足関節底背屈運動が血行動態と 自律神経系に与える影響

Effects of Ankle Plantar- and Dorsiflexion on Hemodynamics and Autonomic Nervous System Activity

秋葉 崇^{1,2)} 小川 明宏¹⁾ 寺山 圭一郎¹⁾ 土谷 あかり¹⁾
中川 晃一¹⁾ 榊原 隆次³⁾ 丸岡 弘²⁾

TAKASHI AKIBA, RPT^{1,2)}, AKIHIRO OGAWA, RPT, MSc¹⁾, KEIICHIRO TERAYAMA, RPT, PhD¹⁾, AKARI TSUCHIYA, RPT¹⁾,
KOICHI NAKAGAWA, MD, PhD¹⁾, RYUJI SAKAKIBARA, MD, PhD³⁾, HIROSHI MARUOKA, RPT, PhD²⁾

¹⁾ Department of Rehabilitation, Toho University Sakura Medical Center: 564-1 Shimoshizu, Sakura-shi, Chiba 285-8741, Japan
TEL +81 43-462-8811 E-mail: takashi.akiba@med.toho-u.ac.jp

²⁾ Graduate School of Health and Medical Welfare, Saitama Prefectural University

³⁾ Department of Neurology, Internal Medicine, Toho University Sakura Medical Center

Rigakuryoho Kagaku 32(5): 695-699, 2017. Submitted Mar. 23, 2017. Accepted Jun. 1, 2017.

ABSTRACT: [Purpose] To examine the effects of ankle plantar- and dorsiflexion on hemodynamics and autonomic nervous system activity as a basis for the effective management of orthostatic hypotension. [Subjects and Methods] Eight healthy males (age: 28.8 ± 5.3) performed a motor task based on the following protocol: maintaining a resting sitting position for 5 minutes, executing ankle plantar- and dorsiflexion for 1 minute, and maintaining a resting sitting position again for 5 minutes, to evaluate hemodynamics and responses of the autonomic nervous system. [Results] Compared with resting values, the heart rate, stroke volume, and cardiac output during ankle plantar- and dorsiflexion were significantly higher. Such an effect was maintained until 1 minute after the motor task. In contrast, there were no marked changes in responses of the autonomic nervous system, represented by the LF/HF ratio and HF component. [Conclusion] The effect of ankle plantar- and dorsiflexion was immediate, and it lasted for approximately 1 minute, suggesting that these movements reduce hypotension immediately after standing.

Key words: ankle plantar- and dorsiflexion, cardiac output, orthostatic hypotension

要旨: [目的] 足関節底背屈運動が血行動態と自律神経系に与える影響を検討し、起立性低血圧の対処法としての一助とすること。[対象と方法] 対象は健康男性8人(年齢 28.8 ± 5.3 歳)とした。プロトコルは、5分間の安静座位の後、1分間の足関節底背屈運動を行い、再度5分間の安静座位を保持した。その間、循環動態と自律神経の反応を評価した。[結果] 心拍数、一回拍出量、心拍出量は、安静時の値と比較して、足関節底背屈運動中の値が有意に高値を示した。また、その効果は運動後1分まで持続した。LF/HF、HFなどの自律神経系の反応は、有意な変化が認められなかった。[結語] 足関節底背屈運動の即時効果が認められ、その効果は1分程度持続した。足関節底背屈運動が、起立直後の血圧低下を回避する方法としての一助となる可能性が示唆された。

キーワード: 足関節底背屈運動、心拍出量、起立性低血圧

¹⁾ 東邦大学医療センター佐倉病院 リハビリテーション部：千葉県佐倉市下志津564-1 (〒285-8741) TEL 043-462-8811

²⁾ 埼玉県立大学大学院 保健医療福祉学研究科

³⁾ 東邦大学医療センター佐倉病院 神経内科

I. はじめに

生体内では、仰臥位から立位へ姿勢を変化させると500~700 mlの血液が胸腔内から下肢や腹部内臓系へ移動し、心臓への静脈還流量が約30%減少する。これにより心拍出量が減少し、血圧は低下する。この血行動態の変化に対し、生体内では圧受容器反射系が賦活し、血圧の低下を回避する。しかしながら、圧受容器反射系のいずれかに異常をきたす場合は、起立時に高度の血圧低下をきたす。このように起立に伴い血圧が低下する症状は、一般的に起立性低血圧とされている¹⁾。

