

踏み台運動における抗重力筋のエキセントリック 収縮局面の検討

丸山昭男^{*,**}・小南賢人^{*}・宮田浩文^{*}

Eccentric Contraction Phases of Antigravity Muscles in Step up/down Exercise

Akio MARUYAMA ^{*,**}, Masato KOMINAMI ^{*} and Hirofumi MIYATA ^{*}

Summary

It has been demonstrated a possibility that the eccentric contraction in antigravity muscle is effective muscle training to induce recruitment of fast-twitch muscle fibers. In this study, we examined some eccentric and concentric phases in monoarticular and antigravity muscle, gluteus major (GM), vastus lateralis (VL) and soleus (Sol) muscles, during step up/down exercise and suggested a method for enhancing eccentric contraction activity in these muscles.

Healthy male adult (n=8) were subjected to up/down exercise using a box (24 cm height) with a step/1.2 sec pace. Surface EMG activities of the muscles and joint angle changes in hip, knee and ankle joints of sustained leg on the box were recorded simultaneously by motion analyze system (1200Hz in EMG and 120 Hz in Video). Concentric and eccentric contraction phases were identified by the EMG recording and joint angle change, and an integrated EMG (iEMG) of each contraction phase was compared between forward and backward steps.

The mean value of iEMG in GM muscle showed significantly higher in eccentric contraction phase during backward step down than forward step down. In both of VL and Sol muscles, the mean value of iEMG showed significantly higher in concentric contraction phase during backward step up than forward step up. In addition, the mean value of iEMG in Sol muscle showed significantly higher in eccentric contraction phase during backward step up than forward step up.

From these results, the most effective exercise pattern to induce eccentric contraction was suggested as follows; forward step up and backward step down for GM muscle; backward step up and forward step down for VL and Sol muscles.

Key words: Eccentric contraction, Antigravity muscle, EMG

* 山口大学大学院医学系研究科生物機能科学
Department of Biological Science, Graduate School of Medicine, Yamaguchi University
** 小郡第一総合病院リハビリテーション科
Department of Rehabilitation, Ogori Daiichi General Hospital

I. 緒言

踏み台運動は、比較的手軽にかつ安全に行うことができる筋力トレーニング法の1つである。この運動の特徴は踏み台の高さを利用する点にあり、主として、踏み台に立脚している下肢に対して筋力トレーニングの効果があると考えられる。運動連鎖の観点からは足底が地面に固定された閉鎖性運動学的連鎖 (closed kinetic chain)⁹⁾の運動に分類される。また、踏み台運動は抗重力筋の収縮様式により、上りは筋が収縮しながら短縮するコンセントリック収縮相、下りは筋が収縮しながら伸張するエキセントリック収縮相に大きく区分されるが、詳細にはさらに複雑な収縮相を示すことが予測される。

筋のエキセントリック収縮トレーニングは、筋肥大に加えて神経要因による筋力増強効果が大きいことおよび Type II 線維 (fast-twitch fiber: 速筋線維) を選択的に刺激する可能性があることが報告されている^{2,3,9,11,14)}。例えば、Nardone ら¹¹⁾は筋電図学的研究で、筋のエキセントリック収縮が Type II 線維を選択的に刺激する可能性を報告した。また、Lieber ら⁹⁾はエキセントリック収縮により Type II 線維が選択的に損傷することを示し、Takekura ら¹⁴⁾はエキセントリックエクササイズが Type II 線維の興奮収縮過程における膜システムに損傷を与えることを報告した。これらの報告もまた、筋のエキセントリック収縮が Type II 線維を選択的に刺激する可能性があることを示唆するものである。一方、諸家の報告^{5,12)}によると筋の収縮様式の違いが心血管系機能に与える影響として、エキセントリック収縮トレーニングはコンセントリック収縮トレーニングよりも心拍数や血圧上昇が低いことが示されている。これ

らの報告から示唆されることは、エキセントリック収縮トレーニングは心血管系機能に大きな負荷を与えずに Type II 線維を選択的に刺激することができ、高齢者に対して有用な筋力トレーニングの方法となる可能性があるということである。抗重力筋のエキセントリック収縮を比較的容易に引き起こす具体的なトレーニング方法としては、踏み台運動の他、下り傾斜面歩行やスクワット運動などがある。これまで、スクワット運動やレッグプレス運動などの閉鎖性運動学的連鎖を分析した報告は散見するが^{1,6)}、踏み台運動を詳細に分析した報告は少ない。

そこで本研究では、前向きおよび後向きの踏み台運動における抗重力筋の筋活動をコンセントリック収縮相およびエキセントリック収縮相に区分して検討し、効率よくエキセントリック収縮を引き起こす運動パターンについて検討した。これらの結果は、高齢者の筋力トレーニングあるいはリハビリテーションに対して有用な知見を提供すると考えられる。

II. 方法

1. 被験者および運動試験

8人の健康な男性 (年齢27.5±9.6歳、身体特性: 表1) に対し、研究の目的・危険性について十分に説明し、被験者として参加する旨の承諾を得た。本研究は、山口大学における人間を対象とする研究の審査委員会の許可を得てヘルシンキ宣言に則り実施した。

実験で用いた踏み台運動を図1に示す。高さ24cmの踏み台を設置し、ピッチ計を用い1 step/1.2sのペースで上り下り運動をした。右下肢から前向きで上る、左下肢から前向きで下る、右下肢

Table 1 Physical characteristics of subjects

No.	Height (cm)	Body weight (kg)	Thigh length (cm)	Lower leg length (cm)
1	183.5	74.8	41.5	41.0
2	174.6	79.3	40.5	41.7
3	174.1	64.2	42.5	42.0
4	173.2	68.3	41.8	39.2
5	173.0	64.0	41.5	40.5
6	170.1	67.1	36.0	39.5
7	167.0	64.2	39.0	39.5
8	164.3	56.1	36.0	38.5
Average±SD	172.5±5.8	67.3±7.1	39.7±2.7	40.2±1.3

SD: standard deviation

から後向きで上る, 左下肢から後向きで下るという一連の運動を行った. 左手は手すりを保持し, 運動が安全かつスムーズにできるように十分練習した後, 3回の記録を行った. 股関節, 膝関節および足関節の角度変位を測定すると同時に, 単関節の抗重力筋である大殿筋, 外側広筋, ヒラメ筋の筋電信号を記録した.

