

高齢者の筋機能および姿勢制御能力に対する低強度爆発的筋力発揮トレーニング効果検証

加藤丈博 (PT)¹⁾, 池添冬芽 (PT)²⁾, 市橋則明 (PT)¹⁾

¹⁾ 京都大学大学院医学研究科人間健康科学系専攻

²⁾ 関西医科大学リハビリテーション学科

キーワード：爆発的筋力，足関節底屈筋，姿勢制御能力

はじめに

Rate of Force Development (以下, RFD) は爆発的筋力発揮能力の指標¹⁾であり, なかでも力発揮開始からおよそ 100 ms までのより早期の時点での RFD (以下, early-RFD) は力発揮における神経的要因をより反映する筋機能指標である²⁾。若年者におけるスプリントやジャンプ能力には脚伸展や膝関節伸展の early-RFD が関連するという報告があり, 競技パフォーマンスの向上に寄与することが示唆されている³⁾。また, 股関節外転や足関節底屈の early-RFD は姿勢制御能力や高齢者の転倒リスクとの関連が報告されており⁴⁻⁷⁾, 爆発的筋力発揮は高齢者の転倒予防においても重要な筋機能であることが示唆されている。特に矢状面での姿勢制御には足関節周囲筋が重要な役割を果たすとされている⁸⁻¹⁰⁾。Behan ら⁷⁾は, 立位保持中の急速動揺後のバランス応答には足関節底屈の最大筋力ではなく足底屈 early-RFD が関連することを報告しており, 矢状面における動的な立位姿勢制御においては足関節底屈 early-RFD が重要であることが示唆されている。

RFD を効率よく増大させる方法として, できるだけ素早く筋収縮させる高速度レジスタンストレーニングが推奨されている¹¹⁾。実際に, 高速度トレーニングの即時効果について, 低強度・高速度レジスタンストレーニングが脚伸展や股関節外転の RFD やパフォーマンスを即時的に増大させることが報告されている¹²⁾¹³⁾。しかしながら, 足関節底屈 early-RFD の加齢変化や, 低強度高速度トレーニングが足関節底屈 early-RFD や姿勢制御能力に与える影響については明らかにされていない。

本研究の目的は, 1) 加齢に伴う最大筋力および爆発的筋力の変化を明らかにすること, 2) 筋機能および姿勢制御能力に対する低強度高速度トレーニングの即時効果を検証することである。

研究 1) 加齢に伴う最大筋力および爆発的筋力の変化方法

1. 対象

健常女性 85 名 (年齢: 21-69 歳) を対象とし, 20-30 歳台 (20-30s: 25 名, 29.3 ± 6.4 歳), 40 歳台 (40s: 22 名, 45.4 ± 2.6 歳), 50 歳台 (50s: 17 名, 54.0 ± 2.8 歳), 60 歳以上 (over 60s: 21 名, 64.9 ± 5.7 歳) の 4 群に分類した。なお, 本研究は本大学の倫理委員会の承認を得て実施した。

2. 筋力測定

測定は利き足で行った。股関節屈曲 95 度位, 膝関節伸展 0 度位, 足関節底背屈 0 度位の長座位で足関節底屈の最大等尺性筋力 (MVIC) および RFD 測定を行った (サンプリング周波数 1,500 Hz)。

MVIC 測定では合図開始から 3 秒間, 足関節底屈方向に最大筋力を発揮させたときの最大値を求めた。

RFD の測定時には「合図の後にできるだけ早く, 強く力を発揮するように」と指示し, 測定者の合図開始直後から足関節底屈方向へ瞬間的に最大限の筋力発揮をさせた。RFD は力発揮開始時点 (onset) からある時点におけるトルク値までの力-時間曲線の傾きを算出したものである。本研究では, RFD 測定時の最大値の 2.5% となる時点を力発揮開始時点 (onset) とし, 50 ms 時点のトルク値から onset 時点のトルク値を引いた値を時間で除したものを early-RFD として算出した。

MVIC, early-RFD とともに 2 回ずつ測定を行い, 2 回測定の最大値を統計解析に用いた。

3. 統計解析

統計解析には SPSS ver.22 (IBM 社製) を使用した。反復測定分散分析および Tukey の多重比較法を用いて MVIC および early-RFD を 4 群間で比較した。有意水準は 5% とした。

