

足関節底屈筋群の瞬発的な筋力発揮能力向上を目的とした トレーニングが姿勢制御機構に及ぼす影響

熊本大学大学院 小林雄志

Effect of Explosive-type Strength Training of Planter Flexors on Postural Stability

by

Yuji Kobayashi

*Graduate School of Instructional Systems,
Kumamoto University*

ABSTRACT

This study aimed to investigate the effect of explosive-type strength training of plantar flexors on muscle strength and postural stability. Participants were 22 healthy older adults divided into two groups: the training group ($n = 12$) and the control group ($n = 10$). Participants in the training group underwent explosive-type strength training for 4 weeks (2 days per week). Training consisted of 3 sets of 10 repetitions of explosive plantar flexion lasting less than 1 s. In the pre- and post-training phases (PRE and POST, respectively), we measured plantar flexor muscle thickness using ultrasonography. We also measured the maximum voluntary torque (MVT) during maximum voluntary isometric plantar flexion and rate of torque development (RTD) during explosive isometric plantar flexion lasting less than 1 s; the duration of single-leg standing; and the Center of Pressure (CoP) sway during single-leg standing. In the training group, MVT and RTD in POST significantly increased compared with those in PRE ($p < 0.05$). However, plantar flexor muscle thickness did not change. The duration of single-leg standing in POST was significantly longer compared with that in PRE ($p < 0.05$). In addition, the area of CoP sway during single-leg standing was

significantly decreased in POST ($p < 0.05$). These findings suggest that explosive-type strength training increases MVT and RTD, which may contribute to improvement of postural stability.

要 旨

本研究では、足関節底屈筋群の瞬発的な筋力発揮能力向上を目的としたトレーニングが、筋力および姿勢制御機構に及ぼす影響について明らかにすること目的とした。健康な高齢者22名をトレーニング群12名、コントロール群10名へと群分けした後、トレーニング群に対して足関節底屈における瞬発的な筋力発揮能力の向上を目的としたトレーニングを4週間、週2回の頻度で実施した。また、トレーニング期間の前後において最大筋力測定、瞬発的筋力測定、姿勢制御能力測定および下腿後面における筋厚の測定を行った。その結果、トレーニング群ではトレーニング期間終了後、下腿後面における筋厚の変化は認められなかったものの最大筋力および瞬発的筋力の向上が認められた。姿勢制御能力については、開眼片脚立位における持続時間が増加するとともに、足圧中心動揺の外周面積および矩形面積が減少した。これらの結果より、同様のトレーニングは最大筋力および瞬発的筋力を向上させるとともに、姿勢制御能力の改善に寄与する可能性があることが示唆された。

緒 言

高齢者の転倒は骨折等の外傷を引き起こす可能性があり¹⁾、特に大腿骨頸部骨折のような重度の骨折となれば、その後寝たきりになる等のQuality of Life (QOL)の低下をもたらすことも考えられる。転倒に対する危険因子に関して、筋力の低下と転倒の関連性が高いことが示唆されているが¹⁾、筋力の中でも特に瞬発的な筋力発揮能

力は姿勢外乱に対するバランスの回復に必要であり²⁾、若年者に比べて高齢者の瞬発的な筋力発揮能力は低く²⁻⁴⁾、高齢者においては転倒経験者の瞬発的な筋力発揮能力は転倒未経験者に比べて低いとの報告もある⁵⁻⁷⁾。したがって、高齢者に対し筋力トレーニングを実施することにより瞬発的な筋力発揮能力を向上させれば、転倒のリスクを減少させられる可能性がある。また、そのようなトレーニングが転倒予防に効果があるとするれば、姿勢制御機構に何らかの影響を及ぼすものと考えられる。しかしながら、こうしたトレーニングが姿勢制御機構に及ぼす影響については不明である。

瞬発的な筋力発揮能力の向上を目的とした筋力トレーニングを実施した先行研究^{8,9)}では、比較的短期間(4週間~6週間)で最大筋力や瞬発的な筋力発揮能力の向上が認められている。しかしながら、これらの結果は膝関節伸展筋力に関するものであり、姿勢の動揺を修正する際に重要とされる足関節底屈筋力^{10,11)}に関するトレーニングについても同様の効果が認められるかについては明らかでない。

