

健常若年成人男性におけるチルトテーブルを用いた部分荷重スクワットの生理学的応答 -傾斜角度に応じた酸素消費量と換気応答-

平野 正広, 中村 浩

了徳寺大学・健康科学部理学療法学科

要旨

本研究の目的は、チルトテーブルを用いた部分荷重スクワット (partial weight-bearing squat: PWS) における心肺機能への負荷が低減される程度について、全荷重スクワット (full weight-bearing squat: FWS) と比較して数量的基準を得ることにより、有用性を検討することであった。健常若年成人男性20名を対象に、換気性作業閾値 (ventilatory threshold: VT) を決定後、チルトテーブル (傾斜角度: 30°, 60°, 90°) を用いて3種類のスクワット (30° PWS, 60° PWS, FWS) における換気諸量および心拍数を計測し比較した。スクワットはランダムに各100回 (20回/分) 5分間実施した。スクワットにおける酸素消費量 (oxygen consumption: $\dot{V}O_2$) は、VTよりも有意な差を認め、低値であった。PWSの $\dot{V}O_2$ はFWSに比べて60°傾斜位で11.3%、30°傾斜位で26.9%低減された。 $\dot{V}O_2$ 、分時換気量、心拍数は、FWS、60° PWS、30° PWSの順に有意な差を認め、低かった。呼吸数は、有意な差を認めず、傾斜角度の増大に伴い一回換気量が増大する換気応答を示した。PWSは、低い運動強度であり、傾斜角度増大による換気の利点に基づいた段階的かつ漸進的な運動介入手段となる可能性を有すると考えられた。

キーワード: 部分荷重スクワット, スクワット, チルトテーブル, 酸素消費量, 換気応答

Physiological response during repetitive partial weight-bearing squats using a tilt table in healthy male adults - Oxygen consumption and ventilatory response with changes in tilt angle -

Masahiro Hirano, Hiroshi Nakamura

Department of Physical Therapy, Faculty of Health Sciences, Ryotokuji University

Abstract

The purpose of this study was to examine the feasibility of partial weight-bearing squat (PWS) using the tilt table that quantitative criteria to reduce the load on the cardiopulmonary function of PWS by comparing with the full weight-bearing squat (FWS). 20-healthy adult male participated and performed repetitive squats on the tilt table at three angles (at a 30° tilt: 30°PWS, at a 60° tilt: 60°PWS, at a 90° tilt: FWS) after determining the ventilatory threshold (VT). The order of squats was performed randomly and for five minutes 100 times (at a rate of 20squats/minute). The oxygen consumption ($\dot{V}O_2$) during squats was significantly lower than that at the VT. The $\dot{V}O_2$ of PWS was observed 11.3% lower at 60° PWS and 26.9% lower at 30° PWS than $\dot{V}O_2$ from FWS. The $\dot{V}O_2$, minute ventilation, and heart rate were significantly decreased in order of FWS, 60°PWS, 30°PWS. No significant difference was observed the respiratory rate. As a result, the squats showed a ventilatory response in which the tidal volume increased as the tilt angle increased. PWS has lower exercise intensity. Therefore, the results suggested that the PWS

has applicability as an exercise intervention means to adjust the load phased and progressive based on the advantage of ventilation with the increase of the tilt table angles.

Keywords: partial weight-bearing squat, squat, tilt table, oxygen consumption, ventilatory response

I. 背景

病気または怪我からの回復に必要な不活動な期間が長くなると、無気肺、全身性炎症、無気力感¹⁾、起立性低血圧²⁾、静脈血栓症³⁾、総エネルギー消費量の減少⁴⁾、抗重力筋の不使用による筋の構造と機能の悪化⁵⁾を生じる。また、長期安静は最大酸素摂取量の低下に影響する^{6,7)}。そのため、合併症に対する予防的介入が必要となる。また、集中治療室での重症傷病者に対する早期介入によるリハビリテーションは、機能状態をより早く快復するのに役立つことが示されている^{8,9)}。このように、不要な不活動による合併症を予防し、障害を可及的に小さくするための早期の離床と運動が重要となる。