起立性血圧は、患者の転倒頻度を増加させる危険因子であると同時に、離床を難渋させる因子であると報告されている^{2,3)}。このことから、起立性低血圧に対する簡便で効果的な回避法の確立が必要だと考えられる。

一般的な起立性低血圧の治療方法については、薬物療法、食事療法、回避法（脚くみ、蹲踞など）、弾性ストッキングや腹帯などが挙げられる^{1,4)}。優先される治療方針の順序は、薬物療法を開始する前に非薬物療法を試みることが勧められている。回避法として列挙される脚くみ姿勢の効果は、大腿部の筋による圧迫刺激により血液を上半身にプールさせ、全身の動脈圧が上昇し、心充填圧力、心拍出量、一回拍出量を増加させることで血圧を維持している⁵⁾。同様に、静脈還流量を増加させる簡易な運動として足関節底背屈運動が挙げられるが、起立性低血圧の治療としてガイドラインには明記されていない。主に深部静脈血栓症の予防法を検討した文献が散見される⁶⁾。

足関節底背屈運動による効果は、静脈還流量の増加に伴う心拍出量の増加が予測され、起立性低血圧に対しても一定の効果があるように考えられる。しかしながら、足関節底背屈運動の効果とその持続時間は明らかにされていない。また、自律神経系の反応についても、足関節底背屈運動に伴う交感神経活性により末梢血管抵抗が高まり、起立性低血圧を回避する要因となる可能性が考えられるが、その反応は明らかにされていない。

そこで本研究では、健常者を対象に、足関節底背屈運動中とその前後の血行動態および自律神経系の反応を明らかにし、起立性低血圧に対する効果的な運動の一助とすることを目的とした。

II. 対象と方法

1. 対象

対象者の基本特性は表1に示す。健常男性8名を対象とし、年齢：28.8 ± 5.3 歳、体重：72.0 ± 9.5 kg、身長：175.1 ± 5.6 cm、BMI：23.5 ± 2.6 kg/m²（平均 ± 標準偏差）であった。内科的、運動器的に機能的な障害を有する者は除外とした。本研究は、当院倫理委員会の

表1 基本特性

性別（男）	8人
年齢	28.8 ± 5.3 歳
体重	72.0 ± 9.5 kg
身長	175.1 ± 5.6 cm
Body mass index	23.5 ± 2.6 kg/m ²
喫煙者	0人

平均値 ± 標準偏差。

承認（承認番号：27512）を得た。

2. 方法

検査の流れは、5分間の安静座位、1分間の足関節底背屈運動、5分間の安静座位の順で実施し、合計11分間の血行動態と自律神経系の反応を評価した。

血行動態の評価には非観血式心拍出量モニター（エスクロニミニ：製造番号1325205、平和物産社製）を用いた。測定原理は、被験者の左頸部および左体幹側部に4つの心電図用電極を設置し、大動脈内を流れる赤血球の配向変化を導電性の変化として捉える電気的速度測定法を用いた。測定項目は、心拍数（Heart Rate：以下、HR）、一回拍出量（Stroke Volume：以下、SV）、心拍出量（Cardiac Output：以下、CO）とし、連続的に記録した⁷⁾。血圧の測定は、自動血圧計（クロスウェル社製）を使用し、1分ごとに収縮期血圧（Systolic Blood Pressure：以下、SBP）、拡張期血圧（Diastolic Blood Pressure：以下、DBP）を測定した。

自律神経系の反応の評価は、心拍変動解析（Reflex 名人、クロスウェル社製）を用いた。Reflex 名人は、連続的にリアルタイムな結果が得られる周波数解析法を用い、動的な自律神経評価が可能なりアルタイム解析を用いており、新しく心拍が加わるたびに直前30秒間のRR間隔を解析する。測定項目は、周波数範囲0.04~0.15 Hzの低周波成分（Low Frequency：以下、LF）、周波数範囲0.15~0.4 Hzの高周波成分（High Frequency：以下、HF）、LFをHFで除したLF/HFとした^{8,9)}。

足関節底背屈運動は、測定肢位を昇降台上での端座位とし、足底を床面に接地させ、足関節底背屈中間位とした。また運動様式は、先行研究に準じ¹⁰⁻¹²⁾、静脈還流量を最大にするため、収縮と弛緩の時間を十分に確保し、最大可動域を用いて1分間に60回の運動速度に統一した。