そこで本研究では、足関節底屈における瞬発的な筋力発揮能力の向上を目的とした短期トレーニングが、筋力および姿勢制御機構に及ぼす影響について明らかにすること目的とした。

1. 方 法

1. 1 対 象

健康な高齢者22名(年齢 74.1 ± 6.8 歳、身長 156.9 ± 8.2 cm、体重 55.2 ± 9.2 kg)を対象とし、トレーニング群12名(年齢 75.3 ± 8.0 歳、身長

155.4±8.2cm, 体重 52.0±8.2kg), コントロール群 10 名 (年齢 72.7±4.9 歳, 身長 158.7±8.1cm, 体重 59.1±9.3kg) へと群分けを行った. 研究の実施に際して, 対象者に対して口頭と文書により十分な説明を行い, 実験開始までに“研究参加への同意書”への署名により参加の同意を得られた個人のみを対象とした. 本研究は芝浦工業大学生命工学研究倫理審査委員会の承認を受けて実施された.

1. 2 実験の手順

トレーニング群の被検者に対して, 週 2 回の頻度で 4 週間の筋力トレーニングを実施し, トレーニング期間の前後において最大筋力測定, 瞬発的筋力測定, 姿勢制御能力測定および下腿後面における筋厚の測定を行った (Pre および Post 測定). また, コントロール群の被検者に対しても, 同様の測定を実施した後, その後の日常生活について運動習慣や生活習慣を変えないで過ごすように指示し, 4 週間後に再度同様の測定を行った.

1. 3 トレーニング内容

トレーニングはトルクメータ (TD200, Kubota) を設置した特注の等尺性筋力測定機器を用いて実施した (図 1). 姿勢については足関節角度を 0 度 (解剖学的正位), 膝関節角度を 0 度 (完全伸

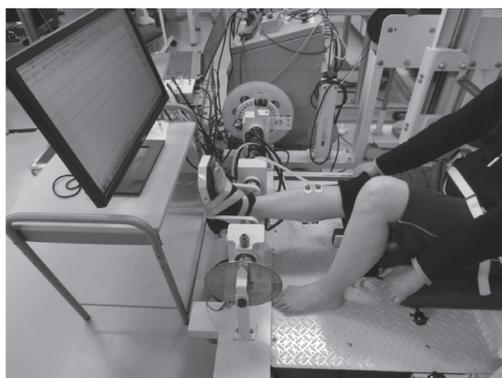


図 1 Custom-made dynamometer for the measurement of isometric plantar flexion torque

展位), 股関節角度を 90 度とした. 1 回のトレーニングについては, 1 秒以内の足関節底屈を 5 秒ごと 10 回行う運動を 1 セットとし, これを 1 分間の休息を挟んで 3 セット実施するものとした. 各試技において計測されたトルクは A/D 変換器 (PL3516, ADInstruments) を介して, サンプリング周波数 1000Hz にてパーソナルコンピュータ (PC) に取り込んだ. また, 発揮されるトルク-時間曲線を PC の画面上にリアルタイムに表示することによって視覚的にフィードバックし, 単位時間あたりの発揮トルクの立ち上がり (Rate of Torque Development: RTD) が最大になるように毎回努力させた.

1. 4 Pre および Post 測定の内容

1. 4. 1 最大筋力測定

被検者に十分なウォーミングアップを行わせたのちに, トレーニングと同様の筋力測定機器を用いて等尺性足関節底屈運動を全力で 3 秒間行わせた. 試技は 3 回実施し, その中で計測されたピーク値で最大のものを最大随意トルク (Maximal Voluntary Torque: MVT) として分析に用いた. また, 表面筋電図の測定における測定値の標準化のために, 3 秒間の全力での等尺性足関節背屈運動についても実施した.

