

先端工学を活用した脚のむくみ(浮腫)の包括的評価とその応用 — スポーツ用弾性靴下の効果と作用機序の検討 —

日本女子大学 佐々木 一 茂
(共同研究者) 法政大学 越智 英 輔

Comprehensive Assessment of Leg Swelling Using Advanced Technologies: Physiological Effects and Mechanisms of Sports Compression Stockings on Fatigue and Recovery

by

Kazushige Sasaki

*Faculty of Human Sciences and Design,
Japan Women's University*

Eisuke Ochi

*Faculty of Bioscience and Applied Chemistry,
Hosei University*

ABSTRACT

We have recently developed a comprehensive approach for monitoring leg swelling using several advanced technologies. With this approach, the present study aimed to investigate the exercise-induced leg swelling and its recovery in humans. The effect of wearing a compression stocking on leg swelling and muscle fatigue was also investigated. Healthy young volunteers performed unilateral calf-raise exercise for both legs, wearing a compression stocking only on one leg. Before and immediately after the exercise, maximum calf circumference was determined by tape measure, extracellular fluid resistance (R_0) of the lower leg by segmental bioelectrical impedance spectroscopy, foot and lower leg volume by modified water displacement

volumetry, and the gastrocnemius muscle stiffness by ultrasound shear-wave elastography. Concurrently, muscle soreness, contractile force during voluntary and evoked contractions, and unilateral vertical jump performance were examined. These measurements were repeated 1, 2 and 5 days after the exercise. There were significant increases in calf circumference, the reciprocal of R_0 (an index of extracellular fluid volume), and total lower leg volume immediately after the exercise. However, further measurements suggest that the exercise-induced leg swelling found in this study was mainly due to the increase in blood flow and metabolite accumulation, not due to muscle damage and subsequent inflammatory response. We also found a limited impact of sports compression stocking on the exercise-induced leg swelling, while the decrease in maximal voluntary contractile force tended to be attenuated in the leg wearing the stocking. These results suggest that wearing compression stockings accelerates force recovery during the first few days after exercise, which may not be related to its edema-preventing effect.

要 旨

本研究の目的は、我々がこれまでに開発・確立した評価系を用いて運動により生じる脚のむくみとその回復について検討すること、およびスポーツ用弾性靴下による脚のむくみ軽減効果を検討することであった。健康な若齢男女が片脚のレジスタンス運動（カーフレイズ）を行った前後と1, 2, 5日後において、脚のむくみの指標となる下腿部周囲長、下腿部細胞外液量指標（生体電気インピーダンス法）、足部・下腿部の体積（改良版の水置換法）、腓腹筋スティフネス（超音波せん断波エラストグラフィ）などを測定した。運動時、一方の脚のみに弾性靴下を着用させた。結果から、カーフレイズにより生じる脚のむくみは一過的であり、筋の損傷や炎症に由来するとされる運動1日後以降のむくみは起こらないことがわかった。また、弾性靴下の着用脚で運動2日後に観察された筋力低下の軽減については、むくみの除去や軽減とは独立したメカニズムの関与が示唆された。

緒 言

身体の一部（主に末梢部）に組織間質液（または組織間液、細胞間液）が過剰に蓄積された状態のことを生理学的に浮腫またはむくみと呼ぶ。むくみの原因としては静脈疾患、腎疾患、肝疾患などが挙げられるが、健常者でも激しい運動や受傷により下肢の血流量が増加した場合や、長時間の不活動や飛行機搭乗によって静脈還流量が著しく減少した場合には脚にむくみが生じる。これを放置すればコンパートメント症候群や深部静脈血栓症（いわゆるエコノミークラス症候群）のような重篤な症状を引き起こすこともある。したがって、脚のむくみの迅速かつ客観的な評価方法を確立し、その効果的な予防・改善方法について検討することで、様々な分野に貢献できる可能性がある。

これまで、脚のむくみは主に周囲長あるいは体積の変化により評価されてきた。どちらの指標にも一長一短があり、測定の簡便性や再現性では周囲長の方が優れ、脚全体の体液量変化を反映するという点では体積の方が優れると考えられる。い