早期の運動介入方法としては、ベルト電極式骨格筋電気刺激法 (belt electrode-skeletal muscle electrical stimulation: B-SES) や^{10,11)}、仰臥位駆動型エルゴメータ運動がある^{9,12)}。また、荷重管理を行いながら全身持久力の向上が期待できる反重力トレッドミル (または空気圧式免荷トレッドミル) や¹³⁾、吊り下げ式免荷装置を用いたトレッドミル歩行 (body weight supported treadmill training: BWSTT) がある^{16,17)}。B-SESや仰臥位駆動型エルゴメータは仰臥位管理下での利用においても有用であるが、抗重力下での全身運動とは異なる。また、トレッドミルは大型であるため可搬性が低く、抗重力姿勢を維持することが自助または介助可能な範囲であることなど、適応条件が課題となる。このように、種々の介入方略が挙げられるが、臨床において、歩行運動へ円滑に移行出来ないことやベッド上管理が中心となり離床が困難であること、荷重管理を要する場合も想定される。そのため、通常の平面立位で生じる負荷の軽減を図りつつ、抗重力活動により近い段階的で漸進的な介入方法も必要とされる。

リハビリテーションにおいて、チルトテーブルは可搬性を有しており、傾斜角度の変化を応用した治療に用いられる。また、集中治療室をはじめとした医療施設や介護施設には傾斜機能付きの多機能ベッドがあることから、荷重管理をしつつ筋力および全身持久力向上を目的とした場合の介入方法として、傾斜肢位に着眼し、立位運動負荷方法であるスクワット運動に着目した。スクワットは、閉鎖的運動連鎖であり、筋活動を得るためだけでなく、カロリー消費を増加させ、体組成に効果を与える介入として一般的に用いられる。運動介入には低負荷から導入することが望ましいため、可搬性を有し、傾斜角度を調節することで段階的に運動設定が可能なチルトテーブルを用いることとした。これらより、運動介入の方法としてチルトテーブル上での立位運動負荷である部分荷重スクワット (partial weight-bearing squat: PWS) が選択肢になりえると着想した。

これまで、傾斜肢位における安静または呼気抵抗負荷時の傾斜角度変化に対する換気応答が検討されており、換気メカニズムの相違について報告されている¹⁸⁻²¹⁾。また、傾斜肢位の角度が60°未満の場合、急な角度よりも血行動態の影響が少なくなることが報告されている²²⁾。スクワット中の骨格筋の特性においては、求心性よりも遠心性抵抗運動中の換気応答は小さいことが明らかとなっている²³⁾。PWSに関しては、段階的なスクワットを実施するために傾斜調整可能なベッドの利用や²⁴⁾、下肢に損傷を有する患者に対する傾斜したスライディングボードを用いた片脚スクワットと下肢パフォーマンス関係の報告がある²⁵⁾。血中乳酸値や心肺と代謝機能の検討について、ハーフスクワットの報告があるが²⁶⁾、チルトテーブルを用いた傾斜肢位におけるPWSの生理学的応答については検討の余地がある。チルトテーブルを用いた

PWSを介入における運動方法の選択肢とするためには、傾斜肢位におけるPWSの特徴および健常者の生理学的応答を理解しておくことが必要となる。また、漸進的介入を想定するにあたり、各傾斜肢位が全荷重でのスクワット (full weight-bearing squat: FWS) に比してどの程度の運動強度であるか明らかにする必要がある。そこで、本研究では立位運動における心肺機能への負荷を低減する方法としてPWSの生理学的応答について調査することとした。

