【結論】PT の実施により Dm は 3 セット（30 回）で変化し、5 セット（50 回）では Dm や Vd も統計的に有意に低下した。

キーワード：跳躍運動，デプスジャンプ，大腿筋，Tensiomyogrphy（TMG）法，筋収縮特性

*　平成国際大学スポーツ健康学部
**　立命館大学共通教育推進機構
***　国士舘大学体育学部

１．はじめに

跳躍運動はヒトの基本動作の一つであり、反動動作を用いたダイナミックな運動である。反動動作とは、主運動とはいったん逆方向の運動を行い、切り返し（反転し）主運動に至る運動形態を有する(図子, 2012)。反動動作による骨格筋の伸張性の収縮では筋や腱に過剰な力学的ストレスが生じ、組織損傷が生じやすいことが指摘されている(小田, 2012) 。このような反動動作を利用したエクササイズはプライオメトリックトレーニング（以下「PT」と略す）と呼ばれ、スポーツ現場においても多用される。小林ほか(2018) は陸上競技選手を対象に通常のトレーニングに加えて、デプスジャンプを用いた 8 週間のPT を追加し、外側広筋の筋厚を評価したところ、介入群はトレーニング期間を通して、外側広筋の筋厚が増加したことを報告している。また、Fatouros et al. (2000)はスクワットジャンプやデプスジャンプといった PT を組み合わせたトレーニングプログラムを 12 週間実施したところ、垂直跳び能力およびレッグプレス、スクワットの最大挙上重量が有意に向上したことを報告している。PT を行う際の負荷には基本的に自体重が用いられることから、特別なトレーニング機材を必要としないため、設備環境の制約が少なく、上述のような運動活動に必要な筋力や筋量の向上効果が期待できる。しかしながら、トレーニング強度や回数、頻度の設定に関しては知見が散見されていることから、骨格筋へ与える影響に関してもさらなる調査が必要である。

骨格筋損傷や筋疲労を評価する方法の一つとして、Tensiomyogrphy（以下「TMG」と略す）法が用いられる。TMG 法の利便性としては、自発的な努力を要せず、非侵襲性に加え（Rey et al., 2012）、再現性（Šimunič, 2012）に優れているため、トレーニング後の骨格筋の状態を客観的に評価することが可能である。また、Hunter et al.（2012）は TMG 法で得られる測定値が伸張性収縮による運動誘発性の筋損傷によって変化することを報告している。したがって、伸張性収縮を利用する PT においても TMG 法における筋収縮特性が変化することが想定でき、これにより最適な PT の負荷設定に有益な情報取得が期待できる。

そこで本研究は連続 10 回の PT を 5 セット実施することにより、TMG 法による筋収縮特性が変化する、という仮説を検証した。

この課題解決に取り組むことは、運動処方を行う上で、健康運動指導者におけるトレーニング内容の見識の展開に寄与できるものと考える。加えて、近年では COVID-19 の大流行により、トレーニング器具を使ったウェイトトレーニングは感染リスクを高める可能性があるため、比較的機材の接触が少ないプライオメトリックトレーニングを正しく代替できれば、習慣的な運動者にも十分なトレーニング刺激を与えることができるトレーニングプログラムの作成補助に貢献できると考える。

２．方法

2-1．被験者

被験者は、競技スポーツ経験を有した

健康な成人男性 17 名（年齢：22.5±1.2、身長：174.0±4.7 ㎝、体重：69.5±7.1kg、体脂肪率：16.2±4.5%、除脂肪量：58.0±4.1kg）を対象とした。身体組成は身体組成測定装置（Body Composition Analyzer MC-160、TANITA 社製）を用いて、インピーダンス法により測定した。被験者には、研究の目的および内容等について口頭による十分な説明を行い、本研究への任意による参加の同意を得た。また、本研究は、国士舘大学体育学部研究倫理委員会の承認を得て実施した。

2-2. 運動課題および測定手順

運動課題は 30 ㎝の台から踏み出し、両足で着地後、身体を沈み込ませてから、できるだけ素早く鉛直方向にジャンプするデプスジャンプ（以下「DJ」と略す）とした（図 1）。台の高さは Chu and Myer(2016)を参考にした。実験では跳躍の回数を 10 回×5 セットとし、跳躍するリズムを統制するために、検者が 10 秒間カウントとし、毎回検者の掛け声に合わせて跳躍するように指示した。また、DJ を行う際は台から落下して着地する時に膝関節を 90 度程度屈曲すること、そしてその後、鉛直方向に最大努力で早く高く跳ぶよう指示した。この際、被験者の安全を考慮して、上肢の動きに制限は加えなかった。また、実験中において、明らかに着地時の沈み込みが浅くなったり、動作が遅くなったことが目視により確認できた場合には、その都度、検者が口頭による指摘を行った。被験者には本実験の前に練習日を設けて、DJ の行い方を十分に説明し、事前練習を行った。測定手順は運動