ずれにしても、むくみの発生（発症）メカニズムが多因子的で、自覚症状も多様であることを考慮すると、これらに別の指標も組み合わせたより多面的な評価が重要と考えられる。そこで我々は、細胞内外における水分量変化を短時間のうちに推定できる多周波生体電気インピーダンス法と生体組織のかたさ（スティフネス）を非侵襲的に可視化・定量化できる超音波せん断波エラストグラフィという先端的な技術を脚のむくみ評価に活用することとした。健康な若齢女性を対象とした我々の最近の研究¹⁾では、下腿部の周囲長、足部・下腿部の体積、インピーダンス法によって推定された下腿部の細胞外液量、腓腹筋のスティフネスはいずれも朝から夕方にかけて起こるとされる脚のむくみ、および弾性ストッキングの着用によるその改善を裏付ける変化を示したが、対象者ごとに算出した各指標の変化率には有意な相関関係が認められなかった。したがって、各指標はそれぞれむくみの異なる側面を反映すること、これらの併用により多面的・包括的に脚のむくみを評価できることが示唆された。また、この研究では水を張ったアクリル製水槽に脚を入れ、溢れ出た水の体積を測定する方法（水置換法）で脚の体積を求めたが、その後の研究により音叉式センサを組み込んだ高容量かつ高精度の台はかりを使用し、水を張ったアクリル製水槽そのものの重量変化を1g単位で測定するシステムを開発した。これにより10分以上を要した体積測定の時間が2分程度に短縮された。

本研究では、これまでに述べた4つの指標を併用した評価系により、レジスタンス運動の直後から数日後にかけて起こる脚のむくみとその回復について検討することを第一の目的とした。また、下腿部を強く圧迫し、静脈還流量の増大をはかるスポーツ用弾性靴下を運動時に着用した場合の効果について検討することを第二の目的とした。

1. 方法

1.1 対象者

健康な19～22歳の男性9名（身長172.4±7.0cm、体重63.4±7.6kg、足長：26.8±1.0cm、ふくらはぎ周囲長：35.6±2.6cm）女性3名（身長：156.4±0.7cm、体重：53.2±1.1kg、足長：23.5±0.0cm、ふくらはぎ周囲長：34.5±1.0cm）より本研究の目的、方法、注意事項等についての説明後に書面による実験参加への同意を得た。本研究は日本女子大学「ヒトを対象とした実験研究に関する倫理審査委員会」の承認を得て行われた（課題番号：338）。

1.2 実験デザイン

本研究では各対象者にレジスタンス運動（自重負荷での片脚カーフレイズ）を行わせ、その直前、直後、1日後、2日後、5日後において様々な測定を繰り返し実施するデザインを採用した。また、運動条件は左右脚とも同一（1秒間に1回のリズムで10回×15セット²⁾）としたが、本研究ではスポーツ用弾性靴下の効果検討も目的としたため、運動開始直前から運動終了5分後まで一方の脚のみに弾性靴下（東光社製、設計圧力値：足首30mmHg、ふくらはぎ18mmHg、膝下10mmHg）を着用させた。弾性靴下の着用脚は対象者ごとに変えたが、各種の測定は全て右脚、左脚の順に実施した。レジスタンス運動は右脚、左脚の順で1セットが終わるごとに脚を変えて実施した。なお、弾性靴下の衣服圧については、本研究の対象者1名（女性）より別日に安静時とカーフレイズ運動時の実測データを取得し、足首から膝下にかけての段階的な減少を確認した。

1.3 下腿部周囲長

下腿部周囲長はテープメジャー（seca201, Seca社製）を用いて測定した。測定位置は各対

対象者の下腿長（膝関節裂隙から外踝まで）の遠位30%とした。測定位置には第一回目（運動前）の測定時に油性マーカーで印をつけておき、以降もその位置で測定した。

1. 4 下腿部細胞外液量指標

多周波生体電気インピーダンス測定器（MLT-550N, SK メディカル電子社製）を用いて、様々な周波数における下腿部の電気インピーダンス値を取得した。インピーダンス値の取得に先立ち、アルコール綿により皮膚の汚れや皮脂を拭き取り、電圧電極を測定脚の膝関節裂隙と足首（両踝を結んだ中間点）、電流電極を測定脚の足背部中央遠位側と対側脚の足背部中央遠位側に貼り付けた^{3,4)}。インピーダンス値の取得中は対象者に静的立位姿勢をとらせた。本研究では、得られたインピーダンス値の周波数特性（Cole-Cole プロット）より推定された直流電流に対する抵抗値 R_0 の逆数 ($1/R_0$) を細胞外液量の指標とした⁵⁾。