2. 関節角度および表面筋電図の記録

股関節, 膝関節, 足関節の角度変位を測定するために, 蛍光マーカーを腸骨稜 (大転子からの鉛直線と腸骨稜の交点), 大転子, 大腿骨外側上顆, 外果下方, 第5中足骨に貼付し, 二次元カメラ・録画システム (Capture Ex, ライブラリー) を用いて側方から120Hzにて録画した. 各関節角度については, 股関節は腸骨稜と大転子を結ぶ線と大転子と大腿骨外側上顆を結ぶ線がなす角の前面側を, 膝関節は大転子と大腿骨外側上顆を結ぶ線と大腿骨外側上顆と外果下方を結ぶ線がなす角の後面側を, 足関節は大腿骨外側上顆と外果下方を結ぶ線と外果下方と第5中足骨を結ぶ線がなす角の前面側を測定した. 単関節筋を測定筋としたため, 各関節の角度変位をもとに各筋の短縮, 伸張を規定することができる. さらに, 収縮に要した時間から, 各収縮相の関節角速度 (°/s) を算出した.

筋電図導出のための電極には, 皮膚表面電極 (丸形粘着ゲル付電極, 日本ビニールコード社製) を用

いた. 電極の装着に当たっては, アルコール綿で十分に拭き皮脂抵抗を少なくした. 各筋から双極性に導出した筋電信号を生体アンプ (生体電気用増幅ユニット4124, 日本電気三栄社製) で増幅し, 画像と同期記録 (1200 Hz; 10サンプル/1画像) した. なお, High Cut Off を 1 kHz, Time Constant を 0.003 秒, Sensitivity を 0.05mV/0.5V に設定した. 筋活動量を評価するために, 筋電波形解析ソフト (Wave Disp) を使用し各筋のコンセントリック収縮およびエキセントリック収縮の筋電図積分値を算出した. 関節角度変位および筋電図積分値とも3回の試行の平均値を各被験者の値とした. さらに, 収縮に要した時間から, 各収縮相の筋電図平均振幅 (μV) を算出した.

本研究では, 当初踏み台に立脚している下肢 (右下肢) と反対側下肢 (左下肢) の関節角度・筋電図記録を別々の試行において記録した. しかし, 今回用いた踏み台の高さおよびペースでは, 左下肢においては顕著な放電がほとんど記録されなかったため, 右下肢 (踏み台に立脚している下肢) のみを分析の対象とした. また, 各筋のコンセントリック収縮を「筋が短縮する角度変位を示していること」, 「連続したスパイク波が出現していること」, 「被験者すべてにおいて上記2条件を満たしていること」と定義した. 一方, 各筋のエキセントリック収縮は, 「筋が伸張する角度変位を示していること」, 「連続したスパイク波が出現していること」, 「被験

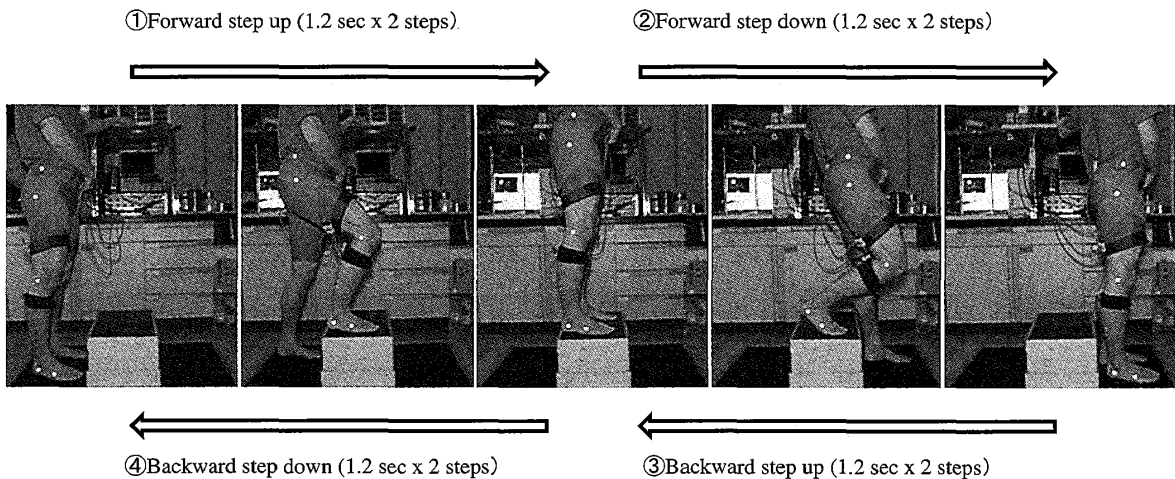


Figure 1 Forward step up/down and backward step up/down exercises Surface EMG activities of gluteus major (GM), vastus lateralis (VL) and soleus (Sol) muscles and angle changes in hip, knee and ankle joints of sustained leg on the box (24 cm height) were recorded simultaneously by motion analyze system.

