階段昇段における単脚立脚相の時間違いが 運動効率に与える影響

Effects of Differences in Duration of Single-leg Standing on Motor Efficiency in Stair Climbing

吉田 忠義¹⁾ 梁川 和也¹⁾ 藤澤 宏幸¹⁾

TADAYOSHI YOSHIDA, RPT, MS¹⁾, KAZUYA YANAGAWA, RPT, MS¹⁾, HIROYUKI FUJISAWA, RPT, PhD¹⁾

¹⁾ Department of Rehabilitation, Faculty of Medical Science and Welfare, Tohoku Bunka Gakuen University: 6-45-1 Kunimi, Aobaku, Sendai-city, Miyagi 981-8551, Japan. TEL+81 22-233-6113 E-mail: yoshi-t@rehab.tbgu.ac.jp

Rigakuryoho Kagaku 28(4): 501-504, 2013. Submitted Jan. 30, 2013. Accepted Mar. 16, 2013.

ABSTRACT: [Purpose] To determine the effects on motor efficiency (NE) of differences in the duration of single-leg standing during alternate feet and step through in stair climbing. [Subjects] A total of 11 healthy men. [Methods] Subjects climbed stairs using alternate feet or step through at a vertical speed of 3.5 m/min with two durations of single-leg standing: normal ascent, in which the duration naturally matched step frequency, and shortened ascent, in which the duration was shortened while matching the step frequency. For each type of ascent, stair climbing was performed for 3 minutes and NE was calculated by measuring the oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) and heart rate. The paired t-test was performed for $\dot{V}O_2$ and NE during ascent for comparison of the two durations. [Results] $\dot{V}O_2$ was lower during shortened ascent when compared to normal ascent, while NE was higher during shortened ascent when compared to normal ascent. [Conclusion] NE during stair climbing can be improved by shortening the duration of single-leg standing.

Key words: stair climbing, duration of single-leg standing, motor efficiency

要旨:〔目的〕階段昇段における一足一段の単脚立脚相の時間違いが運動効率 (NE) に与える影響を明らかにすることを目的とした。〔対象〕健康成人男性 11 名を対象とした。〔方法〕階段昇段は鉛直方向への速度 3.5 m/min の一足一段として、時間条件を単脚立脚相のステップ頻度に自然に合わせた (普通) と単脚立脚相の時間を短くした昇段 (短縮) の 2 条件とした。各条件での昇段時間は 3 分間で、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) 及び心拍数を測定し、NE を算出した。 $\dot{V}O_2$ と NE に対して、時間条件の比較のために対応のある t 検定を行った。〔結果〕 $\dot{V}O_2$ は短縮が普通よりも低い値を示した。NE は短縮が普通よりも高い値を示した。〔結語〕階段昇段における NE は、単脚立脚相の時間を短縮することにより、改善できることが明らかになった。

キーワード: 階段昇段, 単脚立脚相時間, 運動効率

¹⁾ 東北文化学園大学 医療福祉学部 リハビリテーション学科: 宮城県仙台市青葉区国見 6-45-1 (〒981-8551)
TEL 022-233-6113

I. はじめに

階段昇降動作には、両足を一足ずつ昇段降段させる一足一段と一段ごとに両足を揃えて昇降段させる二足一段がある。特に、昇段動作では降段動作よりも高い運動強度のため^{1,2)}、理学療法において対象者に階段指導を行う場合、慎重を期して指導する必要がある。

これまで、我々は一足一段と二足一段という異なる昇段パターンで速度と運動効率 (net efficiency: NE) の関係から、速度が増すと一足一段と二足一段のNEともに有意に上昇し、遅い速度では一足一段のNEは二足一段よりも低い値を示し、速い速度では二足一段のNEは一足一段よりも低い値を示した³⁾。これは、遅い速度での一足一段の片脚立位姿勢保持といった鉛直方向への重心移動に関与しない筋活動に酸素を多く消費したためと報告した。また、速い速度では二足一段のステップ頻度が一足一段よりも多いため、昇段で降り出される下肢や上肢の動きも多くなるため、重心移動に関与しない仕事が増えたためと報告した。さらに、遅い速度において一足一段の長い片脚立位姿勢保持がNEを低下させているならば、単脚立脚相の時間を短く次の段に接地させる短縮昇段、つまり、片脚立位姿勢保持時間を短くすることで、効率を改善させられる可能性が示唆された。臨床では、低体力者に対して遅い速度にて一足一段の階段昇段を指導する場合がある。そのため、効率の良い一足一段を指導することができれば、身体への負荷も軽減できると考えられる。しかし、我々は階段昇段における遅い速度での一足一段の単脚立脚相の時間違いがNEに与える影響について検証しておらず、確証には至らなかった。