1. 5 足部・下腿部体積

足部・下腿部の体積は水を張ったアクリル製水槽に対象者の足部・下腿部を入れることで測定した（水置換法）。ただし、水槽から溢れ出た水の体積（または重量）を測定する一般的なやり方ではなく、水槽をデジタル防水電子台はかり（HJR-62K, 新光電子社製）の上に置いてその重量変化を測定する方式を採用した。測定に先立ち、両脚の腓骨頭および外踝から3cm 近位側（足首）に油性マーカーで印をつけた。その後、対象者が座った昇降機能付き台車（をくだ屋技研社製）の座面を一旦大きく上昇させてから、徐々に下降させることで脚の入水量を調節した。脚の印を付けた位置と水面とが重なったところで座面の下降を停止し、上述の台はかりを用いて測定脚にかかっている浮力を1g 単位で測定した。アルキメデスの原理より、この浮力は脚が押しつけた水の質量に等

しく、水の密度（約 1g/cm^3 ）から水に浸かっている部分の体積が求められる⁶⁾。本研究では各脚につき、足部（足首まで）および足部・下腿部全体（腓骨頭の位置まで）の体積を求めた。また、両者の差分から足部を含まない下腿部の体積も求めた。

1. 6 腓腹筋スティフネス

腓腹筋スティフネスは超音波せん断波エラストグラフィ装置（Aixplorer version12.2, Supersonic Imagine 社製）を用いて測定した。超音波せん断波エラストグラフィとは、超音波によって発生させたせん断波（媒質のねじれが伝播する波で、波の進行方向と振動方向が垂直な横波）が生体組織を伝播する速度から組織弾性をほぼリアルタイムで測定・表示する技術のことである。本研究では、対象者に静的立位姿勢をとらせた状態で腓腹筋内側頭の筋腹（前述した下腿部周囲長の測定位置に相当）に専用のプローブ（SL10-2, Supersonic Imagine 社製）を当て、その縦断面（深さ方向：10-15mm, 長さ方向：20-30mm）において $1 \times 1\text{mm}$ の空間分解能で測定されたせん断弾性係数（shear modulus）の平均値を腓腹筋スティフネスとした。

1. 7 筋痛

筋痛の評価にはVAS（visual analog scale）法を用いた。まず、対象者には椅座位で膝を完全に伸ばしたまま、足関節を数回、能動的に底・背屈させた際の筋痛を評価させた。続けて、検者が圧痛計（シゲール産業社製）を腓腹筋内側頭に押し当て、約50Nの力で押し込んだ際の筋痛を評価させた。いずれも「何も感じない」を0mm、「経験ないほどの痛み」を100mmとするスケール上につけられた印の位置を1mm 単位で測定した。二つの評価値の平均を以降の分析に用いた。

1. 8 片脚垂直跳びの跳躍高

片脚垂直跳びの跳躍高は跳躍高測定システム（マルチジャンプテスト, DKH 社製）を用いて測定した。対象者には踏切と着地を片脚で行うこと、両手を腰に添えたまま離さないこと、反動（膝の屈伸）を使ってよいことを指示した。第一回目（運動前）の測定時には各脚とも2回の事前練習を行わせたが、その後の測定時には練習の機会を与えなかった。跳躍高はそれぞれの脚について2回測定し、良い方の記録を以降の分析に用いた。

1. 9 足底屈筋力

足底屈筋力は金属製のフットプレート（ヴァイン社製）とフレームからなる自作の筋力計を用いて測定した。この筋力計では、フットプレートの梁に貼り付けられたストレインゲージが検出した歪みを増幅器（6M84, 日本電気三栄社製）で増幅し、A/D変換システム（PowerLab 8/35, ADInstruments 社製）を用いてコンピュータに記録することができる。本研究では、歪み信号の増幅段階で遮断周波数100Hzの低域通過フィルタを適用し、それをサンプリング周波数10kHzで記録した。