者すべてにおいて上記2条件を満たしていること」と定義した。

3. 統計

得られた結果については、平均値および標準偏差で表した。関節角度変位および筋電図積分値の運動局面（前向き上り vs 後向き上り，前向き下り vs 後向き下り）における差異を各被験筋ごとに paired T-test で検定した。全ての検定において、有意水準は $P < 0.05$ とした。

III. 結果

1. 各収縮相における関節角度変位および角速度の比較

各関節の角度変位および筋電図記録の結果を図2A（大殿筋），2B（外側広筋），2C（ヒラメ筋）に示す。

大殿筋のコンセントリック収縮相は、前向きおよび後向きの上り局面（a and c）で認められた。エキセントリック収縮相は、前向きおよび後向きの下り局面（b and d）で認められた。

局面（b and d）で認められた。外側広筋のコンセントリック収縮相は、前向きおよび後向きの上り局面（f and h）で認められた。エキセントリック収縮相は、下りの局面（g and i）に加えて、前向き上りでの踏み台接地直後の局面（e）でも認められた。後向き上りでの踏み台接地直後には認められなかった。ヒラメ筋のコンセントリック収縮相は、前向きおよび後向きの上り局面（k and n）で認められた。エキセントリック収縮相は、下り局面（l and o）に加えて、前向き上りでの踏み台接地直後（j），後向き上りでの踏み台接地直後の局面（m）に認められた。

対応する局面における各関節の角度変位を前向きと後向きで比較した結果を図3に示す。股関節のコンセントリック収縮相では、前向き上りが $38 \pm 16^\circ$ （a）に対して後向き上りが $21 \pm 9^\circ$ （c）であり、前向きが有意に大きな変位を示した。それぞれの角速度は 27 ± 12 および $17 \pm 7^\circ/s$ であり、有意差は認められなかった。一方、エキセントリック収縮相では、前向き下りが $11 \pm 9^\circ$ （b）に対して後向き下りが $34 \pm 12^\circ$ （d）であり、後向きが有意に大きな変位

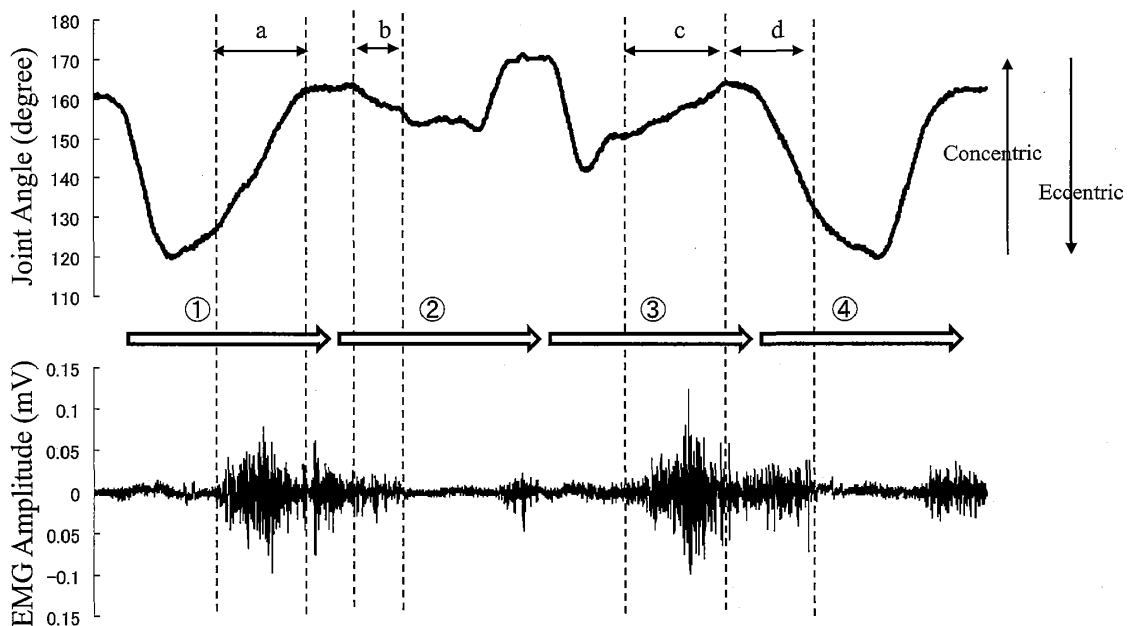


Figure 2A Angle changes in hip joint (upper trace) and EMG activities of GM muscle (lower trace)

Concentric and eccentric contraction phases were identified by the EMG recording and angle changes.

①: forward step up (2.4sec), ②: forward step down (2.4sec), ③: backward step up (2.4sec), ④: backward step down (2.4sec)

a: forward concentric phase, b: forward eccentric phase, c: backward concentric phase, d: backward eccentric phase