そこで、本研究の目的は階段昇段における遅い速度での一足一段の単脚立脚相の時間とNEの関係を明らかにすることとした。研究は二段階で進め、一足一段で単脚立脚相のステップ頻度に自然に合わせた普通昇段と単脚立脚相の時間を短く次の段に接地させた短縮昇段の単脚遊脚相および立脚相の時間の違いを確認するために研究1を、単脚遊脚相および立脚相の時間が異なる普通昇段と短縮昇段のNEの違いを確認するために研究2を実施した。

II. 対象と方法

1. 研究1

1) 対象

対象は健康成人男性5名で年齢 21.0 ± 1.9 歳、身長 169.7 ± 6.4 cm、体重 68.3 ± 6.0 kgであった。測定に際して、対象者には事前に研究の趣旨や安全性を十分に説明し、書面で同意を得た。また、未成年者に対しては保護者からの同意を得た。

2) 方法

階段は、公共の階段 (段差 17.5 cm, 奥行き 30.0 cm, 23 段/階, 傾斜角 30°) を使用した。測定項目は、一足一段の階段昇段における普通昇段と短縮昇段の2条件の単脚立脚相と遊脚相の時間計測とした。普通昇段は、デジタルメトロノーム (SQ70: セイコー社) の音が鳴ると同時に一側下肢を階段の踏み面から離地し、次の音が鳴るまで単脚立脚相を維持して、次の音が鳴ると同時に次の段に接地させた。短縮昇段は、デジタルメトロノームの音が鳴ると同時に下肢を階段の踏み面から離地してすばやく振り上げて、次の段に接地させ単脚立脚相を短くさせた。鉛直方向への速度 (ステップ頻度) は、著者ら³⁾の研究結果に基づき 3.5 m/min (20 steps/min) とした (式 1)。鉛直方向への速度 (ステップ頻度) の算出式は (1) に示す。すべての条件において、指定された速度で昇段が可能となるように、対象者にはデジタルメトロノームのリズム信号に合わせて左右の足底を階段の踏み面に接地するという昇段方法を指示した。普通昇段と短縮昇段は、昇段中の単脚立脚相の時間は異なるように規定しているが、鉛直方向への昇段速度は同一のため時間内の昇段数に違いはない。また、昇段時、階段の手すりの使用は禁止した。なお、それらの昇段方法は測定前にデモンストレーションを取り入れながら説明し、理解が十分に得られるまで練習した。

鉛直方法の速度 (m/min) =

$$\text{ステップ頻度 (steps/min)} \times 17.5 (\text{cm}) / 100 \cdots \cdots (1)$$

立脚時間を計測するためにフットスイッチ (PH-450a, DK 社) を左右足底面の前後2箇所 (前部: 第二中足骨底、後部: 足底面における踵骨隆起) に貼付した。フットスイッチがONになっている間を立脚相、フットスイッチがOFFになっている間を遊脚相とした。フットスイッチのデータは、AD変換器 (PowerLab, ADInstruments) を通してサンプリング周波数 1 kHz にてパーソナルコンピュータに取り込み、MATLAB (The Math Works) による自作プログラムを用いて解析した。

統計解析は、普通昇段と短縮昇段の単脚遊脚相および立脚相の時間の違いについて、対応のあるt検定を施行した。なお、統計処理ソフトウェアはSPSS 13.0 Jを使用し、有意水準は5%未満とした。

2. 研究2

1) 対象

対象は健康成人男性11名で年齢 23.3 ± 2.7 歳、身長 169.9 ± 3.6 cm、体重 65.6 ± 6.0 kgであった。測定に際して、対象者には事前に研究の趣旨や安全性を十分に説明し、書面で同意を得た。さらに、対象者には健康状態に関する問診および安静時の血圧測定を行った上で、測定当日の体調が良好であることを確認した。また、交感神経活動の増加を招来し基礎活動に影響することを避け

るために、測定前2時間以内には食事などによる糖分の摂取、カフェインやアルコール類等の刺激物摂取、喫煙、激しい運動を行わないように事前に指示した。なお、水分摂取は基本的には事前に禁止したが、口渇時については禁止していない。