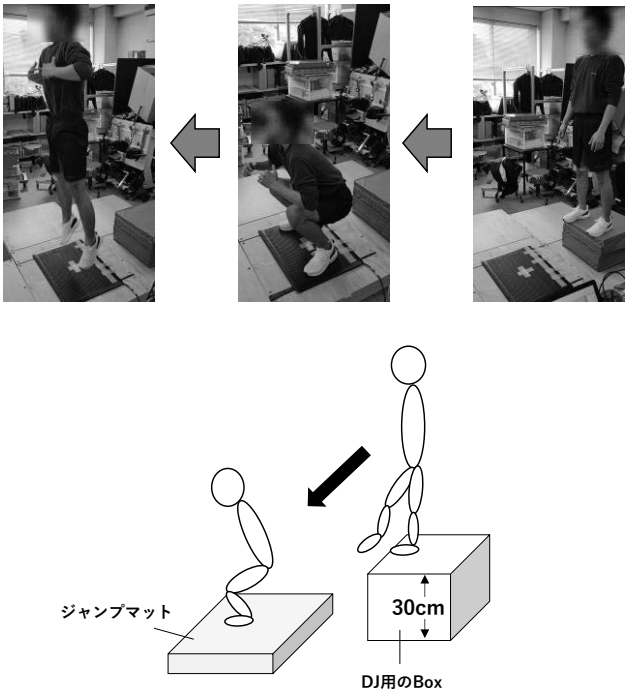


図1　デプスジャンプの方法および実験設定

課題前（Pre）に筋収縮特性の測定および 5 分間のウォーミングアップ、跳躍能力の測定を行い、運動課題開始後は毎セット後に跳躍能力および筋収縮特性の測定を行った（Post1-5）。実験中は室内の温度が 24℃になるように設定した。

2-3. 跳躍能力および筋収縮特性の測定

跳躍能力はジャンプマット測定装置（アプライドオーフィス社製）を用いて滞空時間（ta）を計測し、次の式を用いて跳躍高を算出した。

跳躍高（h）=1/8・9.81・ta^2、9.81 は重力加速度（m/s^2）

測定試技は上肢の動きを制限する垂直の反動ジャンプ（CMJ）とし、実験開始前においてウォーミングアップを十分行った後に Pre および 5 セット終了後では 2

回、その他のセット間では 1 回ずつ計測した。

2-4. 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に生じる変位を計測する（図 2a)。変位の測定には 0.17N/mm のバネが組み込まれた変位センサーを使用した。被験筋は大腿直筋（Rectus Femoris：RF）とした。測定姿位は、測定用のベッド上にて仰臥位とし、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。変位センサーの設置位置は、先行研究（Šimunič et al., 2019）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 5cm とした(Tous-Fajardo et al., 2010)。電気刺激における単一刺激のパルス幅は 1ms とした。刺激範囲は 40mA から 110 mA とし、最大変位が発現するまで 10mA ずつ増加させた。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。分析項目は、最大変位量（Maximal displacement：以下「Dm」と略す）及び収縮時間（Contraction time：以下「Tc」と略す）とした（図 2b)。Dm は，筋収縮時における変位量の最大値であり、筋硬度を示す指標として報告（Hunter et al.，2012）されている。Tc は Dm の 10%から 90%に至るまでの時間を示す値であり、筋線維組成に関連することが報告（Simunič et al.，2011）されている。また、de Paula Simolaet al.