測定ではまず、対象者を筋力計の座面に座らせ、背もたれとストラップにより測定脚を膝関節0度（完全伸展位）、足関節中間位で固定した。次に、膝窩と大腿遠位部（膝蓋骨近位端）に表面電極（Axelgaard Manufacturing 社製）をそれぞれ陰極、陽極として貼り付けた。陰極には丸型（直径3.2cm）、陽極には長方形型（7.5×10cm）の電極を用いた。その後、電気刺激装置（DS7AH, Digitimer 社製）とパルス発生器（DG2A, Digitimer 社製）を用いて足底屈筋群の収縮を約5秒間隔で10～20回程度誘発した。用いた刺激は0.2ms矩形波の2連発刺激（刺激間隔：10ms）であり、その強度はゼロから徐々に増加させた。最終的には超最大強度（刺激強度の増加に対する誘

発筋力の増加が頭打ちとなった時点から、さらに10%増しの強度）で3回以上の筋収縮を誘発した。その際に記録した歪み信号を4次のバターワースフィルタ（遮断周波数：50Hz）で平滑化した後、筋力のピーク値、収縮時間（刺激開始から筋力がピーク値に到達するまでの時間）、弛緩時間（筋力がピーク値に到達してから半減するまでの時間）、刺激開始から筋力発揮が開始されるまでの時間遅れ（EMD: electromechanical delay）を分析した。それぞれについて超最大強度での3回の誘発筋収縮から得られた値を平均し、以降の分析に用いた。

その後、足底屈筋群の随意最大筋力を測定した。測定に際しては、最大努力で行うこと、5秒間力を発揮し続けることを指示した。第一回目（運動前）の測定時には各脚とも2回の事前練習を行わせたが、その後の測定時には練習の機会を与えなかった。最大筋力はそれぞれの脚について2回測定した（測定間休憩：1分以上）。また、随意最大筋力発揮中とその直後にそれぞれ1回、超最大強度の筋電気刺激を与えて随意活動レベル（対象者が随意最大筋力測定においてどの程度まで筋の活動レベルを高められていたか）を評価した（twitch interpolation 法⁷⁾）。随意最大筋力と随意活動レベルのいずれについても2回のうち良い方の記録を以降の分析に用いた。

1. 10 統計処理

結果は平均と標準偏差で示した。各変数の時系列変化および弾性靴下の有無による比較には、二要因（時間×脚）ともに対応のある二元配置分散分析を用いた。分散分析において時間の主効果が有意で、かつ時間と脚の交互作用が有意あるいはその傾向あり（ $P < 0.10$ ）の場合には、事後検定（対応のある t 検定）により各測定値の初期値（第一回目の測定値）からの変化を調べた。また、それぞれを初期値に対する相対値に変換した上で、各

時点における弾性靴下着用脚と非着用脚の比較を行った。いずれの検定においても有意水準は5%としたが、分散分析の事後検定においてはFDR (false discovery rate) 法⁸⁾による有意水準の調整を行った。

2. 結果

対象者のうち、女性2名は実験を完了できなかった。その理由は1名が第一回目(運動前)の測定時における体調不良、もう1名が運動終了4日後の時点における筋痛と歩行困難であった。したがって、以降に示すデータは全て10名分(男性9名、女性1名)の結果である。なお、この10名について実験期間中の体重変動は認められなかった($P=0.72$, 反復測定分散分析)。

2.1 脚のむくみ関連指標

下腿部最大周囲長については、二元配置分散分析により有意な時間の主効果が認められた($P<0.001$)が時間と脚の交互作用は有意ではなかった($P=0.37$)。図1に示したように、運動直後の下腿部最大周囲長は両脚とも増加していたが、1日後にはほぼ元に戻っており、5日後の時点ではやや減少傾向にあった。

下腿部細胞外液量指標(1/R₀)については、二元配置分散分析により有意な時間の主効果が認め

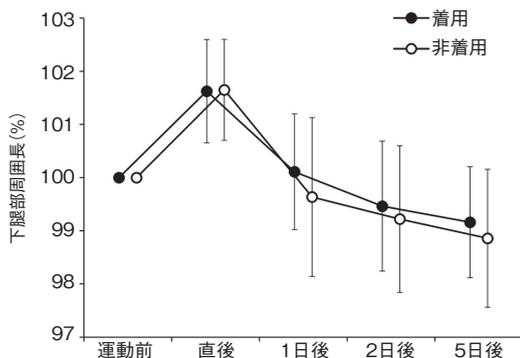


図1 下腿部周囲長の相対的变化

着用：スポーツ用弾性靴下を着用した側の脚 (n=10)
非着用：スポーツ用弾性靴下を着用しなかった側の脚 (n=10)