2) 方法

測定に用いた階段と昇段条件は研究1と同様に、公共の階段（段差17.5 cm, 奥行き30.0 cm, 23段/階, 傾斜角30°）で鉛直方向への速度が3.5 m/minの普通昇段と短縮昇段の2条件とした。昇段は、一人の被験者が2条件を意思や主観が反映されないように実施するため、昇段条件を記載したくじを引かせ無作為に抽出した。そして、それぞれの測定条件で3分間の昇段を行った。昇段時間の決定については予備研究を実施し、2分目以降の酸素摂取量（oxygen uptake: $\dot{V}O_2$ ）が定常状態になることを確認した。

測定項目は、安静時と昇段中の $\dot{V}O_2$ および心拍数（heart rate: HR）とした。 $\dot{V}O_2$ の測定には携帯型酸素消費量計エアロソニック（AT-1100: アニマ社）を、HRの測定にはポラール心拍計（S610i: キャノントレーディング社）、さらに、昇段時にリズム信号音を与えるためにデジタルメトロノーム（SQ70: セイコー社）を用いた。

はじめに、被験者に昇段条件は研究1と同様の一足一段の普通昇段と短縮昇段の2条件で、測定時間は1条件につき安静5分、昇段3分で指定された速度で昇段することを説明した。また、研究1と同様すべての条件において、指定された速度で昇段が可能となるように、対象者には電子メトロノームのリズム信号に合わせて左右の足底を階段の踏み面に接地するという昇段方法を指示した。さらに、階段の踊り場でも指定された同じリズムで、3歩で進むことを伝えた。なお、昇段時、階段の手すりの使用は禁止した。そして、それらの昇段方法は測定前にデモンストレーションを取り入れながら説明し、理解が十分に得られるまで練習した。その後、ポラール心拍計、マスク、携帯型酸素消費量計エアロソニックを装着し、その状態で体重を測定した。昇段の順番は研究1と同様に、昇段条件を記載したくじを引かせ無作為に抽出し、1回の測定は2条件の実施とした。安静の確保には、背もたれ椅子にもたれて座位をとることとして、携帯型酸素消費量計エアロソニックのモニター上で $\dot{V}O_2$ とHRの値が安静状態に戻ることを確認した。昇段中、測定者は電子メトロノームを持ち、被験者にリズム音を聞かせながら同行した。

$\dot{V}O_2$ の代表値は安静時、昇段時ともに最終1分間の平均値とした。一方、昇段時のNEはGaesserら⁴⁻⁶⁾の方法に準じ、機械的仕事を昇段時の消費エネルギーで除して百分率として算出した。HRの代表値は、 $\dot{V}O_2$ と同様に最終1分間の平均値とした。

統計解析は、昇段時の $\dot{V}O_2$ とNEおよびHRに対して、単脚立脚相の時間条件である普通昇段と短縮昇段の比較のために対応のあるt検定を用いた。なお、統計処理ソフトウェアはSPSS 13.0 Jを使用し、有意水準は5%未満とした。

III. 結 果

1) 研究1

普通昇段と短縮昇段における左右それぞれの立脚時間、遊脚時間および両脚時間の平均値と標準偏差を表1に示す。短縮昇段の単脚遊脚相の時間は左右ともに普通昇段よりも有意に短く、短縮昇段の単脚立脚相の時間は左右ともに普通昇段よりも有意に長い値を示した。

2) 研究2

普通昇段と短縮昇段における $\dot{V}O_2$ 、NE、HRの平均値と標準偏差を表2に示す。階段昇段の普通昇段と短縮昇段の $\dot{V}O_2$ を比較した結果、短縮昇段は普通昇段よりも有意に低い値を示した。普通昇段と短縮昇段のNEの比較では、短縮昇段は普通昇段よりも有意に高い値を示した。普通昇段と短縮昇段のHRの比較では、短縮昇段は普通昇段よりも有意に低い値を示した。

IV. 考 察

本研究の結果から、研究1では階段昇段における3.5 m/minという遅い速度での一足一段の短縮昇段の単脚遊脚相時間は短く、単脚立脚相時間は長い値を示した。これにより、短縮昇段の片脚立位保持時間は短いことが

表1 普通昇段と短縮昇段における左右の立脚時間と遊脚時間および両脚時間

	普通昇段	短縮昇段
左立脚時間 (ms)	3454 ± 327 **	5479 ± 119
左遊脚時間 (ms)	2548 ± 269 **	498 ± 85
右立脚時間 (ms)	3609 ± 253 **	5600 ± 219
右遊脚時間 (ms)	2342 ± 259 **	406 ± 187
両脚時間 (ms)	556 ± 226 **	2537 ± 158

2群の比較で有意差あり。**: p<0.01.