環境設定は、16時~18時の夕方の時間帯に統一し、室温25℃に調整し実施した。実施に際して、一週間前から服薬を禁止し、実施前日の激しい運動やアルコールの摂取、カフェインの摂取を制限した。

統計解析は、足関節底背屈運動実施前（安静時）、足関節底背屈運動中、運動後1分、運動後2分、運動後3

表 2 血行動態の推移

	安静時	足関節底背屈運動中	運動後 1 分	運動後 2 分	運動後 3 分	運動後 4 分	運動後 5 分
心拍数 * (bpm)	69.2 ^{ab} (67.1-73.2)	75.7 (74.8-78.2)	76.9 (74.1-80.1)	69.9 ^{ab} (67.9-71.4)	69.8 ^{ab} (64.9-72.7)	69.1 ^{ab} (65.3-73.5)	69.4 ^{ab} (65.6-72.9)
一回拍出量 * (ml)	65.1 ^{ab} (61.9-68.3)	69.6 (66.1-72.7)	71.3 (68.1-75.7)	68.7 (65.6-72.7)	68.2 ^b (66.1-69.7)	67.7 ^b (64.8-69.4)	66.5 ^b (63.7-69.1)
心拍出量 * (L/min)	4.56 ^{ab} (4.2-4.9)	5.4 (4.7-5.7)	5.5 (4.8-6.0)	4.8 ^{ab} (4.4-5.2)	4.9 ^{ab} (4.4-5.0)	4.6 ^{ab} (4.4-5.1)	4.6 ^{ab} (4.3-5.0)
収縮期血圧 (mmHg)	115.5 (107.0-125.2)	110.0 (106.0-126.7)	117.0 (110.7-122.3)	117.0 (113.3-122.5)	115.5 (111.5-120.3)	117.0 (112.7-118.0)	112.5 (107.3-118.8)
拡張期血圧 (mmHg)	70.5 (65.3-77.3)	73.0 (70.8-76.3)	73.5 (71.8-76.5)	73.5 (72.5-74.8)	73.0 (72.8-77.0)	75.5 (73.5-79.7)	75.0 (73.5-77.3)

中央値 (四分位範囲). *: $p < 0.01$ (Friedman test), ^a: $p < 0.01$ (vs 運動中), ^b: $p < 0.01$ (vs 運動後 1 分), ^a, ^b はいずれも Steel Dwass test.

表 3 自律神経系の推移

	安静時	足関節底背屈運動中	運動後 1 分	運動後 2 分	運動後 3 分	運動後 4 分	運動後 5 分
HF	462.8 (157.0-759.2)	369.6 (223.0-427.9)	372.8 (313.3-637.6)	767.1 (272.9-1217.7)	625.1 (271.8-819.6)	587.7 (146.0-917.5)	691.9 (215.1-965.2)
LF/HF	1.7 (1.4-3.1)	2.9 (1.6-4.5)	1.5 (0.7-2.3)	1.2 (0.9-1.9)	1.7 (1.1-1.9)	2.3 (1.8-2.7)	1.6 (1.0-2.7)

中央値 (四分位範囲). HF: High Frequency, LF/HF: Low Frequency/High Frequency.

分, 運動後 4 分, 運動後 5 分の 7 群に分類し, それぞれ 1 分間の平均値を採用し比較を行った. 全ての比較に対して Friedman 検定を実施し, 主効果が認められた項目に対して Steel Dwass 法を用いて多重比較を行った. 統計ソフトは, IBM SPSS Statistics21.0 を使用し, 有意水準は 5% とした.

倫理的配慮は, 事前に本研究の趣旨を十分に説明し, 同意が得られた場合のみ対象とした. 個人情報の漏洩防止措置は, あらかじめ研究被験者用の ID を発行し, 個人名, 住所, 本籍地などの個人情報は入力せず, 粗データは連結可能匿名化して扱い, 連結表は粗データと別の場所に厳重に保管した.

III. 結 果

安静座位時の血行動態は, HR が 69.8 ± 6.2 回/分, SV が 66.3 ± 6.7 ml, CO が 4.6 ± 0.7 l/min であった. 足関節底背屈運動に伴う血行動態の推移については表 2 に示した.