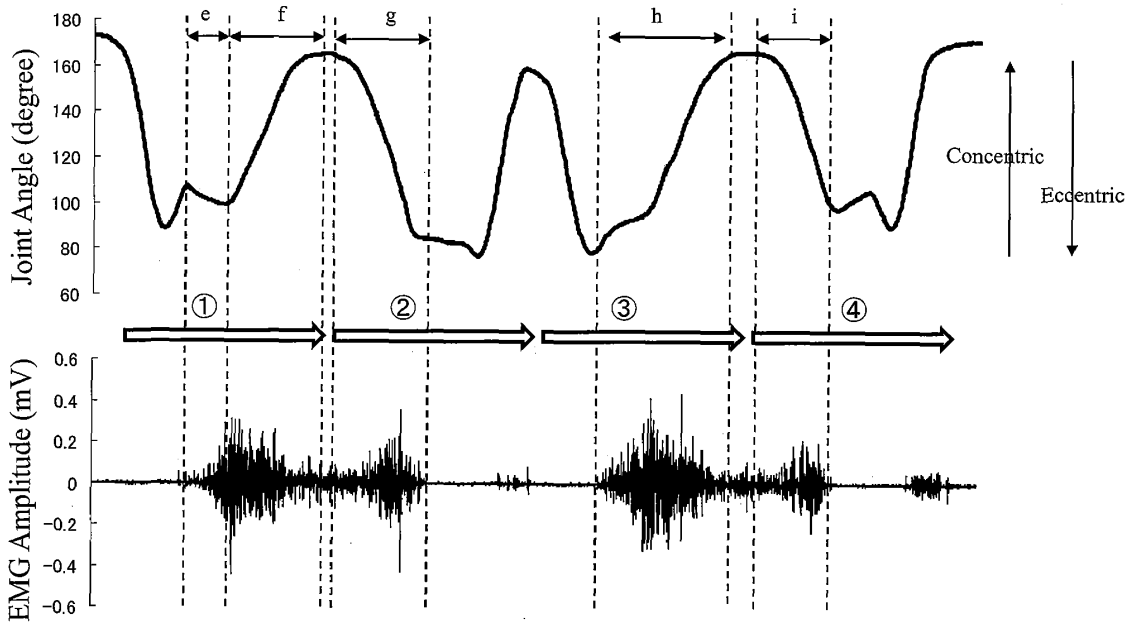


Figure 2B Angle changes in knee joint (upper trace) and EMG activities of VL muscle (lower trace)

e: 1st forward eccentric phase, f: forward concentric phase, g: 2nd forward eccentric phase, h: backward concentric phase, i: backward eccentric phase

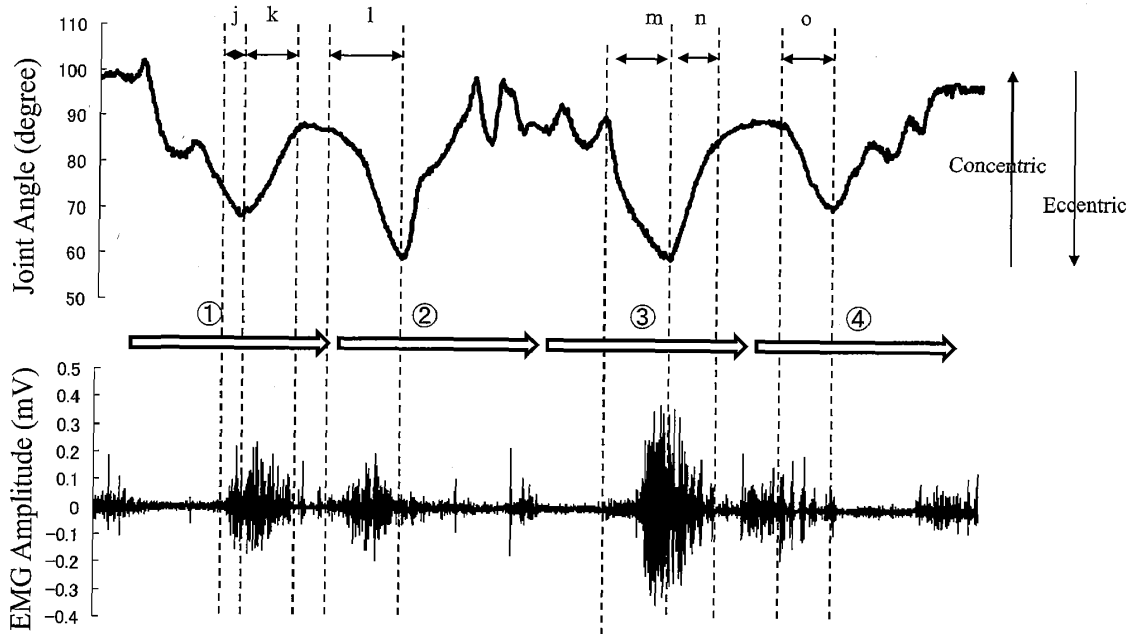


Figure 2C Angle changes in ankle joint (upper trace) and EMG activities of Sol muscle (lower trace)

j: 1st forward eccentric phase, k: forward concentric phase, l: 2nd forward eccentric phase, m: 1st backward eccentric phase, n: backward concentric phase, o: 2nd backward eccentric phase