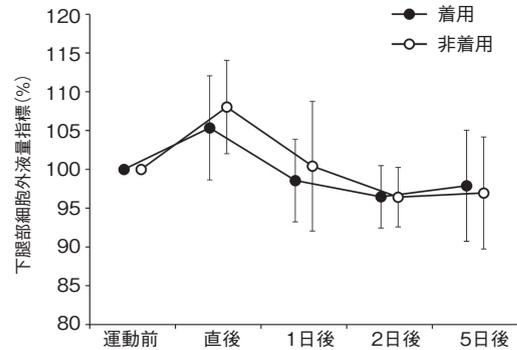


図2 下腿部細胞外液量指標の相対的变化

着用：スポーツ用弾性靴下を着用した側の脚 (n=10)
非着用：スポーツ用弾性靴下を着用しなかった側の脚 (n=10)

られた($P=0.001$)が時間と脚の交互作用は有意ではなかった($P=0.25$)。図2に示したように、運動直後の下腿部細胞外液量指標は両脚とも増加していたが、1日後にはほぼ元に戻っており、2日後の時点ではやや減少傾向にあった。

足部の体積については、二元配置分散分析における有意な主効果、交互作用は認められなかった。足部を含まない下腿部の体積については、二元配置分散分析により有意な時間の主効果が認められた($P=0.006$)が時間と脚の交互作用は有意ではなかった($P=0.11$)。足部を含む下腿部全体の体積については、二元配置分散分析により有意な時間の主効果($P=0.008$)および時間と脚の交互作用($P=0.024$)が認められた。事後検定の結果、いずれの脚についても運動直後において初期値からの有意な増加が認められた(靴下着用脚： $P=0.004$, 非着用脚： $P=0.009$)。図3に示したように、足部を含む下腿部全体の体積は運動直後に増加し、2日後にかけて減少していたが、弾性靴下の着用脚では非着用脚と比べてこのような変動が抑えられる傾向にあった。事後検定の結果、運動1日後において両脚の変化率に有意な差が認められた($P=0.009$)。

腓腹筋スティフネスについては、二元配置分散分析における有意な主効果、交互作用は認められなかった。図4に示したように、腓腹筋スティ

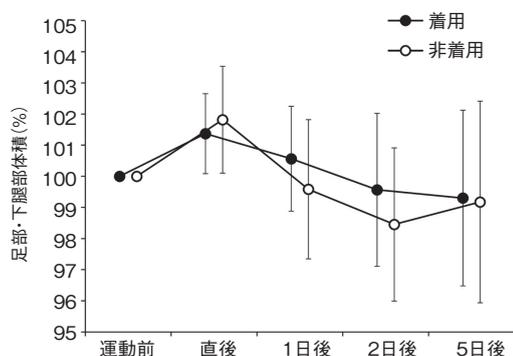


図3 足部・下腿部体積の相対的变化

着用：スポーツ用弾性靴下を着用した側の脚 (n=10)
非着用：スポーツ用弾性靴下を着用しなかった側の脚 (n=10)

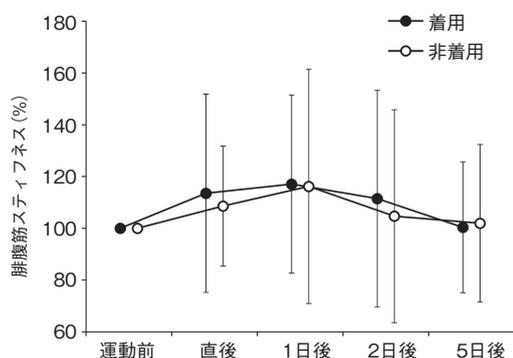


図4 腓腹筋スティフネスの相対的变化

着用：スポーツ用弾性靴下を着用した側の脚 (n=10)
非着用：スポーツ用弾性靴下を着用しなかった側の脚 (n=10)

