京都大学医学部保健学科紀要
健康科学　第1巻　2004

原　著

ステップエクササイズにおける下肢筋の筋電図学的分析

池添　冬芽*，市橋　則明*
大畑　光司*，岩下　篤司**

Electromyographic Analysis of the Lower Extremities during Stepping Machine Exercise

Tome IKEZOE*, Noriaki ICHIHASHI*,
Koji OHATA* and Atushi IWASHITA**

Abstract: The purpose of this study was to determine the effects of movement speed during stepping machine exercise on the muscle activity of the lower extremities. Nine healthy subjects with a mean age of 24.3 years, participated in this study. Electromyographic muscle activity during stepping exercise was measured in the rectus femoris, vastus medialis, vastus lateralis, biceps femoris, semimembranosus, gastrocnemius and tibialis anterior. Stepping exercise was performed at three different speeds (80, 100, 120 m/min). There was a significant difference in muscle activities of all muscles at the different movement speeds, however, muscle activities were low, at less than 30 percent. The results indicate that exercise on the stepping machine is an appropriate exercise for improving muscle endurance and conditioning of the lower extremities.

Key words: Electromyography, Stepping, Lower extremity

はじめに

階段登高型エルゴメータ（以下、ステップマシンとする）によるステップエクササイズは、主に健常人の体力向上[1~3]や心疾患患者の心肺機能の向上[4,5]を目的としたエアロビックエクササイズとしてよく用いられている。また，最近ではエアロビックエクササイズとしてだけでなく，下肢の筋力増強トレーニングとしてもステップマシンの適用範囲は広がっている。Loy ら[6]は，健常中年女性に対してステップマシンによる運動を12週間行った結果，大腿四頭筋の筋力増強効果を認めたことを報告している。さらに，ステップエクササイズのような closed kinetic chain exercise は膝関節周囲筋の同時収縮を促し，膝前十字靱帯（以下，ACL とする）にかかるストレスも低いとされていることから，ACL 再建術後のリハビリテーションプログラムとしても普及してきている[7,8]。Meyers ら[9]はステップマシンを用いたトレーニングを ACL 再建術後の患者に利用した場合，自転車エルゴメータと同程度の大腿四頭筋やハムストリングスの筋力増強効果が得られると報告している。このように，ステップマシンを用いたステップエクササイズは下肢筋，特に膝関節周囲筋の筋力増強トレーニングとしての利用が増えているものの，この運動時の下肢のバイオメカニクス，特に下肢筋の筋活動に関する研究は少ない。DeCarlo ら[10]はステップマシンによるステップエクササイズと等速性運動機器による膝屈伸運動との膝関節周囲筋の筋活動を比較し，膝屈伸運動よりもステップエクササイズの方が，大腿四頭筋とハムストリングスの同時収縮が得られると報告している。Cook ら[11]はステップマシンによるステップエクササイズと踏み台による段差昇降訓練を比較し，ステップマシンでは踏み台昇降よりも，大腿四頭筋の筋活動は少なく，腓腹筋の筋活動は大きく，ハムストリングスの筋活動は同程度を示すと報告している。しかし，このステップエクササイズにおいて，運動速度の違いによって下肢筋の筋活動量がどのように変化するかについては明らかではない。

本研究の目的は，ステップマシンを用いたステップエクササイズにおける下肢筋の筋活動量を測定し，最大収縮時と比較してステップエクササイズ時に下肢筋がどの程度活動しているのか，また運動速度の違いによって下肢筋の筋活動量がどのように変化するかを明

* 京都大学医学部保健学科理学療法学専攻
〒606-8507 京都市左京区聖護院川原町53
Department of Physical Therapy, School of Health Sciences, Faculty of Medicine, Kyoto University
** 京都回生病院リハビリテーション科
Department of Rehabilitation, Kyoto Kaisei Hospital
〒600-8814 京都市下京区中堂寺庄ノ内8-1
受稿日　2004年9月10日
受理日　2004年9月24日

確にすることである。

方　　法

1．対　象

対象は下肢・体幹に整形外科的疾患の既往のない健常成人9名とした。対象者の平均年齢は24.3±2.5歳，平均体重は60.0±5.9 kg，平均身長は170.9±5.0 cmであった。