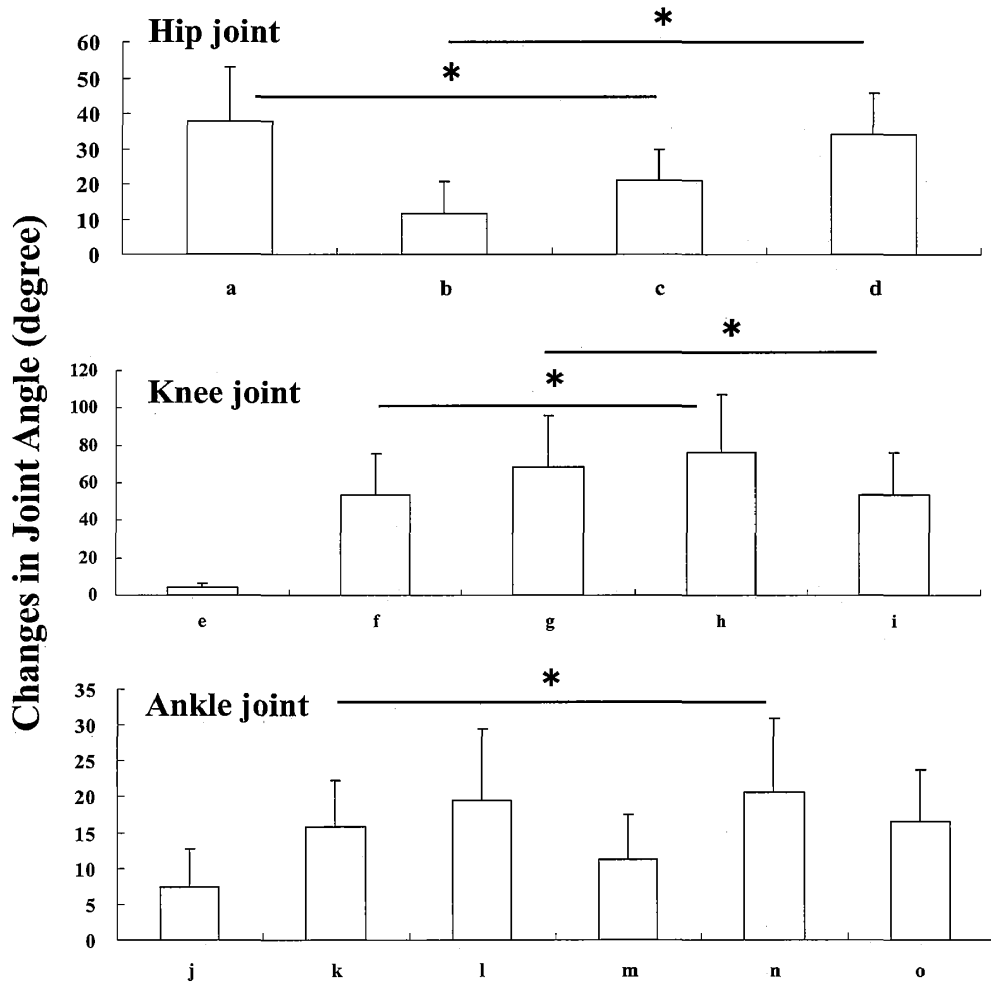


Figure 3 Changes in joint angle at hip (top), knee (middle) and ankle (low)
Abbreviations are the same as in figure 2. *: significant ($p < 0.05$)
difference

を示した。それぞれの角速度は 16 ± 11 および 29 ± 9 %/sであり、後ろ向きが有意に速い角速度を示した。また、膝関節のコンセントリック収縮相では、前向き上りが $54 \pm 22^\circ$ (f) に対して後向き上りが $76 \pm 31^\circ$ (h) であり、後向きが有意に大きな変位を示した。それぞれの角速度は 57 ± 26 および 57 ± 25 %/sであり、有意差は認められなかった。一方、エキセントリック収縮相では、前向き下りが $68 \pm 27^\circ$ (g) に対して後向き下りが $54 \pm 23^\circ$ (i) であり、前向きが有意に大きな変位を示した。それぞれの角速度は 63 ± 28 および 54 ± 25 %/sであり、有意差は認められなかった。さらに、足関節では、コンセントリック収縮相において前向き上りの $16 \pm 6^\circ$ (k) に対して後向き上りが $21 \pm 10^\circ$ (n) であり、後向きが有意に大きな変位を示した。それぞれの角速度は 25 ± 11 および 22 ± 10 %/sであり、有意差は認められなかった。

2. 各収縮相における筋電図積分値および平均振幅の比較

図4は、それぞれ対応する局面において各筋の筋電図積分値を比較した結果である。

大殿筋のエキセントリック収縮相では、前向き下りが $5.7 \pm 2.1 \text{ mV} \cdot \text{ms}$ (b) に対して後向き下りが $12.7 \pm 2.8 \text{ mV} \cdot \text{ms}$ (d) であり、後向きが有意に大きな値を示した。それぞれの平均振幅は 7 ± 3 および $9 \pm 2 \mu\text{V}$ であり、有意差は認められなかった。一方、コンセントリック収縮相での前向きと後向きの運動間に有意差は認められなかった。また、外側広筋のコンセントリック収縮相では、前向き上りが $61.1 \pm 14.8 \text{ mV} \cdot \text{ms}$ (f) に対して後向き上りが $87.0 \pm 22.3 \text{ mV} \cdot \text{ms}$ (h) であり、後向きで有意に大きな値を示した。それぞれの平均振幅は 54 ± 18 および $56 \pm 22 \mu\text{V}$ であり、有意差は認められなかった。一方、エキセントリック収縮相での前向きと後向き