1. 4. 2 瞬発的筋力測定

トレーニングと同様に, 1 秒以内の等尺性足関節底屈運動を RTD が最大になるように指示して 3 回行わせ, そのときに発揮されるトルクを計測した. 算出項目はトルク発揮開始から 50 ミリ秒, 100 ミリ秒, 150 ミリ秒, 200 ミリ秒経過時点での発揮トルクおよび最大 RTD (MRTD) とした. 3 回の試技のうち, MRTD が最も高い値の試技を分析に用いた.

1. 4. 3 筋活動の計測

最大筋力測定および瞬発的筋力測定の際に, 多チャンネル増幅器 (MEG-6108M, 日本光電) を

用いて下腿の各筋（腓腹筋内側頭，腓腹筋外側頭，ヒラメ筋，前脛骨筋）における表面筋電図（surface electromyography: sEMG）を計測した。計測された信号は発揮トルクと同様に A/D 変換器を介して，サンプリング周波数 1000Hz にて PC に取り込んだ。瞬発的筋力測定における腓腹筋内側頭，腓腹筋外側頭，ヒラメ筋の sEMG について，筋活動の開始を 0 秒として 0 秒から 50 ミリ秒，50 ミリ秒から 100 ミリ秒，100 ミリ秒から 150 ミリ秒，150 ミリ秒から 200 ミリ秒における実効値（Root Mean Square: RMS）を算出して等尺性足関節底屈運動における最大筋力測定時の RMS で標準化した後，3 つの筋の平均値を算出し，これらを足関節底屈運動における主働筋群の筋活動量の指標とした（EMG₀₋₅₀，EMG₅₀₋₁₀₀，EMG₁₀₀₋₁₅₀，EMG₁₅₀₋₂₀₀）。また，前脛骨筋の EMG 波形についても同様の処理にて，等尺性足関節背屈運動における最大筋力測定時の RMS で標準化した RMS を算出した。更に，主働筋群の筋活動の開始からトルク発揮の開始までの時間差（Electromechanical delay: EMD）についても算出を行った。

1. 4. 4 姿勢制御能力測定

被検者に開眼片脚での静止立位を足圧中心軌跡測定器（T.K.K.5810，竹井機器）上で行わせ，持続時間および足圧中心の軌跡（足圧中心動揺）を計測した。試技は 120 秒を上限とし，上限を超えなかった場合のみ 2 セット目を実施した。試技中の足圧中心動揺について，開始 5 秒後から 25 秒

後までの 20 秒間を分析対象とし，足圧中心動揺に関する各種パラメータ（総軌跡長，単位軌跡長，外周面積，矩形面積）を算出した。2 セット実施した場合は持続時間の長い試技における測定値を分析に用いた。なお，持続時間が 30 秒以下の被検者に関しては分析の対象外とした。

1. 4. 5 筋厚の計測

超音波画像診断装置（ACUSON S2000，SIEMENS）を用いて，下腿後面の近位 30% 位置における筋厚を計測した。計測は 2 回実施し，2 回の平均値を分析に用いた。

1. 5 統計

各測定項目について二元配置の分散分析（群 × 時間）を行い，交互作用が確認された項目については事後検定を行った。すべての検定において P<0.05 を有意水準とした。

2. 結果

2. 1 最大筋力および瞬発的筋力

最大筋力測定および瞬発的筋力測定における発揮トルクの計測結果を表 1 に示す。MVT に関して，コントロール群では Pre と Post の間に有意な差は認められなかったが，トレーニング群では Pre と比較して Post で有意に高い値を示した（P<0.05）。また，瞬発的筋力測定において，トルク発揮開始から 50 ミリ秒，100 ミリ秒経過時点での発揮トルクはトレーニング群とコントロール群ともに Pre と Post の間に有意な差は認められ