フネスは平均的には運動直後から1日後にかけてやや増加し、5日後には元に戻るような変化を示したが、大きく減少した対象者もいるなど個人差が大きかった。

2. 2 その他の指標

筋痛については、二元配置分散分析により有意な時間の主効果が認められた ($P<0.001$) が時間と脚の交互作用は有意ではなかった ($P=0.78$)。

片脚垂直跳びの跳躍高については、二元配置分散分析により有意な時間の主効果 ($P<0.001$) と脚の主効果 ($P=0.036$) が認められたが、時間と脚の交互作用は有意ではなかった ($P=0.25$)。

誘発筋収縮中における筋力のピーク値、収縮時間、弛緩時間については、二元配置分散分析に

より有意な時間の主効果 (いずれも $P<0.001$) が認められたが、時間と脚の交互作用は有意ではなかった (筋力のピーク値: $P=0.89$, 収縮時間: $P=0.62$, 弛緩時間: $P=0.73$)。EMDについては、二元配置分散分析における有意な主効果、交互作用は認められなかった。

随意最大筋力については、二元配置分散分析により有意な時間の主効果 ($P=0.001$) が認められ、時間と脚の交互作用も有意ではないがその傾向があった ($P=0.087$)。事後検定の結果、いずれの脚においても運動直後 (靴下着用脚: $P<0.001$, 非着用脚: $P=0.001$), 1日後 (靴下着用脚: $P=0.010$, 非着用脚: $P=0.004$), 2日後 (靴下着用脚: $P=0.021$, 非着用脚: $P<0.001$) において初期値からの有意な減少が認められた。図5に示したように、随意最大筋力は運動直後から2日後にかけて減少していたが、弾性靴下の着用脚では非着用脚と比べて運動2日後の筋力低下が抑えられる傾向にあった ($P=0.058$, 対応のある t 検定)。随意活動レベルについては、二元配置分散分析における有意な主効果、交互作用は認められなかった。

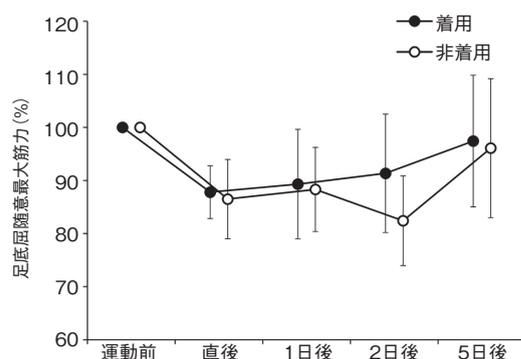


図5 足底屈随意最大筋力の相対的变化

着用：スポーツ用弾性靴下を着用した側の脚 (n=10)
非着用：スポーツ用弾性靴下を着用しなかった側の脚 (n=10)

3. 考 察

3. 1 レジスタンス運動後の脚のむくみ

本研究において採用したむくみの評価指標のうち、下腿部の周囲長、細胞外液量指標 ($1/R_0$),

体積はよく似た変化を示した。すなわち、これらはいずれも運動直後に最大値をとり、その後の2日間で単調に減少した。これは上腕部や大腿部のレジスタンス運動によって誘発される周囲長や横断面積の変化が二相性である（運動直後の一過的な増加が収まった後、数日にわたる持続的な増加が観察される）こと^{9,10}とは明らかに異なっている。したがって、足底屈筋群の特徴として、レジスタンス運動に伴う筋血流の上昇や代謝産物の蓄積に由来するむくみは生じるものの、筋の損傷やそれに伴う炎症反応に由来するむくみは生じにくいことが示唆された。筋の損傷・炎症反応の裏付けとなる運動1～2日後の脚のむくみが観察されなかった理由として、本研究で採用した運動の強度や量が不十分であったためと考えることもできるが、その時点でほぼ全ての対象者が筋痛を感じており、また有意な筋力低下も認められている。実際、Takahashi et al.¹⁰の報告においても、大腿四頭筋のレジスタンス運動は1～2日後に筋横断面積の増加と激しい筋痛を引き起こすものの、大腿直筋のみに着目すると横断面積の増加が認められるのは運動直後だけであり、運動12時間後以降はほぼ運動前と同じレベルで推移している。以上より、損傷・炎症反応に伴う水分量の増加、すなわちむくみの生じやすさが筋によって異なるのだと考えられる。