結果

反復測定分散分析の結果, MVIC に群間の有意差はみられなかった。一方, early-RFD では 20-30s に対して, 50s, over 60s で有意に低下していた (表 1, 図 1)。

考察

20 ~ 60 歳台以上までの健常女性を対象として, 足関節底屈筋の最大筋力および爆発的筋力 (RFD) の加齢変化について検討した。男性を対象とした先行研究において, 足関節底屈 early-RFD は中年期と若年期で差が

表 1 年代別の MVIC および early-RFD

	20-30s n=25	40s n=22	50s n=17	over 60s n=21
MVIC (Nm)	101.1 ± 37.5	91.9 ± 32.3	77.7 ± 21.7	93.5 ± 29.1
early-RFD (Nm/s)	242.9 ± 132.0	209.7 ± 107.2	143.0 ± 71.4	146.2 ± 89.0

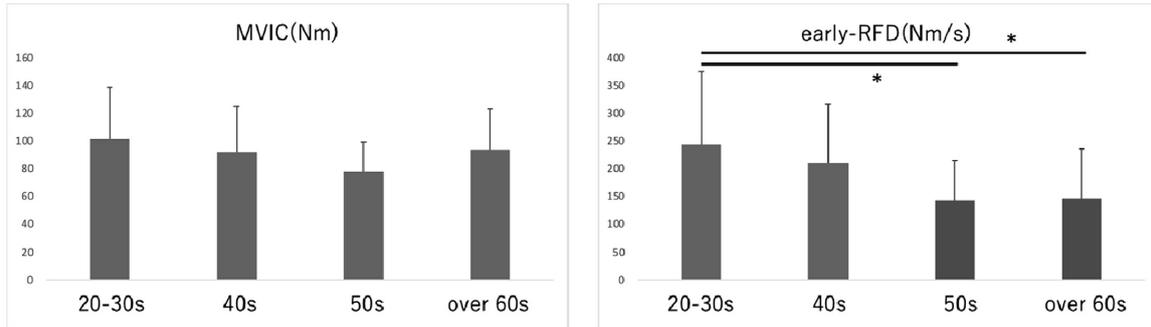


図1 MVICおよびearly-RFDの加齢変化

ないことを報告している¹⁴⁾。一方、女性の膝伸展筋力を対象とした先行研究においては、最大RFDが55歳を境に低下すると報告されている¹⁵⁾。健常女性の足関節底屈筋を対象とした本研究の結果、最大筋力には加齢変化を認めなかったのに対して、early-RFDは50歳台から有意に低下していた。本研究の結果、健常女性における足関節底屈筋の筋機能の加齢変化について、最大筋力の低下よりも、爆発的筋力の低下の方が加齢早期の段階から生じることが明らかになった。

研究2) 筋機能および姿勢制御能力に対する低強度高速度トレーニングの即時効果

方法

1. 対象

対象は健常成人24名（男性12名； 24.4 ± 3.2 歳，女性12名； 24.4 ± 3.5 歳）とし、利き足を対象とした。週2回以上日常的に下肢のレジスタンストレーニングを行っている者は対象から除外した。

2. 実験プロトコル

対象者を運動介入群と対照群に分類し、運動介入群にはエアロバイクを用いて5分間のウォームアップをした後、足関節底屈の等速性収縮運動を実施した。対照群は5分間のウォームアップのみを実施した。介入前後で筋力および立位姿勢制御能力を測定した。

3. 筋力測定

研究1)と同様の方法で足関節底屈のMVICおよびRFD測定を行った。MVIC、early-RFDとも2回の測定の実験値を統計解析に用いた。

4. 姿勢制御能力測定

床支持面が移動する機能を持つ重心動揺計（BASYS、テック技販社製）を用いて片脚立位を保持する課題を実施し、片脚立位中の足圧中心（Center of Pressure：以下、COP）を計測した。

対象者は上肢を胸の前で組み、利き足を支持側として片脚立位保持を開始し、開始後10秒以内に支持面を前方または後方へ急速移動させた。対象者には支持面の急速移動によって身体が動揺してもできるだけ直立に姿