表 1 Absolute torque during explosive or maximal voluntary contraction

	Training group				Control group			
	Pre		Post		Pre		Post	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
MVT (Nm)	49.5	23.3	66.0 *	27.9	62.5	22.4	69.2	26.6
Torque at 50 ms (Nm)	5.0	2.3	5.0	2.1	4.3	2.4	3.8	1.6
Torque at 100 ms (Nm)	11.4	5.5	15.9	7.6	14.0	10.9	12.3	5.4
Torque at 150 ms (Nm)	19.2	8.8	29.3 *	13.5	25.2	18.3	24.9	12.6
Torque at 200 ms (Nm)	26.6	12.3	39.9 *	16.6	33.0	19.2	33.8	15.2
MRTD (Nm/s)	203.8	109.1	303.5 *	133.0	287.4	180.8	293.5	186.3

Pre- to posttraining differences: *P<0.05

表2 Root mean square of agonist sEMG signal and electromechanical delay during explosive isometric contraction

	Training group				Control group			
	Pre		Post		Pre		Post	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
EMG ₀₋₅₀ (%)	58.2	22.8	58.6	27.3	56.3	21.9	53.0	24.4
EMG ₅₀₋₁₀₀ (%)	92.2	34.8	103.5	27.3	97.2	38.1	93.4	51.6
EMG ₁₀₀₋₁₅₀ (%)	97.8	38.2	107.1	29.8	106.2	50.3	109.1	45.0
EMG ₁₅₀₋₂₀₀ (%)	103.6	35.7	110.7	16.2	109.0	37.6	107.0	52.6
EMD (ms)	62	26	49	22	57	19	66	21

表3 Duration and CoP sway characteristics of single-leg standing

	Training group				Control group			
	Pre		Post		Pre		Post	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Duration of single-leg standing (s)	64	47	80 *	45	58	45	64	52
Total locus length of CoP sway (mm)	432	199	412	125	361	139	374	91
Mean velocity of CoP sway (mm/s)	22	10	21	6	18	7	19	5
Total area of CoP sway (mm ²)	454	138	392 *	117	354	147	394	107
Rectangular area of CoP sway (mm ²)	822	236	641 *	196	588	227	608	140

Pre- to posttraining differences: *P<0.05

なかったが、150ミリ秒、200ミリ秒経過時点での発揮トルクおよびMRTDについてはトレーニング群において、Preと比較してPostで有意に高い値を示した (P<0.05)。

2.2 瞬発的筋力測定時の筋活動

瞬発的筋力測定における主動筋群の筋活動に関する結果を表2に示す。すべての測定項目に関して、トレーニング群とコントロール群ともにPreとPostの間に有意な差は認められなかった。また前脛骨筋の筋活動についても、トレーニング群とコントロール群ともにPreとPostの間に有意な差は認められなかった。

2.3 姿勢制御能力

姿勢制御能力測定の結果を表3に示す。片脚開眼立位の持続時間に関して、トレーニング群においてはPreと比較してPostで有意に増加したが (P<0.05)、コントロール群においてはPreとPostの間に有意な差は認められなかった。

足圧中心動揺における総軌跡長および単位軌跡長については、トレーニング群とコントロール群ともにPreとPostの間に有意な差は認められな

かった。しかしながら、外周面積および矩形面積についてはトレーニング群において、Preと比較してPostで有意に減少した (P<0.05)。

2.4 筋厚

下腿後面における筋厚について、トレーニング群 (Pre: 56.6±7.9mm, Post: 58.9±4.1mm) およびコントロール群 (Pre: 63.2±5.1mm, Post: 63.7±4.3mm) とともにPreとPostの間で有意な差は認められなかった。

3. 考察

3.1 最大筋力および瞬発的筋力の変化

本研究では足関節底屈運動における瞬発的な筋力発揮能力の向上を目的としたトレーニングを4週間、週2回実施した結果、最大筋力測定においてMVTの向上が認められた。また、瞬発的筋力測定において、トルク発揮開始から150ミリ秒、200ミリ秒経過時点での発揮トルクおよびMRTDの向上も認められた。同様のトレーニングを膝関節伸展運動にて実施した先行研究^{8,9)}でも、最大筋力や瞬発的筋力の向上が認められているが、こうしたトレーニングは足関節底屈運動に関して