超音波せん断波エラストグラフィによって測定した腓腹筋のスティフネスについては、運動直後の一過的な増加と運動後数日にわたる持続的な増加のいずれも認められなかった。上腕二頭筋および大腿四頭筋を対象とした先行研究^{11,12}では、運動10-60分後においてスティフネスの増加が報告されていることから、この点でも腓腹筋は運動に影響されにくいといえるのかも知れない。ただし、上述のLacourpaille et al.¹²が報告しているように、運動後における一過的な筋スティフネスの増加は、筋が受動的に伸張されるような関節角

度においてのみ顕著である。本研究で採用した関節角度（膝関節完全伸展位かつ足関節中間位）において腓腹筋の伸張はそれほど強くないと考えられるため、今後の研究では撮像時の足関節角度の見直し、あるいは複数の関節角度における筋スティフネスの測定が必要かも知れない。

3. 2 スポーツ用弾性靴下の効果

本研究において二元配置分散分析で有意な交互作用（時間 × 脚）が認められたのは、足部・下腿部の体積のみであった。これについて事後検定をした結果、運動1日後における体積（初期値を基準とした相対値）が弾性靴下の着用脚よりも非着用脚で低いことがわかった。ただし、運動1日後とはいえ弾性靴下の着用が体積の低下ではなく増加につながっていること、下腿部の周囲長や細胞外液量指標においては同様の差異が認められなかったことを考慮すれば、弾性靴下の運動時着用が脚のむくみを予防・改善する効果は極めて限定的であるといえよう。一方、近年では運動中ではなく、運動後の着用を前提とした疲労回復促進ウェアが多数市販されるようになったため、そのむくみ軽減効果について検討することは本研究次のステップになりうる。

本研究で採用した運動条件は、同じく弾性靴下の効果に着目したMiyamoto et al.²の研究と同一であったが、結果には相違が認められた。Miyamoto et al.²は本研究と同様の高圧力設計の弾性靴下を着用させた脚について、電気刺激によって誘発された筋力の運動直後における低下が抑制されたことを報告している。しかし、本研究における弾性靴下の着用脚と非着用脚の比較では、運動による誘発筋力の低下は同程度であり、運動後の回復にも全く違いが認められなかった。一方、運動直後における随意最大筋力の低下率にも脚による違いは認められなかったが、そこからの回復過程は両脚でやや異なり、運動2日後にお

ける筋力低下が弾性靴下の着用脚で抑制される傾向にあった。この原因としては随意活動レベルの違いがまず考えられる。実際、統計的に有意ではないものの ($P=0.13$, 対応のある t 検定), 運動 2 日後における随意活動レベル (初期値を基準とした相対値) は弾性靴下の着用脚で 102.0%, 非着用脚で 96.7% と, 5 回にわたる測定の中では最も大きな差が生じていた。また, 別の説明として運動 2 日後における筋の低頻度疲労の程度に両脚で差があった可能性がある。低頻度疲労とは筋を高頻度に刺激した場合と比べ, 低頻度で刺激した場合により顕著な疲労 (筋力低下) が観察される現象のことで, 筋損傷を伴うような高強度の運動後に生じやすく, また回復の遅い疲労とされる^{13, 14)}。本研究では, 刺激周波数 100Hz で筋収縮を誘発しており, これは随意筋力発揮中における運動単位の平均発火頻度 (5 ~ 30Hz¹⁵⁾) と比較してかなり高いために低頻度疲労の影響を受けず, 結果として両脚の誘発筋力に差が認められなかったことが示唆される。

運動時における弾性靴下の着用が, その 2 日後における随意活動レベルの低下や低頻度疲労を抑えたメカニズムについてさらに考察することは本研究の範囲を超えており, 今後の検討課題である。しかし, 脚のむくみは運動 2 日後にはほぼ消失していたこと, 弾性靴下のむくみ軽減効果が限定的であったことから, 運動 2 日後の随意最大筋力において認められた弾性靴下の効果は少なくともむくみの除去や軽減とは独立したメカニズムによるものと考えられる。

4. 結 論

本研究の結果から, 顕著な筋疲労や筋痛を引き起こす運動を実施した場合でも, 下腿部に生じるむくみは運動後速やかに消失し, 再発しないことが明らかとなり, これは足底屈筋群の特徴によるものと考えられた。また, 運動時におけるスポー