本研究では、酸素消費量 (oxygen consumption: $\dot{V}O_2$) を運動強度の指標とし、換気性作業閾値 (ventilatory threshold: VT) とFWSおよびPWSの $\dot{V}O_2$ を比較した後、FWSを基準としたPWSの負荷量が低減される程度について検討した。また、PWSの特徴として、傾斜角度の違いが換気のみカニズムに与える影響に焦点を当てて検討することとした。これらは、PWSにおける生体反応の理解に役立ち、リハビリテーションの介入手段を増やすことに寄与する可能性を有する。

II. 目的

本研究の目的は、チルトテーブルを用いたPWSにおける心肺機能への負荷が低減される程度について、FWSと比較して数量的基準を得ることにより、有用性を検討することである。そのため、FWSとPWSの運動強度をVTと比較して明らかにすること、FWSを基準としたPWSの $\dot{V}O_2$ が低減される程度を明らかにすること、PWSにおける傾斜角度が換気のみカニズムに与える影響を検討することの3つにより構成した。

III. 方法

対象は、理学療法学科在学中の健常若年成人男性20名 (年齢: 21-23歳, 身長: 171.6 ± 5.7 cm, 体重: 66.5 ± 8.9 kg, Body mass index: 19.4 ± 2.4 kg/m²) であった。

傾斜肢位におけるPWSは、電動昇降式チルトテーブル (OG技研株式会社製, UA-501-S2) を用いて実施した。予備実験では、傾斜角度が30°, 60°, 90°に設定されたチルトテーブルを用いたスクワット中の $\dot{V}O_2$ がVTを下回ることを確認した。そのため、参加者に対し、症候性限界またはVTに到達するまで心肺運動負荷試験を実施した後、スクワット動作時の換気諸量および心拍数を測定することとした。運動負荷試験およびスクワット運動は、参加者に2時間前からの飲食および激しい労作を控えさせ、実施した。リスク管理は、運動負荷試験の中止基準としてAmerican College of Cardiology/American Heart Association (ACC/AHA) 2002guidelineに準拠した²⁷⁾。

VTの測定は、自転車エルゴメータ (COMBI. WELLNESS 社製, エアロバイク 75XL II), 呼気ガス分析装置 (ミナト医科社製, AE-300SRC) にてBreath-by-breath法を用いて換気諸量を計測した。また、CM5誘導にて心電図 (日本光電社製, BSM7201) を監視し、最大下運動負荷試験を実施した。運動負荷は、Rump負荷 (20W/min) を用いて計測し、回転速度を50~60 RPMとした。測定項目は、 $\dot{V}O_2$ [mL/kg/min], 分時換気量 (minute ventilation: $\dot{V}E$ [L/min/kg]), 呼吸数 (respiration rate : RR [frequency/min]), と心拍数 (heart rate: HR [beats/min]) とした。VTは、理学療法学科教員2名によってV-slope法を用いて決定した²⁸⁾。

スクワットの生理学的指標の計測は、VT測定後、端座位にて、3分以上の十分な休憩後に始めた。スクワットの方法は、傾斜角度90°におけるFWS, 傾斜角度が60°, 30°における60° PWS, 30° PWSの3種類とした。スクワットは、足を肩幅に合わせた状態とし、膝関節最大屈曲時に膝蓋骨がつま先より前方へ越えないようにした。VT測定と同様の機器を用いて、 $\dot{V}O_2$, $\dot{V}E$, RR, HRを計測した。測定姿勢で3分間

の安静後、20回/分の速度で100回のスクワットを5分間実施した。スクワットは、摩擦抵抗を減らすために、チルトテーブルと参加者の間にポリエチレンシートを挿入して実施した。検者は、口頭指示をすることによって一定のリズムを確保した。各スクワットの計測後は、端坐位で3分間以上安静とした。そして、参加者の各測定項目が安静状態に戻ったことを確認した後、3つの種類のスクワットをランダムに実施した。本研究におけるスクワット方法を図1に示す。