も有効であることが明らかとなった。また、本研究におけるトレーニング量やトレーニング頻度は、Tillinら⁸⁾の先行研究よりも少なかったにも関わらずMVTやMRTDの向上が認められたが、本研究に用いた被検者や対象とした筋群にとっては、これらのトレーニング効果をもたらすのに十分なトレーニング量やトレーニング頻度であったものと考えられる。一方でTillinら⁸⁾の先行研究と異なり、瞬発的筋力測定において、トルク発揮開始から50ミリ秒や100ミリ秒時点における発揮トルクの向上は認められなかった。発揮トルクにおける初期と後期のRTDの適応は異なるとの報告^{12,13)}もあることから、本研究で用いたトレーニング内容は、特に発揮トルクにおける後期に効果をもたらすものであったと考えられる。

3. 2 主働筋群の筋活動への影響

瞬発的筋力の測定において、トレーニング群ではMVTやMRTDが増加したにも関わらずsEMGの各算出項目についてはトレーニング前後で変化が認められなかった。一方でトレーニング後において筋厚が増加してないことから、このMVTの増加は、筋力発揮時に動員される運動単位の増加や発火頻度の増加といったいわゆる「神経系の適応」^{14,15)}によって生じたものと推察される。すなわち、最大筋力測定時の主働筋における筋活動量はトレーニング前に比べトレーニング後で増加していた可能性が考えられるが、本研究ではこの最大筋力測定時のsEMGによって瞬発的筋力測定時のsEMGを標準化しているため、実際には瞬発的筋力測定における筋活動量もトレーニング前に比べ増加していた可能性がある。しかしながら、これらを検証するためには電気刺激時の最大M波による標準化^{8,16,17)}の実施等が必要となる。

3. 3 姿勢制御能力の変化について

トレーニング群においてはトレーニング実施後に開眼片脚立位の持続時間が増加し、足圧中心動揺に関しては総軌跡長や単位軌跡長に変化はみられなかったものの、外周面積と矩形面積の減少が認められた。これらの結果は、開眼片脚立位における足圧中心の移動の「長さ」については変化が認められないものの、その移動する「面積（範囲）」を小さくすることが可能になったものと解釈できる。また、これらの変化とともに最大筋力や瞬発的筋力も向上していることから、こうした筋力の向上が動揺を安定させるのに寄与した結果、持続時間が向上したものと推察される。

3. 4 今後の課題

本研究では筋力トレーニングのみを実施したが、転倒予防のための運動プログラムを考えた場合、バランストレーニングを組み合わせる¹⁸⁾ことが想定されるため、そうした場合の効果についても明らかにしていく必要がある。また、本研究で用いたトレーニングは短期間でその効果が期待できるものの、同様のトレーニングを6週間、週3回の頻度で実施した研究⁹⁾では、トレーニングによって向上した瞬発的筋力がその後の3週間のデイトレーニングによって減少し、トレーニング前の状態との差が認められなくなるとの報告がされていることから、筋力や姿勢制御能力に対するトレーニングの残存効果や、トレーニング効果の維持に必要なトレーニングの頻度などに関する検討も今後必要となってくるであろう。

結 論

健常な高齢者を対象に、足関節底屈における瞬発的な筋力発揮能力の向上を目的としたトレーニングを4週間、週2回の頻度で実施した。その結果、トレーニング期間終了後において最大筋力および瞬発的筋力の向上が認められた。さらに、開眼片

脚立位における持続時間が増加するとともに、足圧中心動揺の外周面積および矩形面積が減少した。これらの結果より、同様のトレーニングは最大筋力および瞬発的筋力を向上させるとともに、姿勢制御能力の改善に寄与する可能性があることが示唆された。

謝 辞

本研究に対し、助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。さらに、研究の遂行にあたり多大なご助力を頂いた芝浦工業大学の赤木亮太先生、上安悠太氏ならびに赤木研究室の方々に深く感謝いたします。