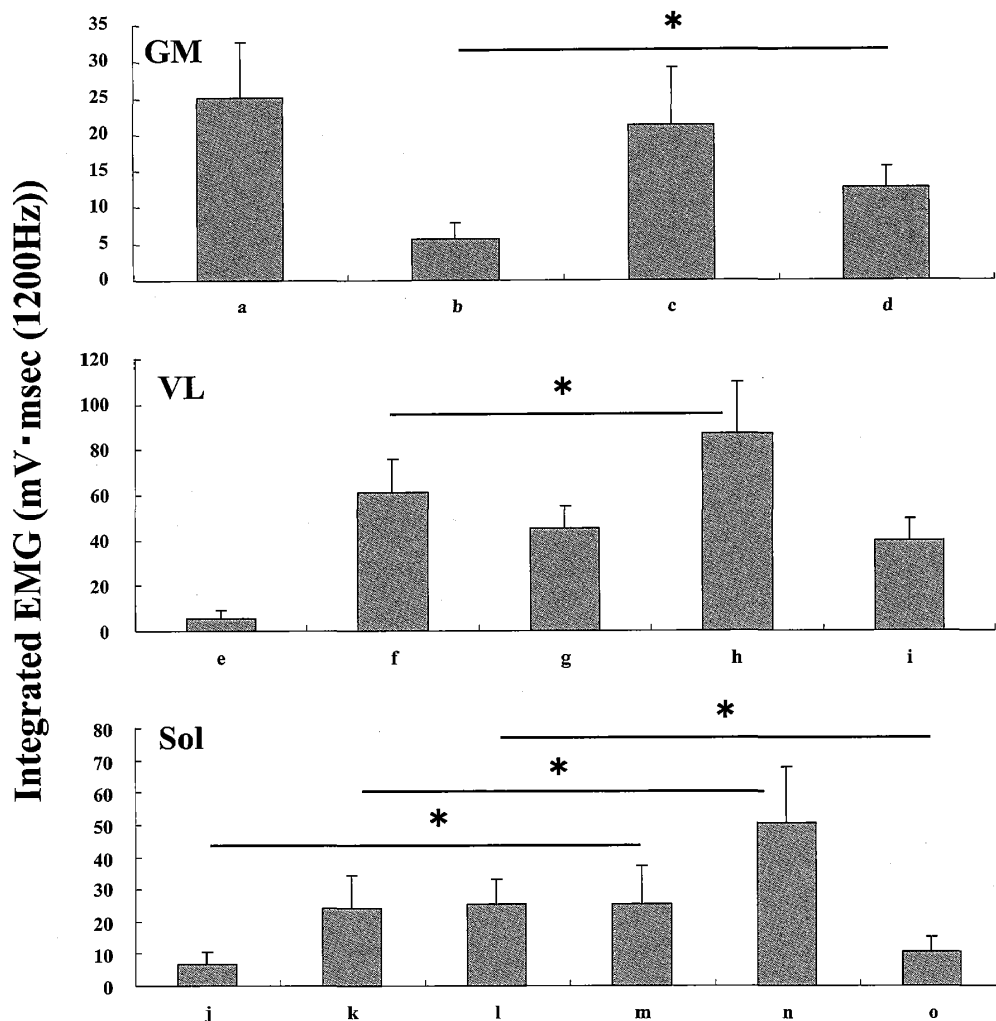


Figure 4 Changes in integrated EMG of GM (top), VL (middle) and Sol (low) muscles
Abbreviations are the same as in figure 2. *: significant ($p < 0.05$) difference

の運動間に有意差は認められなかった。前向き上り踏み台接地直後の局面でのエキセントリック収縮相は後向き上りでは認められなかった。さらに、ヒラメ筋のコンセントリック収縮相では、前向き上りが $24.0 \pm 10.5 \text{ mV} \cdot \text{ms}$ (k) に対して後向き上りが $50.5 \pm 17.3 \text{ mV} \cdot \text{ms}$ (n) であり、後向きで有意に大きな値を示した。それぞれの平均振幅は 30 ± 12 および $46 \pm 7 \mu\text{V}$ であり、後向きで有意に大きな値を示した。上り踏み台接地直後の局面でのエキセントリック収縮相では、前向き上りが $6.9 \pm 3.7 \text{ mV} \cdot \text{ms}$ (j) に対して後向き上りが $25.2 \pm 12.1 \text{ mV} \cdot \text{ms}$ (m) であり、後向きで有意に大きな値を示した。それぞれの平均振幅は 21 ± 12 および $48 \pm 20 \mu\text{V}$ であり、後向きで有意に大きな値を示した。一方、踏み台からの下りの局面でのエキセントリック収縮相では、前

向き下りが $25.4 \pm 7.6 \text{ mV} \cdot \text{ms}$ (l) に対して後向き下りが $10.4 \pm 4.9 \text{ mV} \cdot \text{ms}$ (o) であり、前向きで有意に大きな値を示した。それぞれの平均振幅は 21 ± 5 および $13 \pm 5 \mu\text{V}$ であり、前向きで有意に大きな値を示した。また、エキセントリック収縮相のうちで最も大きな値を示した前向き下り (l) と後向き上り踏み台接地直後の局面 (m) を比較すると、平均値は同等であり有意差を認めなかった。

IV. 考察

本研究では、股関節、膝関節および足関節の角度変位から筋の短縮および伸張を規定した。また、コンセントリック収縮およびエキセントリック収縮の各相区分を明確にするために単関節筋である大殿筋、外側広筋、ヒラメ筋を被験筋とした。

踏み台の高さとステップのペースについては、予備実験において検討した。まず、踏み台の高さを決定するために、16cm（一般家庭にある低い階段の高さ）～40cm（ハーバードステップテスト日本男子用踏み台の高さ）を4cm刻みで検討した。その結果、心血管系器官に過度に負担がかからないことおよび家庭内にもある範囲の段差であることの2点を考慮し、24cmの高さ（一般家庭にある高い階段の高さ）を本実験では採用した。また、ステップのペースに関しては、本実験の被験者が特に指示のない状態で行った踏み台（24cm高）運動における平均速度が0.71～1.15s/stepであったことに基づいて決定した。高齢者を対象にした筋力トレーニングおよびリハビリテーションのための基礎的知見を得ることが本研究の重要な目的であることを考慮し、確実に上り下りのステップ運動ができる1.2s/stepのペースとした。

踏み台運動の前向きと後向きの対応する局面間で、筋積分値で表される筋活動量の大きさを比較すると、大殿筋においては上りのコンセントリック収縮相では前向きが大きい傾向にあり、下りのエキセントリック収縮相では後向きが有意に大きかった。後者の収縮相では、関節角速度も有意に速くなっていることが確認されたが、筋電図の平均振幅には有意な増大は認められず、運動単位動員パターンの変化を推測させる結果は得られなかった。外側広筋では前向き上りでのみ認められた踏み台接地直後のエキセントリック収縮相の筋活動量はわずかであった。下りのエキセントリック収縮相では有意差は認められないものの後向きと比較して前向きで筋活動量が大きい傾向があった。外側広筋とヒラメ筋のコンセントリック収縮相においては前向き上りと比較して後向き上りの局面での筋活動量が有意に大きかった。また、ヒラメ筋のエキセントリック収縮相においては、踏み台接地直後の局面で前向き上りと比較して後向き上りの筋活動量が有意に大きかった。また、踏み台からの下りの局面では後向きと比較して前向きが有意に大きかった。外側広筋およびヒラメ筋の筋活動量は大殿筋の場合とは対照的に、上りのコンセントリック収縮相では後向きが有意に大きく、下りのエキセントリック収縮相では前向きが大きい傾向にあった（図4）。