統計学的処理は、R2.8.1を使用した。分析には、スクワット運動における最後の2分間の平均値を用いた。 $\dot{V}E$ は体重補正をした。FWSとPWSの運動強度はVTにおける $\dot{V}O_2$ とFWSおよびPWSの $\dot{V}O_2$ について、FWSを基準としたPWSの $\dot{V}O_2$ が低減される程度は $\dot{V}O_2$ について、Shapiro-Wilk検定で正規性を確認後、Mauchlyの球形検定で球面性の仮定について確認し、Greenhouse-Geisserの ϵ 修正による対応のある一元配置分散分析を行った。分散分析で有意な差を認め、主効果が認められた場合にShaffer法で多重比較検定を実施した。また、FWS時の $\dot{V}O_2$ を正規化し、FWSに対する60° PWSおよび30° PWSの $\dot{V}O_2$ の割合を算出した。PWSにおける傾斜角度が換気メカニズムに与える影響は、FWS、PWS時の生理学的指標について、正規性、球面性の仮定について確認し、Greenhouse-Geisserの ϵ 修正による対応のある一元配置分散分析を行った。分散分析で有意な差を認め、主効果が認められた場合にShaffer法で多重比較検定を実施した。なお、有意水準はすべて1%とした。



図1. スクワット方法

a. FWS (full weight-bearing squat at a tilt 90°) : 全荷重スクワット, b. 60° PWS (partial weight-bearing squat at a tilt 60°) : 60度部分荷重スクワット, c. 30° PWS (partial weight-bearing squat at a tilt 30°) : 30度部分荷重スクワット

IV. 倫理的配慮

本研究は、了徳寺大学の生命倫理審査委員会（承認番号：2634）によって承認され、ヘルシンキ宣言に従って実施した。参加者へは、事前に研究の目的と方法について十分な説明を実施し、研究に参加するための書面による同意を得た。また、個人情報保護を遵守した。

V. 結果

スクワット（FWS、PWS）における生理学的応答の結果を表1に示す。

FWSとPWSの運動強度について、VTにおける平均 $\dot{V}O_2$ は 18.32 ± 2.98 mL/kg/minであった。VTと各傾斜角度によるスクワット運動における $\dot{V}O_2$ の比較において、主効果を認めた($F(1.24, 23.26)=210.70$,

$p<0.001$, $\eta^2=0.87$). 多重比較の結果, VT と FWS の間に有意な差を認め, VT の値が高かった($t(19)=12.76$, $d=4.00$, $p<0.001$). VT と 60° PWS の間に有意な差を認め, VT の値が高かった($t(19)=14.32$, $d=4.69$, $p<0.001$). VT と 30° PWS の間に有意な差を認め, VT の値が高かった($t(19)=18.23$, $d=5.29$, $p<0.001$).

FWS を基準とした PWS の $\dot{V}O_2$ が低減される程度について, $\dot{V}O_2$ は, スクワット運動における傾斜角度の比較において主効果を認めた ($F(2, 38)=59.47$, $p<0.001$, $\eta^2=0.39$). 多重比較の結果, FWS と 60° PWS の間に有意な差を認め, FWS の値が高かった ($t(19)=5.60$, $d=0.80$, $p<0.001$). FWS と 30° PWS の間に有意な差を認め, FWS の値が高かった ($t(19)=9.42$, $d=1.81$, $p<0.001$). FWS に対する PWS の $\dot{V}O_2$ の割合は, 60° PWS が $88.7 \pm 8.8\%$, 30° PWS が $73.1 \pm 10.8\%$ であった.