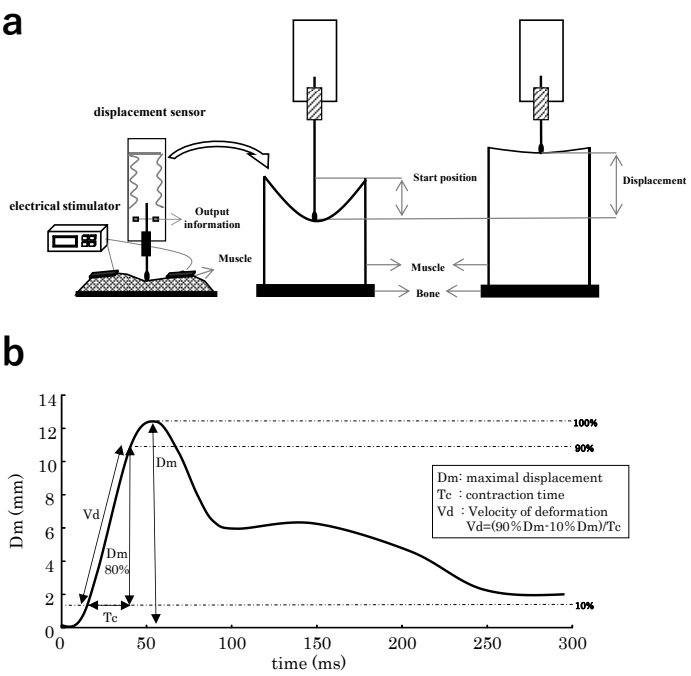


図２　TMG法の測定原理および測定値の定義

（2015）の算出方法を用いて変位速度（Velocity of deformation：以下「Vd」と略す、Vd＝（90% Dm-10%Dm）/Tc）を算出した。Vd はこれまで収縮速度（Velocity of contraction：Vc）と呼ばれていたが、近年では TMG の変位量および時間の分析項目から算出された値は主に筋硬度に依存した変位速度（Velocity of deformation）とすることが推奨されている（Piqueras-Sanchiz et al., 2022; Valenzuela et al., 2018)ことから、本研究においても先行研究と同様に定義した。なお、TMG 法の測定は、習熟した 1 名の測定者が実施した。

2-5. 統計処理

本研究におけるすべての測定値を平均値（M）±標準偏差（SD）で示した。取得データの正規性は Shapiro-Wilk の検定を用いて確認した。その結果、跳躍高お

よび TMG の各測定項目において、正規分布が確認されなかった。そこで、セット間の測定値を比較するために、Friedman 検定を用いて、セット間の差の有無を確認し、有意な差が認められた場合は Pre および各セットにおける多重比較検定を行った。いずれも有意水準は 5%とした。なお、本研究における統計処理は、SPSS Statistics Version 27.0（IBM 社製）を使用した。

３．結果

跳躍高ではセット間に有意な差は認められなかった（$p>0.05$）(表 1)。

TMG の測定値に関して、Dm ではセット間に有意な差が認められた（$p<0.05$）（表 2)。多重比較検定の結果、2 セットと比較して 3 セット、4 セット、5 セットは有意に低い値を示した ($p<0.05$)。Tc ではセット間に有意な差は認められなかった（$p>0.05$）(表 2)。Vd ではセット間に有意な差が認められた ($p<0.05$) (表 2)。多重比較検定の結果、Pre および 2 セットと比較して、5 セットは有意に低い値を示した。また、2 セットと比較して、4 セットは有意に低い値を示した。

４．考察

本研究はプライオメトリック運動が跳躍能力および下肢筋の筋収縮特性に及ぼす影響を検証するためにデプスジャンプを 10 回で 1 セットとし、それを 5 セット実施した。その結果、跳躍能力には有意な変化が認められなかった。一方で、筋収縮特性に関して、Dm は 3 セット以降から有意に低い値が認められ、Vd においては、4 セットおよび 5 セットで有意に低い値が認められた。これらのことから、プライオメトリック運動は 3 セット（30 回）から筋収縮特性を変化させ、5 セットで Dm

表１　跳躍高の変化
跳躍高はセット間において有意な変化を示さなかった（$p>0.05$）。

Pre	1 set	2 set	3 set	4 set	5 set	多重比較
42.8±7.6	42.0±7.5	41.7±7.6	41.8±7.6	41.2±7.3	41.8±7.6	-

平均値±標準偏差

表２　TMGにおける各測定値の変化
TMGの測定値は、DmおよびVdにおいてセット間に有意な変化が認められ（$p<0.05$）、Tcにおいては有意な変化が認められなかった（$p>0.05$）。

	Pre	1 set	2 set	3 set	4 set	5 set	多重比較
Dm（mm）	11.9±3.1	11.6±2.7	11.9±2.8	10.6±2.6	10.4±2.4	10.4±2.5	2set＞3set, 4set, 5set
Tc（ms）	27.9±3.6	28.0±4.0	28.5±4.1	28.4±5.1	28.2±3.1	29.5±5.0	-
Vd（mm/s）	386.8±124.5	372.1±98.9	377.8±101.1	338.2±95.4	330.1±80.1	320.1±89.7	Pre, 2set>5set 2set>4set