また、このような前向きと後向きを比較した筋活動量の結果と各関節の角度変位の結果は同様の傾向

を示した（図3）。つまり、前向きと後向きの対応する局面間の比較において、同じ局面で筋活動量が大きいほうが角度変位も大きい値を示した。日常生活あるいはスポーツ活動では、関節運動を伴う筋力の発揮が求められる場面が多い。筋力はトレーニングを行った条件下で最も効果的に発揮されるという筋力発揮の特異性¹⁰⁾の面からも、大きな角度変位を伴う筋力トレーニングは有用と考えられる。よって、筋活動量および大きな角度変位を伴う筋力発揮という面からは、大殿筋を対象とする筋力トレーニングでは踏み台を前向きで上り後向きで下ることが、外側広筋とヒラメ筋を対象とする場合には後向きで上り前向きで下ることが有効であると考えられる。

また、一方では関節角度変位が大きくかつ抗重力筋の筋活動量が大きい運動は関節に加わる負荷も大きいことが推測される。よって、関節疾患を有する患者に対する日常生活指導の1つとして、階段下りにおいては股関節疾患では前向きの方法を、膝関節および足関節疾患では後向きの方法をすすめる根拠を得ることもできた。

次に、筋の収縮様式、特にエキセントリック収縮という観点から踏み台運動を検討する。踏み台運動は、特別な場所や器具を必要とせず比較的手軽に行うことができる筋力トレーニング法であり、高齢者に対しても安全で有用と考えられる。老化に伴う筋の特徴的な変化には、筋線維横断面積の減少、総筋線維数の減少およびType I線維（slow-twitch fiber：遅筋線維）に対するType II線維横断面積の選択的萎縮があげられる¹⁵⁾。よって、高齢者に対する筋力トレーニングにおいては、Type II線維を刺激することが求められる。一般的に、Type II線維を刺激するトレーニングには高強度負荷を要する^{4,13)}が、高齢者においてはこのようなトレーニングは心血管系器官に対する負荷という面からは安全とはいえない。Nardoneら¹⁴⁾は、筋のエキセントリック収縮トレーニングがType II線維を選択的に刺激する可能性を示した。Lieberら⁹⁾はエキセントリック収縮によりType II線維が選択的に損傷することを示した。また、我々が行ったラットを対象とした動物実験の先行研究¹⁰⁾においても、下り傾斜面走行によるエキセントリック収縮トレーニングが平面走行と同等の運動強度でType II線維を選択的に刺激する可能性があることが示された。よって、踏み台運動においても抗重力筋のエキセントリック収縮を誘発する方

法を模索することは意義が大きいと考えられる。踏み台からの下り局面におけるエキセントリック収縮による筋活動量は、大殿筋では前向きと比較して後向きで有意に大きかった。外側広筋では後向きと比較して前向きで大きい傾向があり、ヒラメ筋では後向きと比較して前向きで有意に大きかった(図4)。

一方、本研究で得られた最も注目すべき結果はヒラメ筋のエキセントリック収縮についてである。一般的には、階段や傾斜面の上り歩行では抗重力筋はコンセントリック収縮し、下りではエキセントリック収縮すると考えられている。本研究においても前向きの運動においてはこの傾向が認められた。しかし、運動方向を後向きにすることにより踏み台接地直後の局面のエキセントリック収縮相での筋活動量が有意に大きくなり、エキセントリック収縮相のうちで筋活動量が最も大きかった前向き下りと同等の筋活動量を示した(図4)。このことは、踏み台を上ることが抗重力筋であるヒラメ筋のコンセントリック収縮による筋活動を高めるのみでなく、エキセントリック収縮をも誘発する可能性を示している。また、筋電図積分値の増減は、筋電図の発現した時間と振幅によって規定されるが、本研究では運動速度を規定したために、時間より振幅の増減に意味があると考えられる。そこで、平均振幅を算出し、前向きと後ろ向きの局面を比較した。その結果、ヒラメ筋の筋活動量増減に関しては筋電図振幅の増減が大きく貢献していることが示された。特にヒラメ筋の踏み台接地直後のエキセントリック収縮相(j vs m)においては、後向きの平均振幅が前向きの平均振幅の2.3倍の値を示し、異なる運動単位の動員が誘発された可能性が推察される結果であった。本研究では、動員された運動単位のタイプを同定することは不可能であるが、前向きの運動だけでは動員されない運動単位を刺激した可能性は高く、高齢者の筋力トレーニングおよびリハビリテーションに有用な知見であると考えられる。これらの結果はアキレス腱断裂のリハビリテーションに対しても応用できる。下腿三頭筋のエキセントリック収縮はアキレス腱断裂の発生機序における危険因子とされており²⁾、手術後のリハビリテーションにおいても早期には禁忌である。しかし、日常生活やスポーツ活動への復帰を目標にした最終段階においてエキセントリック収縮トレーニングは不可欠である。踏み台への後向き上り運動における接地直後の局面でのヒラ

メ筋のエキセントリック収縮トレーニングは、膝関節屈曲位の運動であり腓腹筋は短縮位にあるため再断裂の危険性も低く安全な方法と考えられる。視覚によるフィードバックが得られない後向き踏み台運動は位置覚や運動覚といった深部感覚に対する刺激にもなり、踏み台接地直後の局面でのエキセントリック収縮から踏み台への上りの局面でのコンセントリック収縮への収縮様式の瞬時の転換という点からも、より実際的なトレーニングといえる。

以上より、踏み台運動による筋力トレーニングでは、筋活動量、筋力発揮中の関節角度変位およびエキセントリック収縮の誘発という観点から、大殿筋を対象にする場合には前向きで上り後向きで下ることが、外側広筋とヒラメ筋を対象にする場合には後向きで上り前向きで下ることが効果的であるといえる。つまり、閉鎖性運動学的連鎖トレーニングの1つである踏み台運動に前向き下り、後向き上りという変化を加えることにより抗重力筋に対するトレーニング効果がより高くなる可能性が示唆された。