HR は, 足関節底背屈運動中の値が, 安静時, 運動後 2 分, 運動後 3 分, 運動後 4 分, 運動後 5 分と比較し有意に高値を示した ($p < 0.01$). また, 運動後 1 分の値は, 安静時, 運動後 2 分, 運動後 3 分, 運動後 4 分, 運動

後 5 分と比較し有意に高値を示した ($p < 0.01$). 足関節底背屈運動中と運動後 1 分の値は, 有意差が認められなかった.

SV は, 足関節底背屈運動中の値が, 安静時の値と比較して有意に高値を示した ($p < 0.01$). また, 運動後 1 分の値は, 安静時, 運動後 2 分, 運動後 3 分, 運動後 4 分, 運動後 5 分と比較して有意に高値を示した ($p < 0.01$). 足関節底背屈運動中と運動後 1 分の値は, 有意差が認められなかった.

CO は HR と同様に, 足関節底背屈運動中の値が, 安静時, 運動後 2 分, 運動後 3 分, 運動後 4 分, 運動後 5 分と比較し有意に高値を示した ($p < 0.01$). また, 運動後 1 分の値は, 安静時, 運動後 2 分, 運動後 3 分, 運動後 4 分, 運動後 5 分と比較し有意に高値を示した ($p < 0.01$). 足関節底背屈運動中と運動後 1 分の値は, 有意差が認められなかった.

BP は, SBP と DBP において, 安静時, 足関節底背屈運動中, 運動後 1 分, 運動後 2 分, 運動後 3 分, 運動後 4 分, 運動後 5 分との間に有意差が認められなかった.

自律神経系の反応の推移については表 3 に示した. 自律神経系の反応は, 有意な変化が認められなかった. しかしながら, 交感神経活性の指標とされる LF/HF は, 安静時と比較して足関節底背屈運動中に増加し, 運動後

に低下する傾向にあった。また、副交感神経の指標とされる HF は、安静時と比較して足関節底背屈運動中に低下し、運動後に増加する傾向が認められた。

IV. 考 察

本研究では、健常者における同一姿勢間による足関節底背屈運動の効果を検証した。

SV は、安静時の値と比較して、足関節底背屈運動中とその後 1 分の値が有意に高値を示した。先行研究において、運動に伴う血流量の変化は、負荷強度や運動様式に依存するとされ、筋収縮様式や頻度を変化させることによって、静脈還流、筋血流を効率よく増加させることができる¹³⁾。また、静脈還流量と心拍出量の関係は、フランク・スターリングの法則により等しいとされている。今回、足関節底背屈運動による下腿筋ポンプ作用により静脈還流量が増加し、それに伴い SV が増加した可能性が考えられた。

HR は、安静時の値と比較して、足関節底背屈運動中とその後 1 分の値が有意に高値を示した。運動に伴う HR の上昇メカニズムは、運動開始直後に起こる交感神経活性により、末梢血管の収縮が引き起こされ、HR が上昇すると報告されている¹⁴⁾。また、先行研究より、ウォーミングアップ程度の低負荷での運動であっても、副交感神経活動の指標とされる HF は低下し、交感神経活動の指標とされる LF/HF は上昇すると報告されている¹⁵⁾。このように、足関節底背屈運動に伴う HR 増加への影響は、自律神経系の関与が推測された。しかしながら、本研究において自律神経系の指標である HF、LF/HF に有意な変化を認めなかった。その理由として、健常者に対しての運動負荷としては極めて負荷が小さかったことが考えられた。そのため、自律神経系の反応は有意差が認められる変化では無かったものの、交感神経の指標とされる LF/HF は安静時と比較して運動中に上昇傾向であり、副交感神経の指標とされる HF は安静時と比較して運動中に減少傾向であったと考えられた。本研究においては、足関節底背屈運動に伴い交感神経の活動が高まり、HR が増加したと考えられた。

Fick 式より、CO は SV と HR の積で表される。そのため、SV と HR の増加に伴い CO が運動中と運動後 1 分の値で高値を示したと考えられた。足関節底背屈運動の効果は運動後 1 分まで持続し、運動後 2 分の時点で安静時と同等の値に戻った。この結果からも運動に伴う効果は即時的なものである可能性が示唆された。