2．ステップエクササイズにおける筋電図測定

筋電図の測定筋は，右側の大腿直筋，内側広筋，外側広筋，半膜様筋，大腿二頭筋，腓腹筋（内側頭），前脛骨筋の7筋とした。表面筋電図を双極誘導するために，銀塩化銀電極（直径8 mm）を各筋の筋線維の走行に並行に，電極中心距離20 mmで貼り付けた。各筋の筋電図の導出部位は表1の通りである。なお，皮膚の電極間抵抗が10 kΩ以下となるようにスキンピュアーで十分に処理した。

筋電図の測定にはNEC社製ポリグラフシステム360を用い，AD変換器を通してサンプリング周波数1,000 Hzでパーソナルコンピュータに入力・保存後，時定数61msecで整流平滑化筋電図（以下，RFEMG）を求めた。さらに，アニマ社製電気角度計MA-100を右膝外側部に装着し，膝関節の屈曲角度を筋電図と同期させて測定した。

表1　各筋の筋電図導出部位

大腿直筋	下前腸骨棘と膝蓋骨上縁を結ぶ線の中央
内側広筋	膝蓋骨上縁内角より内上方へ2横指
外側広筋	大転子と大腿骨外顆を結ぶ線の遠位1/3
半膜様筋	坐骨結節と脛骨内顆を結ぶ線の遠位1/3
大腿二頭筋	坐骨結節と脛骨外顆を結ぶ線の遠位1/3
腓腹筋（内側頭）	大腿骨内側顆と踵骨を結ぶ線の近位1/3
前脛骨筋	脛骨外側顆より外下方へ3横指

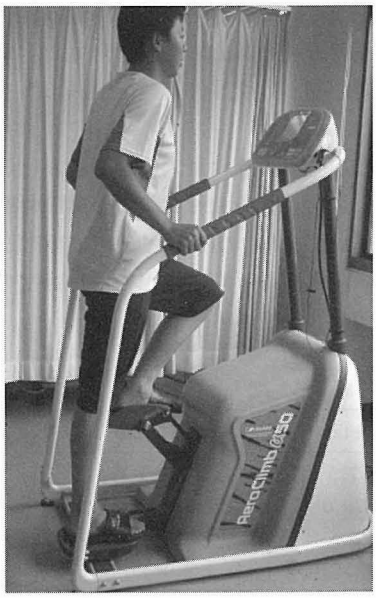

図1　ステップマシン

ステップマシンはコンビ社製エアロクライム α50を用いた（図1）。このステップマシンはペダルが上下に移動することによってステップエクササイズを行うものであり，ペダルの昇降速度の調節機能を備えている。今回は，運動速度を3種類（80，100，120 m/min）に設定してステップエクササイズを実施した。このとき，step height（ペダルの上下可動範囲）を各速度とも一定にするため，それぞれの速度に対するステップレートを規定した。すなわち，運動速度80 m/minのときは80 steps/min，100 m/minのときは100 steps/min，120 m/minのときは120 steps/minとすることによりstep heightを一定にし，メトロノームに合わせて規定のステップレートを保つよう指示した。体幹は前傾・後傾させることなくできる限り垂直姿勢を保った状態にし，ステップ駆動時に上部や下部のストッパーにあたらないよう指示した。また，上体が直立位になるようバランスを保つ程度に軽く側方部分の手すりを把持させ，できるだけ手すりには体重をかけないよう指示した。

3．最大等尺性収縮時の筋電図測定

大腿直筋，内側広筋，外側広筋は膝伸展，半膜様筋，大腿二頭筋は膝屈曲，腓腹筋は足底屈，前脛骨筋は足背屈の3秒間の最大等尺性収縮時における筋電図を測定した。

膝伸展および膝屈曲の最大等尺性収縮の測定方法は，OG技研マスキュレーターGT-100上で股関節・膝関節屈曲90度位での座位姿勢をとり，大腿部を付属のベルトにて固定し，アタッチメントを膝伸展時は下腿遠位前面，膝屈曲時は下腿遠位後面に設定し，それぞれ3秒間の最大努力下での等尺性収縮を行わせた。足底屈および足背屈の測定方法は背臥位にて膝伸展位，足底背屈中間位で，足底屈は足底部，足背屈は足背部に徒手抵抗を加えて3秒間の最大努力下での等尺性収縮を行わせた。