表2 普通昇段と短縮昇段における各速度と $\dot{V}O_2$ 、HR、NE

	普通昇段	短縮昇段
$\dot{V}O_2$ (ml/kg/min)	12.4 ± 1.5 *	11.4 ± 1.8
HR (beats/min)	100.6 ± 13.9 **	94.6 ± 14.1
NE (%)	19.5 ± 3.9 **	23.5 ± 6.3

2群の比較で有意差あり。*: p<0.05, **: p<0.01.

立証され、研究2の一足一段における単脚立脚相の時間の違いがNEに与える影響を検討するに至った。そして、研究2の結果から一足一段の単脚立脚相の時間を短縮した短縮昇段のほうが普通昇段よりもNEは高い値を示した。3.5 m/minという遅い速度での動作遂行において姿勢保持に消費したエネルギー、すなわち、片脚立位姿勢保持といった重心移動に関与しない筋活動に酸素を多く消費したためNEに影響を与えたと考えられる。

動作は筋活動をとらない、それは化学的エネルギーを物理的エネルギーへ変換して行われる。この時、消費したエネルギーによって得られた有効な仕事量の割合を効率と呼ぶ^{7,8)}。本研究では、Gaesserら⁴⁻⁶⁾の方法に準じてNEを求めた。その結果、3.5 m/minといった遅い速度での普通昇段と短縮昇段のNEは、単脚立脚相の時間を短縮した短縮昇段のほうが普通昇段よりも有意に高い値を示し、 $\dot{V}O_2$ は短縮昇段のほうが普通昇段よりも有意に低い値を示した。これは、普通昇段はステップ頻度に自然に合わせたリズムで昇段するため、短縮よりも片脚立位姿勢保持（一側下肢を挙上し空間保持しながら、もう一側下肢で単脚立脚をする）を要求される。そのため、普通昇段は短縮昇段よりも片脚立位姿勢保持といった重心移動に関与しない筋活動に酸素を多く消費したため、NEは短縮昇段よりも低くなったと考えられる。一方、短縮昇段はステップ頻度に合わせながら単脚立脚相の時間を短く昇段するため、普通昇段よりも両脚立脚の時間が長くなりNEが高くなったと考えられる。速度の遅い動作でのエネルギー消費について、仕事に直接的に費やすエネルギーは減少するが、姿勢保持などの仕事に伴うエネルギー消費は多くなると報告されている⁷⁾。したがって、遅い速度での階段昇段におけるNEには、片脚立位姿勢保持への酸素消費が関係し、単脚立脚相の時間を短縮することにより、身体運動の効率は20～30%^{7,8)}とされる中で、効率を4%も改善できることが明らかになった。

本研究は健康成人男性の結果ではあるが、結果をエネルギー効率の観点から考えると階段昇段において、単脚立脚相の時間を短縮する指導は対象者の身体負担を軽減する介入方法として有効であると考えられる。臨床では低体力者が多いことから、我々は遅い速度で階段昇段指導を行うことが多い。今後、低体力者を対象に介入の有効性を立証していく必要がある。しかし、低体力者は階段に設置された手すりを使用して階段昇段する場合もある。そのため、手すりを使用した遅い速度での一足一段昇段および単脚立脚相の時間違いがNEに与える影響といった検討を段階的に研究を進めていく考えである。

引用文献

- 1) Richardson M: Physiological responses and energy expenditures of women using stairs of three designs. *J Appl Physiol*, 1966, 21(3): 1078-1082.
- 2) 丹羽文隆, 大道 等: 階段の上り下りをするときのエネルギー消費量を心拍数から推定する. *ウォーキング研究*, 2000, (2): 73-78.
- 3) 吉田忠義, 梁川和也, 半谷泰章・他: 階段昇降における動作パターンが酸素摂取量および運動効率に与える影響. *理学療法科学*, 2011, 26(3): 759-762.
- 4) Gaesser GA, Brooks GA: Muscular efficiency during steady-rate exercise: Effect of speed and work rate. *J Appl Physiol*, 1975, 38: 1132-1139.
- 5) 金子公宥: 筋作業の機械的効率. *体育の科学*, 1978, 29: 751-758.
- 6) Shiomi T: Effects of different patterns of stairclimbing on physiological cost and motor efficiency. *J Human Ergol*, 1994, 23: 111-120.
- 7) 中村隆一, 斎藤 宏, 長崎 宏: 基礎運動学 (第6版). 医業出版, 東京, 2003, pp198-201.
- 8) 藤澤宏幸: 日常生活活動の分析—身体運動学のアプローチ—. 医業出版, 東京, 2012, pp21-26.