勢を保持するように指示した。支持面は秒速15 cmで3 cm移動し、急速移動の方向はランダムで行った。

COPデータはサンプリング周波数1,000 Hzにて記録した。支持面が動き始めた時点を開始時点とし、開始時点から500 ms以内にCOPが前後にもっとも移動した位置までの距離をCOP移動距離として算出した。2回測定を実施し、その平均値を統計解析に用いた。

5. 等速性収縮運動介入

運動介入群には、多用途筋機能評価運動装置（BDX-4X、BIODEX社製）を用いて足関節底屈の等速性収縮運動を実施した。アームの角速度を毎秒120度に設定し、足関節背屈10度位から底屈20度まで足関節底屈の求心性収縮のみを行った。メトロノーム音（60 bpm）に合わせて、1秒間の求心性収縮と直後の3秒間の休息を1回として数え、10回3セット実施した。セット間は60秒間の休息とした。対象者にはアームが動き始めるのに合わせて「できるだけ素速く・強く」筋収縮させるように指示した。

6. 統計解析

運動介入の有無が筋機能および立位姿勢制御能力に及ぼす影響を検討するため、MVIC、early-RFDおよびCOP移動距離それぞれに対して分割プロット分散分析を行った〔群（運動介入群×対照群）および時期（pre測定×post測定）〕。有意な交互作用がみられた場合には、群ごとに対応のあるt検定を行った。有意水準は5%とした。

結果

分割プロット分散分析の結果、early-RFDは時期の主効果および交互作用を認め（ $F=6.8$, $p<0.05$ ）、事後検定の結果、運動介入群でのみPre測定よりPost測定で有意に増大していた（ $p<0.05$ ）（表2）。一方、MVICには時期の主効果（ $F=2.4$, $p=0.132$ ）および交互作用を認めなかった（ $F=1.8$, $p=0.188$ ）。

姿勢制御能力に関して、分割プロット分散分析の結果、COP移動距離は時期の主効果および交互作用を認め（ $F=21.3$, $p<0.05$ ）、事後検定の結果、運動介入群

表 2 筋機能および姿勢制御能力に対する低強度高速度トレーニングの即時効果

	運動介入群 (n=12)		対照群 (n=12)		時期の 主効果	交互作用 (時期×群)
	Pre	Post	Pre	Post	p 値	p 値
MVIC (Nm)	112.1 ± 31.2	159.9 ± 65.4	122.9 ± 36.0	159.9 ± 57.5	0.132	0.188
early-RFD (Nm/s)	230.9 ± 138.1	383.6 ± 185.4	326.4 ± 187.9	387.2 ± 207.1	0.010	0.016
COP 最大移動距離 (mm)	62.4 ± 8.5	54.2 ± 7.7	57.7 ± 10.6	55.1 ± 8.2	0.000	0.025

でのみ Pre 測定より Post 測定で有意に減少していた ($p < 0.05$)。

考察

健常若年者を対象として低強度高速度トレーニングが足関節底屈筋の筋機能および立位姿勢制御能力に与える即時効果について検討した。本研究の結果、高速度等速性収縮運動を行った運動介入群では、運動直後に足関節底屈 early-RFD に有意な増加が認められた。一方、足関節底屈最大筋力には変化がみられなかった。また、COP 最大移動距離に関しては、運動介入群でのみ運動直後に COP 最大移動距離の減少がみられた。このことから、運動介入による足底屈 early-RFD の即時的な増大が後方への急速動揺時の立位姿勢制御能力改善に寄与していることが示唆された。先行研究では、前方への不意な動揺時の身体重心移動距離と筋力発揮 100 m 秒時点での足関節底屈トルクとの間に負の相関があることを報告している⁷⁾。また、Inacio ら¹⁶⁾ は股関節外転筋に対する 8 週間のトレーニング介入後に股関節外転の early-RFD と側方のバランス応答能力が向上したことを報告しており、側方の姿勢制御能力向上には股関節外転 early-RFD の増大が寄与することが示唆されている。一方、後方の急速動揺に対しては腓腹筋やヒラメ筋といった足関節底屈筋の関与が大きく、急速動揺直後には大きな筋活動が生じるとされている¹⁷⁾。本研究において、高速度トレーニング介入による即時的な足関節底屈 early-RFD の増大が、後方への急速動揺時の足関節底屈トルク発揮に影響した可能性が考えられる。

本研究の限界は、運動直後の即時的効果のみを示しているが、高速度等速性収縮運動による early-RFD 増大の持続効果を保障できていないこと。運動を実施しない対照群との比較を実施できていないため、高速度等速性収縮運動が本当に early-RFD 増大に貢献したかを明らかにできていないことである。

本研究の結果、低強度高速度トレーニング直後に爆発的筋力および動的姿勢制御能力は改善することが明らかになった。

文 献

1) Aagaard P, Shimonsen EB, *et al.*: Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. *J Appl Physiol.* 2002; 93:

1318-1326.