平均値±標準偏差

および Vd を有意に低下させることが明らかとなった。

本研究では伸張性収縮運動が TMG 法による筋収縮特性に及ぼす影響について検討した。Hunter et al.（2012）は上腕二頭筋を対象に遅発性筋痛が生じる程の伸張性収縮運動を実施したところ、運動の前後で Dm が有意に低下したことを報告している。本研究においても Dm や Vd が中盤以降のセットから低下することが確認でき、これらは先行研究を支持するものであった。また、別の先行研究（Kubo et al., 2017)では最大下運動中の筋および跳躍運動時における足関節の硬さ等を分析項目として、12 週間の PT および等尺性筋収縮トレーニング（Isometric training　: 以下「 ISOT」と略す）の効果を比較している。これによれば、PT によって、筋および足関節の硬さ、3 種類の跳躍高（CMJ、スクワットジャンプ、ドロップジャンプ）が有意に増加したのに対して、ISOT ではスクワットジャンプを除いて、有意な変化は認められなかったことを報告している。つまり、PT は ISOT といった他の運動よりも、活動中の筋や関節の硬さに作用することを意味する。本研究においても即時的に上述の効果が発現したことが示唆され、TMG による不随意の筋収縮においても、PT は筋の硬さを増加させることが示された。

本研究において、CMJ には有意な変化が認められず、運動前（Pre）における一定度の値を維持し、Dm や Vd の変化とは異なるものであった。この要因の一つとして PT が及ぼす腱への影響が考えられる。Hirayama et al.（2012）によれば、反動を伴う跳躍運動は一度の練習（文献内では 3 回 6 セット実施）によって、跳躍中における腱の伸張の大きさを増加させ、筋腱複合体の神経制御を調節することによって、跳躍能力を向上させることができることを報告している。これは腱の伸張の大きさが反動動作を伴う跳躍運動を行うことによって、即時的に変化することを示している。このように、反動運動が及ぼす腱の伸張への影響は Kubo et al.（2017）が行った PT および ISOT を比較した研究においても観察されている。したがって、本研究においても PT を繰り返し実施したことにより、腱の伸張が変化し、跳躍高の維持に影響した可能性がある。それゆえ、PT を連続的に実施する際には筋のみならず腱への影響も考慮し、今後の検討をすべきである。

先行研究において、CMJ と TMG 法を用いて、トレーニングが骨格筋に及ぼす影響が検討されている。Wiewelhove et al.(2015)は高強度のインターバルトレーニングを用いた 6 日間のプログロムを実施し、CMJ および筋収縮特性を評価したところ、トレーニングプログラムの完遂翌日において有意な跳躍高の低下と併せて、Tc の遅延が発生したことを報告している。本研究では跳躍高に有意な変化は認められず、Tc も Pre の値を維持した。また、TMG を用いて大腿筋群の Tc を測定することは跳躍能力を評価する際の指標になることが示唆されている。（平塚・角田，2020）。したがって、本研究においては Tc が一定度の値を維持したことが跳躍能力の維持にも寄与した可能性がある。これらは PT を実施する際に、50 回程度

の負荷であれば、最大限の努力で運動を遂行することができたことを示唆するものである。PT においては、最大努力で速く、高く実施することの必要性が指摘されている(Andrade et al., 2020)ことから、運動プログラムを検討する際には、これらを考慮することが重要であると考えられる。しかしながら、本研究には競技スポーツ経験を有していた成人男性が参加しており、比較的運動に対する熟練度が高い対象者であった。すなわち、女性や子供、年配者などにおいては、さらに負荷を減らすなどの留意が必要であり、今後は被験者の特性を含めた検証が必要である。一方で、PT は簡単な跳躍運動からデプスジャンプなどの台高を用いたエクササイズがある。これらのほとんどは特殊な用具を必要としないため、環境の制約が少ない。加えて自体重を用いて実施するため、性別や様々な年齢に対しても活用しやすいと思われる。したがって、PT を取り入れた運動プログラムの利用が期待される。

５．結論

デプスジャンプを用いた、PT を 10 回 1 セットとし、5 セット実施した場合、3 セット以降から Dm や Vd の低下が観察され、下肢筋の硬さが増加することが示された。しかし、跳躍高には有意な変化は認められなかった。以上のことから、PT は 30 回－50 回程度の実施により、骨格筋の収縮特性を変化させることが示された。また、PT のトレーニング効果を測る際には、パフォーマンスと併せて、筋収縮特性などを評価することの必要性が示された。

引用文献

Andrade, D. C., Manzo, O., Beltrán, A. R., Álvarez, C., Del Rio, R., Toledo, C., Moran, J. and Ramirez-Campillo, R. (2020) Kinematic and Neuromuscular Measures of Intensity During Plyometric Jumps.Journal of strength and conditioning research, 34 (12): 3395-3402.