4．データ分析

筋電図の分析には安定した3周期分の筋活動をデータとして採用した。ステップ動作を電気角度計による膝関節角度データに基づき，ステップ上昇時の膝屈曲相とステップ降下時の膝伸展相とに分けて，その間のサンプリングデータの平均値（以下，平均RFEMGとする）を求めた。さらに各筋の3秒間の最大等尺性収縮時における平均RFEMGを100%として正規化し，それぞれ%RFEMGを求めた。

統計処理は膝屈曲・伸展相と運動速度の2要因による反復測定2元配置分散分析を用いて，ステップ動作における膝屈曲相と膝伸展相との筋活動量の違い，および運動速度による筋活動量の違いについて分析した。

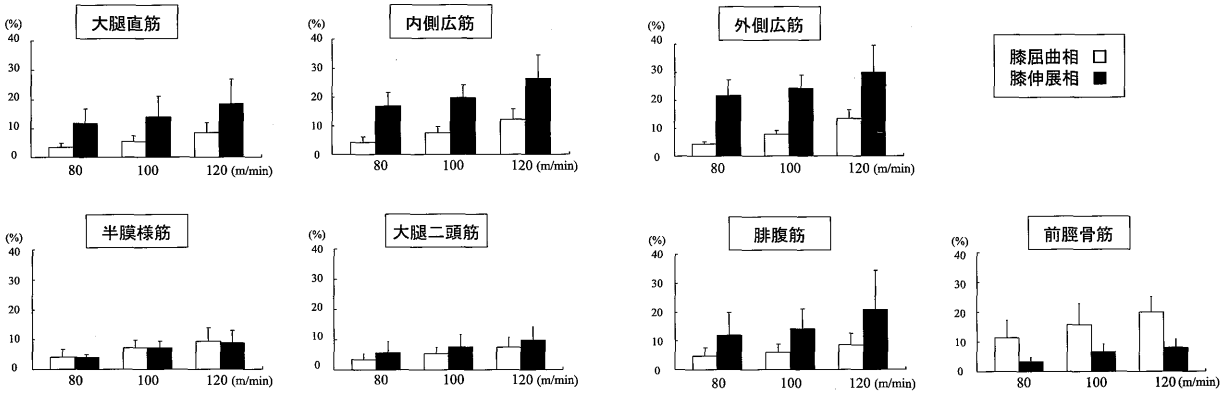

図2　ステップエクササイズにおける各筋の筋活動量

表2　二元配置分散分析の結果

	運動速度		膝屈伸相		交互作用	
	F値	p値	F値	p値	F値	p値
大腿直筋	11.5	<0.001	23.6	<0.001	0.43	NS
内側広筋	10.1	<0.001	67.6	<0.001	0.22	NS
外側広筋	14.5	<0.001	76.6	<0.001	0.12	NS
半膜様筋	7.76	<0.01	0.03	NS	0.07	NS
大腿二頭筋	9.87	<0.01	2.57	NS	0.01	NS
腓腹筋	3.88	<0.05	9.53	<0.05	1.48	NS
前脛骨筋	12.1	<0.001	17.2	<0.01	2.13	NS

反復測定2元配置分散分析を用いて，ステップ動作における運動速度による筋活動量の違い，膝屈曲相と膝伸展相との筋活動量の違いおよび運動速度と膝屈伸相との交互作用について分析した。
NS：主効果なし

結　　果

ステップエクササイズにおける各筋の筋活動量を図2に示す。最も速い 120 m/min としたときの膝屈曲相と伸展相における平均 %RFEMG はそれぞれ，大腿直筋8.6，18.3%，内側広筋12.2，26.4%，外側広筋13.6，29.8%，半膜様筋9.2，8.8%，大腿二頭筋7.5，9.9%，腓腹筋8.4，20.9%，前脛骨筋19.9，7.9%であった。各筋とも最大収縮時の30%以下の値であり，半膜様筋や大腿二頭筋のハムストリングスにおいては，最大収縮時の10%以下と低い活動量であった。