本実験の被験者には身長で19.2cm、大腿長で6.5cm、下腿長で3.5cmの範囲の個人差が認められた。この身体特性の差は関節角度変位および筋電図に影響を与えることが予測されたが、両測定項目と各身体特性指標との相関は認められなかった。これは、測定を行わなかった反対側下肢の関節角度を厳密に規定しなかったことが一因と推察され、今後の実験の課題であると考えている。また、前向きと後向きの筋活動量が大殿筋の場合と外側広筋およびヒラメ筋の場合で対照的な結果を示したことは興味深く、今後さらに詳細な分析を行いたい。さらには、バイオブシーを用いた組織・生化学的分析などにより踏み台運動のコンセントリック収縮相およびエキセントリック収縮相における筋線維タイプ動員様式を明らかにすることも検討している。

V. まとめ

抗重力筋におけるエキセントリック収縮トレーニングは、速筋線維を選択的に動員する可能性を有する。本研究では抗重力筋に対して比較的容易にエキセントリック収縮を発生させることができる踏み台運動において、エキセントリック収縮が生じる局面を明らかにし、その収縮の程度を増大させる方策について検討した。8人の健常成人男性の単関節抗重力筋である大殿筋、外側広筋、ヒラメ筋を被験筋と

し、以下の4つの条件で高さ24cmの踏み台運動を行った。踏み台運動は、1歩/1.2秒のペースで、前向き上り下り(4.8秒)、続いて後向き上り下り(4.8秒)の一連の試行を3回連続して行った。踏み台に立脚している下肢の股関節、膝関節および足関節の角度変化と大殿筋、外側広筋およびヒラメ筋の筋電信号の発現からコンセントリック収縮相およびエキセントリック収縮相を同定し、筋電図積分値を算出した。

その結果、大殿筋においては前向き下りと比較して後向き下りのエキセントリック収縮相における積分値が有意に増大した。外側広筋とヒラメ筋においては前向き上りと比較して後向き上りの局面でのコンセントリック収縮相の筋電図積分値が有意に増大した。また、ヒラメ筋では踏み台接地直後の局面で前向き上りと比較して後向き上りのエキセントリック収縮相における積分値が有意に増大した。さらに、ヒラメ筋においては、後向き下りと比較して前向き下りの局面でのエキセントリック収縮相の筋電図積分値の増大が確認された。

以上の結果を総合的に考えると、大殿筋に対しては前向きで上り後ろ向きで下る方法が、外側広筋とヒラメ筋に対しては後向きで上り前向きで下る方法が、筋活動を増大させかつエキセントリック収縮を効果的に発生させる運動であることが示唆された。

文献

- 1) Azegami M, Yanagihashi R, Miyoshi K, Akahane K, Ohira M, Sadoyama T (2007) Effects of multi-joint angle changes on EMG activity and force of lower extremity muscles during maximum isometric leg press exercises. *J Phys Ther Sci* 19: 65-72
- 2) Colliander EB, Tesch PA (1990) Effects of eccentric and concentric muscle actions in resistance training. *Acta Physiol Scand* 140: 31-39
- 3) Enoka RM (1996) Eccentric contractions require unique activation strategies by the nervous system. *J Appl Physiol* 81: 2339-2346
- 4) Henneman E, Somjen G, Carpenter DO (1965) Excitability and inhibibility of motoneurons of different sizes. *J Neurophysiol* 28: 599-620
- 5) Horstmann T, Mayer F, Fischer J, Maschmann J, Röcker K, Dickhuth HH (1994) The cardiocirculatory reaction to isokinetic exercises in dependence on the form of exercise and age. *Int J Sports Med* 15: S50-S55
- 6) 市橋則明, 吉田正樹, 篠原英記, 伊藤浩充 (1992) スクワット動作の筋電図学的考察. *理学療法学*. 19: 487-490
- 7) 笠次良爾, 杉本和也, 中山正一郎, 高倉義典 (1999) バレーボールにおけるアキレス腱断裂について-受傷機転を中心に-. *臨床スポーツ医学*. 16: 369-372
- 8) Kawamura K, (2007) Closed kinetic chain exercise. *J Clin Rehabil* 16: 562-565
- 9) Lieber RL, Fridén J (1988) Selective damage of fast glycolytic muscle fibres with eccentric contraction of the rabbit tibialis anterior. *Acta Physiol Scand* 133: 587-588
- 10) 丸山昭男, 山野聖子, 山縣宏美, 宮田浩文 (2009) 下り傾斜面トレッドミル走行がラット抗重力筋の動員様式に及ぼす影響. *総合リハビリテーション* 37: 157-163
- 11) Nardone A, Romanò C, Schieppati M (1989) Selective recruitment of high-threshold human motor units during voluntary isotonic lengthening of active muscles. *J Physiol* 409: 451-471
- 12) Overend TJ, Versteegh TH, Thompson E, Birmingham TB, Vandervoort AA (2000) Cardiovascular responses to submaximal concentric and eccentric isokinetic exercise in older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 55: B177-182
- 13) Sieck GC, Fournier M (1989) Diaphragm motor unit recruitment during ventilatory and nonventilatory behaviors. *J Appl Physiol* 66: 2539-2545
- 14) Takekura H, Fujinami N, Nishizawa T, Ogasawara H, Kasuga N (2001) Eccentric exercise-induced morphological changes in the membrane systems involved in excitation-contraction coupling in rat skeletal muscle. *J Physiol* 533: 571-583
- 15) Trappe SW, Costill DL, Fink WJ, Pearson DR (1995) Skeletal muscle characteristics among distance runners: a 20-yr follow-up study. *J Appl Physiol* 78: 823-829
- 16) 山本利春, 金久博昭 (1997) 筋力増強と運動学習 - Training specificity の観点から. *理学療法ジャーナル*. 31: 13-20
(平成21年3月2日受付, 平成21年5月15日訂正, 平成21年7月3日受理)