PWS における傾斜角度が換気のマカニズムに与える影響について, $\dot{V}O_2$ は, FWS を基準とした PWS の $\dot{V}O_2$ の低減される程度についての結果と同様であり, 60° PWS と 30° PWS の間に有意な差を認め, 60° PWS の値が高かった ($t(19)=6.29$, $d=1.22$, $p<0.001$). VE は, スクワット運動における傾斜角度の比較において主効果を認めた ($F(2, 38)=44.24$, $p<0.001$, $\eta^2=0.28$). 多重比較の結果, FWS と 60° PWS の間に有意な差を認め, FWS の値が高かった ($t(19)=4.27$, $d=0.53$, $p<0.001$). FWS と 30° PWS の間に有意な差を認め, FWS の値が高かった ($t(19)=8.17$, $d=1.42$, $p<0.001$). 60° PWS と 30° PWS の間に有意な差を認め, 60° PWS の値が高かった ($t(19)=5.73$, $d=1.02$, $p<0.001$). RR は, スクワット運動における傾斜角度の比較において主効果を認めなかった ($F(2, 38)=0.33$, $p=0.716$, $\eta^2=0.01$). HR は, スクワット運動における傾斜角度の比較において主効果を認めた ($F(1.62, 30.75)=87.07$, $p<0.001$, $\eta^2=0.15$). 多重比較の結果, FWS と 60° PWS の間に有意な差を認め, FWS の値が高かった ($t(19)=5.37$, $d=0.32$, $p<0.001$). FWS と 30° PWS の間に有意な差を認め, FWS の値が高かった ($t(19)=10.69$, $d=0.98$, $p<0.001$). 60° PWS と 30° PWS の間に有意な差を認め, 60° PWS の値が高かった ($t(19)=9.21$, $d=0.70$, $p<0.001$).

表 1. スクワットにおける生理学的応答 (n=20)

	FWS	60°PWS	30°PWS
$\dot{V}O_2$ (ml/kg/min)	$8.84 \pm 1.54^{*\dagger}$	$7.77 \pm 1.11^\dagger$	6.40 ± 1.13
$\dot{V}E$ (L/min/kg)	$0.27 \pm 0.04^{*\dagger}$	$0.25 \pm 0.03^\dagger$	0.22 ± 0.03
RR (frequency/min)	19.4 ± 2.6	19.7 ± 2.4	19.9 ± 2.5
HR (beats/min)	$96.3 \pm 15.8^{*\dagger}$	$91.6 \pm 13.8^\dagger$	82.2 ± 12.9

mean \pm SD, FWS (Full weight-bearing squat): 全荷重スクワット, PWS (Partial weight-bearing squat): 部分荷重スクワット, $\dot{V}O_2$ (oxygen consumption): 酸素消費量, $\dot{V}E$ (minute ventilation): 分時換気量, RR (respiration rate): 呼吸数, HR (heart rate): 心拍数, *: vs 60°PWS, $p<0.001$, †: vs 30°PWS, $p<0.001$.

VI. 考察

本研究は, 異なる傾斜角度におけるスクワット中の生理学的応答を評価し, 比較検討した. FWS と PWS における $\dot{V}O_2$ が, 自転車エルゴメータを用いた運動負荷試験から得た VT の $\dot{V}O_2$ よりも低値であった. FWS に対する PWS の $\dot{V}O_2$ の割合が, 60° PWS で $88.7 \pm 8.8\%$, 30° PWS で $73.1 \pm 10.8\%$ であった. $\dot{V}O_2$, $\dot{V}E$ と HR は有意な差を認め, FWS, 60° PWS, 30° PWS の順に高値であり, RR は有意な差を認めなかった. これらより, 本研究におけるチルトテーブルを用いた PWS は, $\dot{V}O_2$ が VT よりも低値な低い運動強度であった. $\dot{V}O_2$ は FWS よりも低く, チルトテーブルの傾斜角度の増大にしたがって一回換気量を増大させる換気応答を呈した.