SBP、DBP は、運動中と運動後 1 分の SV、HR、CO が一過性に上昇したにも関わらず、明らかな変動は認められなかった。先行研究において、足関節底屈筋力の 50% 以上の負荷で運動を継続した場合、運動後の平均血圧が上昇したと報告されている¹⁶⁾。本研究では、足

関節底背屈運動の運動様式を収縮と弛緩の時間を十分に確保して最大可動域を用い、1 分間に 60 回の運動速度で実施することと定めている。そのため運動負荷は自重程度の極軽度の負荷となっており、SBP と DBP に変化が認められなかったものと考えられた。

今回、健常者が足関節底背屈運動を行うことで、運動中の HR、SV、CO が、安静時の値と比較して有意に高値を示した。また、その効果は運動後 1 分まで持続した。これらの変化については、下腿の筋ポンプ作用と交感神経活性による影響があったものと推察された。

この結果から、足関節底背屈運動が血行動態に影響を与えることが示唆され、起立性低血圧の回避方法としての可能性が考えられた。しかしながら、本研究は同一姿勢での検討であり、起立による影響を考慮できていない。また、健常者による検討であった。今後、姿勢変化を伴う場面での検討や起立性低血圧症状を有する患者への検討が必要になると考えられた。

引用文献

- 1) 日本循環器学会, 日本救急医学会, 日本小児循環器学会・他: 失神の診断・治療ガイドライン (2012 年版改訂). http://www.j-circ.or.jp/guideline/pdf/JCS2012_inoue_h.pdf (閲覧日 2015 年 11 月 1 日)。
- 2) Goldstein DS: Orthostatic hypotension as an early finding in Parkinson's disease. *Clin Auton Res*, 2006, 16: 46-54.
- 3) 橋口修二, 乾 俊夫: 多系統萎縮症における転倒・転落の特徴. *医療*, 2006, 60: 33-36.
- 4) Protheroe CL, Dikareva A, Menon C, et al.: Are compression stockings an effective treatment for orthostatic presyncope? *PLOS ONE*, 2011, 6: e28193.
- 5) Ten Harkel AD, van Lieshout JJ, Wieling W: Effects of leg muscle pumping and tensing on orthostatic arterial pressure: A study in normal subjects and patients with autonomic failure. *Clin Sci (Lond)*, 1994, 87: 553-558.
- 6) 太田覚史, 山田典一, 辻 明宏・他: 静脈血栓塞栓症に対する各種理学的予防法の静脈血流増加効果についての検討. *静脈学*, 2004, 15: 89-95.
- 7) (株)平和物産: 非観血式心拍出量モニターエスロンミニ. *体外循環技術*, 2011, 38: 452-454.
- 8) 内藤清香, 田村直俊, 山元敏正・他: 神経変性疾患の交感神経機能評価における心拍・血圧変動スペクトル解析の問題点. *自律神経*, 2003, 40: 517-522.
- 9) 横井郁子: 段階的座位時の血圧と心拍変動に関する研究. *東京保健科学*, 2003, 15: 225-229.
- 10) 川名俊和, 江上 健, 原田聡美・他: 高齢者における足関節底背屈運動の至適運動速度の検討—大腿静脈血流速度の検討—. *臨床福祉ジャーナル*, 2010, 7: 23-26.
- 11) 高木大輔, 西田裕介: 動脈伸展性に対する簡便で効率的な運動の再考—ヒラメ筋を有する下腿三頭筋の muscle pumping の重要性—. *理学療法科学*, 2011, 26: 323-328.
- 12) Galizia G, Abete P, Testa G, et al.: Counteracting effect of supine leg resistance exercise on systolic orthostatic hypotension in older adults. *J Am Geriatr Soc*, 2013, 61:

-
- 1152-1157.
- 13) Kagaya A: Reduced exercise hyperaemia in calf muscles working at high contraction frequencies. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1992, 64: 298-303.
- 14) 加賀谷敦子：運動時の筋血流. *体育学研究*, 2001, 46: 429-442.
- 15) 天田 浩, 米持英俊, 源美智子・他：心肺運動負荷試験における自律神経の経時的変化の特徴—heart rate variabilityを用いた検討—. *別府大学紀要*, 2014, 55: 119-124.
- 16) 佐藤巧夢, 福島沙季, 石川真喜・他：座位での足関節底屈運動前後の血行動態の変化. *理学療法科学*, 2017, 32: 159-163.