2元配置分散分析の結果を表2に示す。すべての筋において運動速度による筋活動量の変化が認められ，速度が速くなるにともない有意に筋活動量は増加した。特に大腿直筋や，内側広筋，外側広筋といった大腿四頭筋の屈曲相においては最も増加率が大きく，運動速度 80 m/min と 120 m/min それぞれの筋活動量は大腿直筋3.5，8.6%，内側広筋4.2，12.2%，外側広筋4.2，13.6と 120 m/min では 80 m/min と比較して約3倍の筋活動を示した。

また，大腿直筋，内側広筋，外側広筋，腓腹筋においては，膝伸展相での筋活動量が膝屈曲相での筋活動量よりも有意に高い値を示した。一方，前脛骨筋の筋活動量は，膝伸展相よりも膝屈曲相が有意に高かった。半膜様筋と大腿二頭筋の筋活動量における膝屈曲相と膝伸展相の違いは認められなかった。なお，運動速度と膝屈伸相との交互作用はいずれの筋もみられなかった。

膝最大屈曲時および膝最大伸展時における膝関節角度を表3に示す。膝最大屈曲時の膝関節角度の平均値は51.3～59.8度で最小値35.0度～最大値72.3度，膝最大伸展時の膝角度の平均値は15.0～19.9度で最小値0度～最大値30.0度であった。

表3　膝最大屈曲時および膝最大伸展時の膝関節角度

	80 m/min	100 m/min	120 m/min
膝最大屈曲時［°］	51.3±8.7 (35.0-70.3)	55.5±7.5 (43.8-70.0)	59.8±7.0 (48.8-72.3)
膝最大伸展時［°］	15.0±5.5 (0 -25.0)	18.6±5.6 (0 -25.5)	19.9±8.6 (2.0-30.0)

上段：平均値±標準偏差，下段：（最小値-最大値）

考　　察

近年，ステップマシンは下肢筋のコンディショニングやリハビリテーションプログラムとして広く利用されるようになってきた。ステップマシンを用いたステップエクササイズにおいて，運動速度を変化させるにつれて心肺系への運動負荷は増加し，60 steps/min では 7 METS，95 steps/min では 10 METS 程度に相当すると報告されている[12,13]。しかし，運動速度の違いによって下肢筋の筋活動量がどのように変化するかについては明らかではない。

本研究の結果，すべての筋においてステップエクササイズの運動速度による筋活動量の変化が認められ，速度が速くなるにともない有意に筋活動量は増加した。大腿直筋，内側広筋，外側広筋の大腿四頭筋においては，運動速度が 120 m/min では 80 m/min と比較して約 3 倍の筋活動を示し，最も増加率が大きかった。自転車エルゴメータでの運動速度，すなわち回転数による筋活動量の違いについては，内側広筋や外側広筋では回転数が増加するにつれて筋活動は著明に増加するが，大腿直筋ではあまり変化しないと報告されている[14,15]。座って漕ぐ自転車エルゴメータよりも，ステップマシンでは立位姿勢のバランスをとるために大腿直筋の活動は比較的高いとされており[16]，ステップエクササイズでは立位バランスを保ちつつ，ピッチを上げなければならないため，大腿直筋においても速度による違いがみられたと考えられた。