FWSとPWSの運動強度について、PWSの $\dot{V}O_2$ はVTよりも低く、FWSよりも低かった。また、FWSも3METs未満の軽度な運動強度であった。FWSを基準としたPWSの $\dot{V}O_2$ が低減される程度について、FWSに対するPWSの $\dot{V}O_2$ は、60° PWSが $88.7 \pm 8.8\%$ 、30° PWSが $73.1 \pm 10.8\%$ であった。つまり、PWSはFWSに比べてそれぞれ11.3%、26.9% $\dot{V}O_2$ が低減された運動であり、30° PWSが60° PWSの $\dot{V}O_2$ よりも15.6%低減された割合が大きかった。一般に、60° 傾斜位での荷重負荷は体重の86.6%となるが、60° PWSのFWSに対する $\dot{V}O_2$ は88.7%であった。一方、30° 傾斜位での荷重負荷は体重の半分になるが、30° PWSのFWSに対する $\dot{V}O_2$ は73.1%であり、30° PWSの $\dot{V}O_2$ が低減する割合は26.9%と小さかった。そのため、30° PWSの $\dot{V}O_2$ は60° PWSよりも下肢への荷重負荷とは異なり、心肺機能への負荷が大きくなることが示された。

PWSにおける傾斜角度が換気のメカニズムに与える影響について、姿勢または傾斜角度変化に伴う換気応答に関して、De Troyer¹⁸⁾は、腹部筋群の活動を45度ヘッドダウン、背臥位、45度ヘッドアップ、立位の4つの姿勢で健康成人を対象に検討し、姿勢保持のための筋活動が立位で最も高く、腹壁に腹部臓器が影響し、姿勢変化に伴う腹部の筋活動によって呼気終末肺容積が変化することを報告した。Barrettら¹⁹⁾は、呼気抵抗負荷下におけるベッドアップ時の呼吸パターンと腹部筋群の活動について検討し、背臥位、60度、90度ヘッドアップでの換気応答（一回換気量）は、呼気抵抗負荷によって有意に増大することなく、体位の影響を受けなかったことを報告した。Strohlら²⁰⁾は、腹部の筋活動は背臥位よりも立位が高く、特に下腹部の筋活動が上腹部の筋活動よりも高かったこと、呼気時には上腹部の筋活動が増大することを報告した。Abeら²¹⁾は、背臥位から立位へ姿勢を変化すると腹横筋が最も活動し、内腹斜筋と外腹斜筋活動が減少、腹直筋の筋活動が維持することを確認し、腹部筋群は呼気に活動することによって呼気終末肺容積を減少させ、横隔膜を伸張させることによって横隔膜の発生圧を増大する機構が存在することを報告した。これらより、背臥位から立位への姿勢変化は、腹部臓器が重力にしたがって移動することによって換気力学の変化を伴うことを示唆している。そのため、姿勢変化によって呼吸筋群の筋活動量の配分が調整され、姿勢保持や換気に対する役割の関与度が変化することで換気量が増加していると考えられた。本研究は、スクワット運動中の生理学的応答について傾斜角度を要因として検討した。抗重力位になるにしたがって $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}E$ 、HRが有意な増加を示し、RRは有意な差を認めず、安定していた。この結果は、姿勢変化に加えてスクワット運動を負荷した状況においても姿勢が換気に与える影響と同様な換気応答であったと考えられた。また、傾斜角度が増大することによって $\dot{V}E$ が増大しRRが一定であったことは、一回換気量が増大したことを示している。運動方法は同一であるものの、傾斜角度の増大によって、心肺機能への負荷量は大きくなる。そのため、一回換気量の増大は、姿勢変化に伴う換気力学の違いが基盤にあり、PWSの運動強度がVTよりも低く、3METsよりも低い運動であったため、呼吸補助筋群の動員を多く伴わず、各肢位において横隔膜を主とした呼吸筋群の換気予備力で対応することが可能であったために観察されたと考えられた。傾斜角度の変化に対する換気応答は、換気量および換気パターンが変化したことを示している。そのため、換気パターンの監視は、傾斜角度による換気力学の変化を伴うPWSの生理学的応答を捉える指標になると考えられた。また、傾斜肢位におけるPWSを実施する際の運動負荷量の調整には、運動中の呼吸困難感と下肢疲労感を評価することに加えて、肺泡換気量を推察するために呼吸のパターン、深さと速さ、呼吸数をモニタリングして捉える必要性が考えられた。