- 2) Andersen LL, Aagaard P: Influence of maximal muscle strength and intrinsic muscle contractile properties on contractile rate of force development. *Eur J Appl Physiol.* 2006; 96(1): 46-52.
- 3) Tillin NA, Pain MT, *et al.*: Explosive force production during isometric squats correlates with athletic performance in rugby union players. *J Sports Sci.* 2013; 31(1): 66-76.
- 4) Pijnappels M, van der Burg PJ, *et al.*: Identification of elderly fallers by muscle strength measures. *Eur J Appl Physiol.* 2008; 102(5): 585-592.
- 5) Chang S-HJ, Mercer VS, *et al.*: Relationship Between Hip Abductor Rate of Force Development and Mediolateral Stability in Older Adults. *Arch Phys Med Rehabil.* 2005; 86(9): 1843-1850.
- 6) Palmer TB, Hawkey MJ, *et al.*: The influence of athletic status on maximal and rapid isometric torque characteristics and postural balance performance in Division I female soccer athletes and non-athlete controls. *Clin Physiol Funct Imaging.* 2015; 35(4): 314-322.
- 7) Behan FP, Pain MTG, *et al.*: Explosive voluntary torque is related to whole-body response to unexpected perturbations. *J Biomech.* 2018; 81: 86-92.
- 8) Runge CF, Shupert CL, *et al.*: Ankle and hip postural strategies defined by joint torques. *Gait Posture.* 1999; 10(2): 161-170.
- 9) Croft JL, von Tscharnner V, *et al.*: Movement variability and muscle activity relative to center of pressure during unipedal stance on solid and compliant surfaces. *Motor Control.* 2008; 12(4): 283-295.
- 10) Riemann BL, Myers JB, *et al.*: Comparison of the ankle, knee, hip, and trunk corrective action shown during single-leg stance on firm, foam, and multiaxial surfaces. *Arch Phys Med Rehabil.* 2003; 84(1): 90-95.
- 11) Blazeovich AJ, Wilson CJ, *et al.*: Effects of Resistance Training Movement Pattern and Velocity on Isometric Muscular Rate of Force Development: A Systematic Review with Meta-analysis and Meta-regression. *Sports Med.* 2020; 50(5): 943-963.
- 12) Crow JF, Buttifant D, *et al.*: Low load exercises targeting the gluteal muscle group acutely enhance explosive power output in elite athletes. *J Strength Cond Res.* 2012; 26(2): 438-442.
- 13) Comyns T, Kenny I, *et al.*: Effects of a Low-Load Gluteal Warm-Up on Explosive Jump Performance. *J Hum Kinet.* 2015; 46: 177-187.
- 14) Thompson BJ, Ryan ED, *et al.*: Age-related changes in the rate of muscle activation and rapid force characteristics. *Age.* 2014; 36(2): 839-849.
- 15) Osawa Y, Studenski SA, *et al.*: Knee extension rate of

torque development and peak torque: associations with lower extremity function. *J Cachexia Sarcopenia Muscle*. 2018; 9(3): 530-539.

- 16) Inacio M, Creath R, *et al.*: Low-dose hip abductor-adductor power training improves neuromechanical weight-transfer control during lateral balance recovery in older adults. *Clin Biomech*. 2018; 60: 127-133.
- 17) Pollock CL, Ivanova TD, *et al.*: Motor unit recruitment and firing rate in medial gastrocnemius muscles

during external perturbations in standing in humans. *J Neurophysiol*. 2014; 112(7): 1678-1684.

発表実績

学会発表

- 1) 加藤丈博, 池添冬芽, 八木優英, 市橋則明: 足関節底屈 Rate of Force Development の増大は立位姿勢制御能力を向上させる. 第26回日本基礎理学療法学会大会(北海道・WEB開催). 2021年10月23日・24日