ステップエクササイズにおける筋活動量をみると，半膜様筋と大腿二頭筋においては，120 m/min の速い速度であっても，最大収縮時の10％以下と低い活動量であった。さらに，半膜様筋と大腿二頭筋においては，膝屈曲相と膝伸展相との違いも認められなかった。Zimmermann ら[17]も，ステップマシンでのエクササイズにおけるハムストリングスの筋活動は最大収縮の9.6～12.2％程度であり，ステップエクササイズはハムストリングスの筋力強化には適さないと述べている。踏み台を用いた段差昇降訓練時の筋活動量を調べた研究においても，ハムストリングスは全周期を通して10％以下の値を一定に保つと報告されている[11]。これらのことより，ステップエクササイズにおいて，ハムストリングスは駆動力としてよりも，股・膝関節の安定性を保つ役割を担っていると推察された。また，大腿四頭筋の筋活動量は 120 m/min の速い速度でも30％以下の筋活動量であり，大腿直筋18.3％，内側広筋26.4％，外側広筋29.8％であった。踏み台を用いての前方段差昇降訓練では，大腿直筋43.9％，内側広筋41.1％，外側広筋50.1％と大腿四頭筋は高い値を示し，closed kinetic chain での筋力増強訓練に応用できると報告されている[18]。また Cook ら[11]も踏み台による側方段差昇降訓練では大腿直筋27.8％，内側広筋が44.7％の筋活動に対して，ステップマシンによる 60 steps/min でのステップエクササイズでは大腿直筋が11.1％，内側広筋が25.9％と踏み台による段差昇降訓練よりステップマシンでは大腿四頭筋の筋活動は少ないと報告している。これはステップマシンでは運動時に重心がほぼ一定の高さに保たれるのに対して，踏み台昇降では踏み台上に体全体の自重を持ち上げたり引き下げたりするため，ステップマシンよりも踏み台昇降の方が大腿四頭筋の高い筋活動が求められると推察される。本研究の結果，ステップマシンによるステップエクササイズでは，速い速度で駆動させても大腿四頭筋の筋活動は最大収縮の30％以下と少ない筋活動を示した。今回は健常な若年者を対象としたが，体力レベルの低い高齢者では，同じ条件でステップエクササイズを実施しても，下肢筋に対する負荷量は若年者より大きくなる可能性が考えられる。この点については，様々な要因を考慮してのさらなる検討が必要である。

本研究において，ステップエササイズ時の膝関節可動範囲の平均値は 80 m/min の遅い速度で15.0～51.3度，120 m/min の速い速度で19.9～59.8度であった。ステップマシン駆動時の膝関節角度に関して，De Carlo ら[10]は11.4～87.5度，Asplund ら[19]は12.7～72.8度と今回より大きい値を示している。この理由として，これらの研究ではステップレート，あるいは step height を規定していなかったためと考えられる。本研究では個人ごとの膝関節角度データをみても，膝屈曲角度の最大値は72.3度であったことから，ステップレートを規定して step height を一定にしたステップエクササイズでは，膝関節屈曲制限を有する者でも運動が可能であると考えられた。

ステップマシンは背筋や殿筋，下肢筋の大きな筋群を使うことから大きな仕事量が得られ，しかも運動を長時間続けられるという利点を有しているとされている[20,21]。本研究の結果，ステップマシンでのステップエクササイズでは運動速度を速くすると，下肢筋の筋活動は増加するものの，その値は最大収縮時の30％に達しない程度であった。また，ステップレートをコントロールして step height を一定にすることによって，膝屈曲70度程度までの関節可動域範囲で運動が可能であることが示された。今後，客観的な指標に基づいた安全で効率的なリハビリテーションの方法論の確立のために，より詳細な研究が必要と考えられる。

ま　と　め

健常成人 9 名を対象に，ステップマシンを用いたステップエクササイズにおいて，膝・足関節周囲筋がどの程度活動しているのか，また運動速度の違いによっ

て筋活動量がどのように変化するかを検討した。

1）ハムストリングスの筋活動は，最大収縮時の10％以下と低い活動量であり，速い速度で運動しても筋力増強効果は低いと考えられた。また，大腿四頭筋や腓腹筋・前脛骨筋においても最大収縮時の30％以下の筋活動量であった。

2）すべての筋において運動速度による筋活動量の変化が認められ，速度が速くなるにともない有意に筋活動量は増加した。大腿四頭筋においては，運動速度120 m/min では 80 m/min と比較して約3倍の筋活動を示し，最も増加率が大きかった。