以上より、PWSにおける $\dot{V}O_2$ は、VTの $\dot{V}O_2$ よりも低く、軽度な運動強度であったこと、FWSと比したPWSの $\dot{V}O_2$ が低減される数量的基準が得られたことは、チルトテーブルの傾斜角度を段階的に調節し、心肺への負荷量を考慮した運動処方に役立つと考えられた。また、換気に対する傾斜角度の影響を加味して

設定することや、PWS中は換気の監視を実施し対象者の反応を捉えることが重要と考えられた。

研究の限界として、荷重量やスクワット運動時の反力、45度傾斜位など異なる傾斜角度における検討をしていないことが挙げられる。また、ヘッドアップ傾斜角度における心拍出量や交感神経活性などの応答や骨格筋の代謝についての側面は明らかでない。そのため、血圧、筋電図や筋血流などの評価項目の追加を要する。今後の課題は、傾斜角度の設定を増やし、体格別、性差についてさらに精査することが挙げられ、PWSの有用性に関する検討を重ねていくことが必要である。

Ⅶ. 結論

本研究の目的は、チルトテーブルを用いたPWSにおける心肺機能への負荷が低減される程度について、FWSと比較して数量的基準を得ることにより、有用性を検討することであった。健常若年男性における100回（20回/分）のスクワットにおける $\dot{V}O_2$ は、VTよりも低値であり、3METs未満の運動強度であった。60°および30° PWS の $\dot{V}O_2$ は、それぞれFWSよりも11.3%、26.9%低減されることが示された。また、傾斜角度の増大に伴い一回換気量が増大する換気応答を示した。PWSにおける $\dot{V}O_2$ はVTよりも低値であり、低い運動強度であった。PWSは、傾斜角度の変化に伴う換気力学の違いによる利点があることを踏まえて、負荷量を段階的に調節して用いる運動介入手段として応用できる可能性があると考えられた。

利益相反

本研究における利益相反は存在しない。

謝辞

本研究にご協力していただきました学生の皆様に深謝申し上げます。

文献

- 1) Dietrich JE, Whedon GD (1948) Effects of immobilization upon various metabolic and physiologic functions of normal men. *Am J Med.* 4, 3-36.
- 2) Convertino VA (1996) Clinical aspect of the control of plasma volume at microgravity and during return to one gravity. *Med. Sci. Sports Exerc.* 28, S45-S52.
- 3) Dittmer DK, Teasell R (1993) Complication of immobilization and bed rest. *Can Fam Physician.* 39, 1428-1437.
- 4) Stuempfle KJ, Drury DG (2007) The physiological consequences of bed rest. *J Exerc Physiol.* 10 (3), 32-41.
- 5) Krasnoff J, Painter P (1999) The physiological consequences of bed rest and inactivity. *Adv Ren Replace Ther.* 6(2), 124-132.
- 6) Convertino VA, Goldwater D, Sandler H (1984) VO_2 kinetic of constant-load exercise following bed-rest-induced deconditioning. *J. Appl. Physiol.* 57, 1545-1550.
- 7) Convertino VA (1997) Cardiovascular consequences of bed rest: effects on maximal oxygen uptake. *Med. Sci. Sports Exerc.* 29, 191-196.
- 8) Morris PE, Goad A, Thompson C et al (2008) Early intensive care unit mobility therapy in the

treatment of acute respiratory failure. *Crit Care Med.* 36(8), 2238-2243.