ツ用弾性靴下の着用は運動直後に生じる筋疲労の軽減をもたらさないが, その後の随意最大筋力の回復を促す傾向があった。一方で, 弾性靴下の脚のむくみ軽減効果は限定的であり, 随意最大筋力の回復を促すメカニズムには関与していないことが示唆された。

謝 辞

本研究に対する助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に心からお礼を申し上げます。また, 本研究を遂行するにあたり多大なるご協力をいただいた土屋陽祐氏, 植田央氏 (帝京平成大学), 戸枝美咲氏 (東京大学), 大久保由香氏, 山崎莉波氏 (日本女子大学), 豊田昌平氏 (法政大学), 跳躍高測定システムを貸して下さった森嶋琢真氏 (法政大学), スポーツ用弾性靴下の作成にご協力をいただいた AK インターナショナル株式会社, 東光株式会社に深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) Sugahara I., Doi M., Nakayama R., Sasaki K., Acute effect of wearing compression stockings on lower leg swelling and muscle stiffness in healthy young women, *Clin. Physiol. Funct. Imaging*, **38**(6):1046-1053(2018)
- 2) Miyamoto N., Hirata K., Mitsukawa N., Yanai T., Kawakami Y., Effect of pressure intensity of graduated elastic compression stocking on muscle fatigue following calf-raise exercise, *J. Electromyogr. Kinesiol.*, **21** (2):249-254(2011)
- 3) Yamada Y., Schoeller D.A., Nakamura E., Morimoto T., Kimura M., Oda S., Extracellular water may mask actual muscle atrophy during aging, *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.*, **65**(5):510-516(2010)
- 4) Miyatani M., Kanehisa H., Masuo Y., Ito M., Fukunaga T., Validity of estimating limb muscle volume by bioelectrical impedance, *J. Appl. Physiol.*, **91** (1):386-394(2001)
- 5) Yamaguchi H., Yoshida H., Kamijo M., Fujimaki G., Naruse T., Effect of footrest angle on decrement of

- leg swelling while sitting, *Int. J. Affect. Eng.*, **13**(3):197-203(2014)
- 6) 中村隆夫, 合田典子, 白井喜代子, 楠原俊昌, 山本尚武, 浮腫評価のための体肢容積計の開発, 岡山大学医学部保健学科紀要, **14**(1):31-35(2003)
 - 7) Place N., Maffiuletti N.A., Martin A., Lepers R., Assessment of the reliability of central and peripheral fatigue after sustained maximal voluntary contraction of the quadriceps muscle, *Muscle Nerve.*, **35**(4):486-495(2007)
 - 8) Curran-Everett D., Multiple comparisons: philosophies and illustrations, *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, **279**(1):R1-8(2000)
 - 9) Howell J.N., Chleboun G., Conatser R., Muscle stiffness, strength loss, swelling and soreness following exercise-induced injury in humans, *J. Physiol.*, **464**:183-196(1993)
 - 10) Takahashi H., Kuno S., Miyamoto T., Yoshioka H., Inaki M., Akima H., Katsuta S., Anno I., Itai Y., Changes in magnetic resonance images in human skeletal muscle after eccentric exercise, *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, **69**(5):408-413(1994)
 - 11) Lacourpaille L., Nordez A., Hug F., Couturier A., Dibie C., Guilhem G., Time-course effect of exercise-induced muscle damage on localized muscle mechanical properties assessed using elastography, *Acta. Physiol.*, **211**(1):135-146(2014)
 - 12) Lacourpaille L., Nordez A., Hug F., Doguet V., Andrade R., Guilhem G., Early detection of exercise-induced muscle damage using elastography, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **117**(10):2047-2056(2017)
 - 13) Jones D.A., High-and low-frequency fatigue revisited, *Acta. Physiol. Scand.*, **156**(3):265-270(1996)
 - 14) 和田正信, 山田崇史, 松永智, 低頻度疲労の特徴とメカニズム: 骨格筋における変化, *体力科学*, **61**(3):297-306(2012)
 - 15) De Luca C.J., Hostage E.C., Relationship between firing rate and recruitment threshold of motoneurons in voluntary isometric contractions, *J. Neurophysiol.*, **104**(2):1034-1046(2010)