Chu, D. A., Myer, G. D.：日暮清・鈴木俊訳 (2016) プライオメトリック・トレーニング ：動的筋力と爆発的パワー. ナップ, p239.

de Paula Simola, R. Á., Harms, N., Raeder, C., Kellmann, M., Meyer, T., Pfeiffer, M. and Ferrauti, A. (2015) Assessment of neuromuscular function after different strength training protocols using tensiomyography.Journal of strength and conditioning research, 29 (5): 1339-1348.

Fatouros, I. G., Jamurtas, A. Z., Leontsini, D., Taxildaris, K., Aggelousis, N., Kostopoulos, N. and Buckenmeyer, P. (2000) Evaluation of plyometric exercise training, weight training, and their combination on vertical jumping performance and leg strength. / Evaluation d ' un entrainement pliometrique et de force et leur influence sur la performance en saut vertical et sur

la force de la jambe.Journal of Strength & Conditioning Research (Allen Press Publishing Services Inc.), 14 (4): 470-476.

Hirayama, K., Yanai, T., Kanehisa, H., Fukunaga, T. and Kawakami, Y. (2012) Neural Modulation of Muscle-Tendon Control Strategy after a Single Practice Session.Medicine & Science in Sports & Exercise, 44 (8): 1512-1518.

Hunter, A. M., Galloway, S. D. R., Smith, I. J., Tallent, J., Ditroilo, M., Fairweather, M. M. and Howatson, G. (2012) Assessment of eccentric exercise-induced muscle damage of the elbow flexors by tensiomyography.Journal of Electromyography & Kinesiology, 22 (3): 334-341.

平塚和也・角田直也 (2020) 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.国士館大学体育研究所報, 39: 45-51.

小林陽介・寺田和史・山本大輔(2018) 試合期における陸上競技選手に対するプライオメトリックトレーニング導入の効果:無作為化比較対照試験による検討.体育学研究, 63 (1): 327-340.

Kubo, K., Ishigaki, T. and Ikebukuro, T. (2017) Effects of plyometric and isometric training on muscle and tendon stiffness in vivo.Physiological reports, 5 (15).

小田俊明(2012) エキセントリック収縮による筋と腱の損傷.体育の科学, 62 (1): 38-43.

Piqueras-Sanchiz, F., Cornejo-Daza, P. J., Sánchez-Valdepeñas, J., Bachero-Mena, B., Sánchez-Moreno, M., Martín-Rodríguez, S., García-García, Ó. and Pareja-Blanco, F. (2022) Acute Mechanical, Neuromuscular, and Metabolic Responses to Different Set Configurations in Resistance Training.Journal of Strength & Conditioning Research: 2983-2991.

Rey, E., Lago-Peñas, C. and Lago-Ballesteros, J. (2012) Tensiomyography of selected lower-limb muscles in professional soccer players.Journal of Electromyography & Kinesiology, 22 (6): 866-872.

Šimunič, B. (2012) Between-day reliability of a method for non-invasive estimation of muscle composition.Journal of Electromyography & Kinesiology, 22 (4): 527-530.

Simunič, B., Degens, H., Rittweger, J., Narici, M., Mekjavić, I. B. and Pišot, R. (2011) Noninvasive estimation of myosin heavy chain composition in human skeletal muscle.Medicine and science in sports and exercise, 43 (9): 1619-1625.

Šimunič, B., Koren, K., Pišot, R., Reggiani, C., Narici, M., Rittweger, J., Lazzer, S., Rejc, E. and 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.

Tous-Fajardo, J., Moras, G., Rodríguez-Jiménez, S., Usach, R., Doutres, D. M. and Maffiuletti, N. A. (2010) Inter-rater reliability of muscle contractile property measurements using non-invasive tensiomyography.Journal of electromyography and kinesiology : official journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology, 20 (4): 761-766.

Valenzuela, P. L., Montalvo, Z., Sánchez-Martínez, G., Torrontegi, E., De La Calle-Herrero, J., Domínguez-castells, R., Maffiuletti, N. A. and De La Villa, P. (2018) Relationship between skeletal muscle contractile properties and power production capacity in female Olympic rugby players.European Journal of Sport Science, 18 (5): 677-684.

Wiewelhove, T., Raeder, C., Meyer, T., Kellmann, M., Pfeiffer, M. and Ferrauti, A. (2015) Markers for Routine Assessment of Fatigue and Recovery in Male and Female Team Sport Athletes during High-Intensity Interval Training.PLoS One, 10 (10): e0139801.

図子浩二(2012)プライオメトリクス.体育の科学, 62 巻: 44-50.

本研究は、令和 4 年度健康・体力づくり事業財団の助成金を受けて実施しています。