- 9) Burtin C, Clerckx B, Robbeets C et al (2009) Early exercise in critically ill patients enhances short-term functional recovery. *Crit Care Med.* 37(9), 2499-2505.
- 10) Miyamoto T, Kamada H, Tamaki A et al (2016) Low-intensity electrical muscle stimulation induces significant increases in muscle strength and cardiorespiratory fitness. *Eur J Sport Sci.* 16(8), 1104-1110.
- 11) Nakamura K, Kihata A, Naraba H et al (2019) Efficacy of belt electrode skeletal muscle electrical stimulation on reducing the rate of muscle volume loss in critically ill patients: A randomized controlled trial. *J Rehabil Med.* 51(9), 705-711.
- 12) Miura M, Yoshizawa R, Oowada, S et al (2017) Training with an Electric Exercise Bike versus a Conventional Exercise Bike during Hemodialysis for Patients with End-stage Renal Disease: A Randomized Clinical Trial. *Progress in Rehabilitation Medicine.* 2, 20170008.
- 13) Cutuk AI, Groppo ER, Quigley EJ et al (1985) Ambulation in simulated fractional gravity using lower body positive pressure: cardiovascular safety and gait analyses. *J Appl Physiol.* 101(3), 771-777.
- 14) Saxena A, Granot A (2011) Use of an anti-gravity treadmill in the rehabilitation of the operated achilles tendon: a pilot study. *J Foot Ankle Surg.* 50(5), 558-561.
- 15) Kawae T, Mikami Y, Fukuhara K et al (2017) Anti-gravity treadmill can promote aerobic exercise for lower limb osteoarthritis patients. *J Phys Ther Sci.* 29(8), 1444-1448.
- 16) Ohoka T, Urabe Y, Shirakawa T (2015) Therapeutic exercises for proximal femoral fracture of super-aged patients: effect of walking assistance using body weight-supported treadmill training (BWSTT) . *Physiotherapy.* 101, e1124-e1125.
- 17) Mehrholz J, Thomas S, Elsner B (2017) Treadmill training and body weight support for walking after stroke (Review) . *Cochrane Database Syst Rev.* 8, CD002840.
- 18) De Troyer A (1983) Mechanical role of the abdominal muscles in relation to posture. *Respir Physiol.* 53(3), 341-353.
- 19) Barrett J, Cerny F, Hirsch JA et al (1994) Control of breathing patterns and abdominal muscles during graded loads and tilt. *J Appl Physiol.* 76(6), 2473-2480.
- 20) Strohl KP, Mead J, Banzett RB et al (1981) Regional differences in abdominal muscle activity during various maneuvers in humans. *Exerc Physiol.* 51(6), 1471-1476.
- 21) Abe T, Kusuhara N, Yoshimura N et al (1996) Differential respiratory activity of four abdominal muscles in humans. *J Appl Physiol.* 80(4), 1379-1389.
- 22) Zaidi A, Benitez D, Gaydecki PA et al (2000) Haemodynamic effects of increasing angle of head up tilt. *Heart.* 83(2), 181-184.
- 23) Vallejo AF, Schroeder ET, Zheng L et al (2006) Cardiopulmonary responses to eccentric and concentric resistance exercise in older adults. *Age Ageing.* 35(3), 291-297.
- 24) Trees DW, Smith JM, Hockert S (2013) Innovative mobility strategies for the patient with intensive care unit-acquired weakness: a case report. *Phys Ther.* 93(2), 237-247.

- 25) Cipriani DJ, Haines M, O'Rand D et al (2009) Reliability and validity of a partial weight bearing measure of lower extremity performance. *N Am J Sports Phys Ther.* 4(2), 49-59.
- 26) Maté-Muñoz JL, Domínguez R, Barba M et al (2015) Cardiorespiratory and Metabolic Responses to Loaded Half Squat Exercise Executed at an Intensity Corresponding to the Lactate Threshold. *J Sports Sci Med.* 14(3), 648-656.
- 27) Gibbons RJ, Balady GJ, Bricker JT et al (2002) ACC/AHA 2002 guideline update for exercise testing: summary article: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines (Committee to Update the 1997 Exercise Testing Guidelines) . *Circulation.* 106(14), 1883-1892.
- 28) Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ (1986) A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol.* 60(6), 2020-2027.

2019年11月15日 受理