3）ステップレートと step height を規定したステップエクササイズでは，膝屈曲70度程度までの関節可動域範囲で運動が可能であることが示された。

文　　献

1) Loy SF, Holland GJ, Mutton DL, et al: Effects of stair-climbing vs run training on treadmill and track running performance. Med Sci Sports Exerc, 1993; 25(11): 1275-1278
2) Holland GJ, Hoffmann JJ, Vincent W, Mayers M: Treadmill vs steptreadmill ergometry. Physician Sportmed, 1990; 18: 79-85
3) Ben-Ezra V, Verstraete R: Stair climbing: an alternative exercise modality for firefighters. J Occup Med, 1988; 30: 103-105
4) Holland GJ, Weber F, Heng MK, et al: Maximal steptreadmill exercise and treadmill exercise by patients with coronary heart disease: a comparison. J Cardiopulmonary Rehabil, 1988; 8: 58-68
5) 上嶋健治，橋本浩哉，鎌田弘之，他：油圧式足踏み運動負荷装置を用いる心筋梗塞症患者の在宅運動療法確立のための基礎的検討．日本臨床生理学会雑誌，1996；26：9-14
6) Loy SF, Conley LM, Sacco ER, et al: Effects of stairclimbing on VO2max and quadriceps strength in middle-aged females. Med Sci Sports Exerc, 1994; 26(2): 241-247
7) Shelbourne KD, Nitz P: Accelerated rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. Am J Sports Med, 1990; 18(3): 292-299
8) Fleming BC, Beynnon BD, Renstrom PA, et al: The strain behavior of the anterior cruciate ligament during stair climbing: an in vivo study. Arthroscopy, 1999; 15(2): 185-191
9) Meyers MC, Sterling JC, Marley RR: Efficacy of stairclimber versus cycle ergometry in postoperative anterior cruciate ligament rehabilitation. Clin J Sport Med, 2002; 12(2): 85-94
10) DeCarlo M, Porter DA, Gehlsen G, Bahamonde R: Electromyographic and cinematographic analisis of the lower extremity during closed and open kinetic chain exercise. Isokin Exerc Sci, 1992; 2: 24-29
11) Cook TM, Zimmermann CL, Lux KM, Neubrand CM, Nicholson TD: EMG comparison of lateral step-up and stepping machine exercise. J Orthop Sports Phys Ther, 1992; 16(3): 108-113
12) Ryan PT, Plowman SA, Ball TE, Looney MA: Physiologic responses to forward and retrograde simulated stair stepping. Arch Phys Med Rehabil, 1994; 75(7): 798-802
13) Butts NK, Dodge C, McAlpine M: Effect of stepping rate on energy costs during Stair Master exercise. Med Sci Sports Exerc, 1993; 25(3): 378-382
14) 岩下篤司，市橋則明，池添冬芽，大畑光司：ペダリング動作における下肢筋の筋電図学的分析．理学療法学，2004；31(2)：135-142
15) Neptune RR, Kautz SA, Hull ML: The effect of pedaling rate on coordination in cycling. J Biomech, 1997; 30(10): 1051-1058
15) Ericson MO, Nisell R, Arborelius UP, Ekholm J: Muscular activity during ergometer cycling. Scand J Rehabil Med, 1985; 17(2): 53-61
16) Miller MS, Peach JP, Keller TS: Electromyographic analysis of a human powered stepper cycle during seated and standing riding. J Electromyogr Kinesiol, 2001; 11(6): 413-23
17) Zimmermann CL, Cook TM, Bravard MS, et al: Effects of stair-stepping exercise direction and cadence on EMG activity of selected lower extremity muscle groups. J Orthop Sports Phys Ther, 1994; 19(3): 173-180
18) 池添冬芽，市橋則明，羽崎完，森永敏博：段差昇降訓練における膝周囲筋の筋活動について．理学療法学，2001；28(2)：59-63
19) Asplund DJ, Hall SJ: Kinematics and myoelectric activity during stair-climbing ergometry. J Orthop Sports Phys Ther, 1995; 22(6): 247-253
20) DeBenedette V: Stair machines: the truth about this fitness fad. Physician Sports Med, 1990; 18: 131-134
21) American College of Sports Medicine: Guidelines for exercise testing and prescription. 4th ed. Philadelphia, PA, Lea and Febiger, 1991