文 献

- 1) American Geriatrics Society, British Geriatrics Society, and American Academy of Orthopaedic Surgeons Panel on Falls Prevention, Guideline for the prevention of falls in older persons., *J. Am. Geriatr. Soc.*, **49**(5) : 664-72(2001)
- 2) Thelen D.G., Schultz A.B., Alexander N.B., Ashton-Miller J.A., Effects of age on rapid ankle torque development., *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.*, **51**(5) : M226-232(1996)
- 3) Lanza I.R., Towse T.F., Caldwell G.E., Wigmore D.M., Kent-Braun J.A., Effects of age on human muscle torque, velocity, and power in two muscle groups., *J. Appl. Physiol.*, **95**(6) : 2361-2369(2003)
- 4) Thompson B.J., Ryan E.D., Herda T.J., Costa P.B., Herda A.A., Cramer J.T., Age-related changes in the rate of muscle activation and rapid force characteristics., *AGE*, **36**(2) : 839-849(2014)
- 5) Skelton, D.A., Kennedy, J., Rutherford, O.M., Explosive power and asymmetry in leg muscle function in frequent fallers and non-fallers aged over 65., *Age Ageing*, **31**(2) : 119-125(2002)
- 6) Perry M.C., Carville S.F., Smith I.C., Rutherford O.M., Newham D.J., Strength, power output and symmetry of leg muscles: effect of age and history of falling. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **100**(5) : 553-561(2007)
- 7) Bento P.C., Pereira G., Ugrinowitsch C., Rodacki A.L., Peak torque and rate of torque development in elderly with and without fall history., *Clin. Biomech.*, **25**(5) : 450-454(2010)
- 8) Tillin N.A., Pain M.T., Folland J.P., Short-term training for explosive strength causes neural and mechanical adaptations., *Exp. Physiol.*, **97**(5) : 630-641(2012)
- 9) Kobayashi Y., Hirayama K., Matsubayashi T., Akagi R., Effect of explosive-type strength training and short-term detraining on rate of torque development during isometric knee extension., *Br. J. Sports. Med.*, **47**(17) : e4(2013)
- 10) Horak F.B., Nashner L.M., Central programming of postural movements: adaptation to altered support-surface configurations., *J. Neurophysiol.*, **55**(6) : 1369-1381(1986)
- 11) Gu M.J., Schultz A.B., Shepard N.T., Alexander N.B., Postural control in young and elderly adults when stance is perturbed: dynamics., *J. Biomech.*, **29**(3) : 319-329(1996)
- 12) Andersen L.L., Andersen J.L., Zebis M.K., Aagaard P., Early and late rate of force development: differential adaptive responses to resistance training? *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, **20**(1) : e162-169(2010)
- 13) de Oliveira F.B., Rizzato G.F., Denadai B.S., Are early and late rate of force development differently influenced by fast-velocity resistance training? *Clin. Physiol. Funct. Imaging*, **33**(4) : 282-287(2013)
- 14) Folland J.P., Williams A.G., The adaptations to strength training: morphological and neurological contributions to increased strength., *Sports Med.*, **37**(2) : 145-68(2007)
- 15) Gabriel D.A., Kamen G, Frost G., Neural adaptations to resistive exercise: mechanisms and recommendations for training practices., *Sports Med.*, **36**(2) : 133-49(2006)
- 16) Geertsens S.S., Lundbye-Jensen J., Nielsen J.B.. Increased central facilitation of antagonist reciprocal inhibition at the onset of dorsiflexion following explosive strength training., *J. Appl. Physiol.*, **105**(3) : 915-922(2008)
- 17) Jenkins N.D., Buckner S.L., Cochrane K.C., Bergstrom H.C., Palmer T.B., Johnson G.O., Schmidt R.J., Housh T.J., Cramer J.T., Age-related differences in rates of torque development and rise in EMG are eliminated by normalization., *Exp.*

Gerontol., 57:18-28.

- 18) Clemson L., Fiatarone Singh M.A., Bundy A.,
Cumming R.G., Manollaras K., O'Loughlin P.,
Black D., Integration of balance and strength

training into daily life activity to reduce rate of
falls in older people (the LiFE study) : randomised
parallel trial., *BMJ.*, 345:e4547 (2012)