

コンプレッションタイツが高強度運動後の 発揮トルクの安定性に及ぼす影響

加 藤 え み か

要 旨

本研究の目的は高強度運動の後の発揮トルクの安定性にコンプレッションタイツが及ぼす影響を明らかにすることであった。16名の健常な成人が被験者として参加し、右脚のみのカーフレイズ（20回×3セット、セット間に2分間の休憩）を実施した。被験者はコンプレッションタイツを着用した試行と、特別な機能を有さないタイツを着用した試行の2種類を実施した。試行順はランダムとし、試行間は最低でも2ヶ月間空けた。カーフレイズはステップ台上で実施し、足関節角度の可動範囲は最大背屈位から最大底屈位までとした。カーフレイズの前後で、腓腹筋内側頭のスチフネスと形状的なパラメータを超音波法で取得した。続いて、被験者は等尺性最大底屈トルクを発揮し、さらに力発揮の制御の指標（発揮トルクの安定性）として、等尺性最大底屈トルクの20%の値を用いて最大下での等尺性底屈トルクを20秒間可能な限り安定させて発揮する試行を実施した。反復測定二元配置の分散分析（条件×時間）を用いて、全ての測定項目について検討した。カーフレイズ後の測定で、等尺性最大底屈トルクは条件間で有意な差は見られなかったが、腓腹筋内側頭のスチフネスはコンプレッションタイツを着用した条件では上昇が抑えられた。同様に、発揮トルクの安定性もコンプレッションタイツを着用していた試行で、変動が小さかった。以上より、コンプレッションタイツは高強度運動後に最大下でのトルク発揮を安定して実施できることが示された。

キーワード：コンプレッションタイツ、カーフレイズ、筋スチフネス、発揮トルクの安定性、超音波法

1. 緒言

トレーニングや試合での運動パフォーマンスを可能な限り維持することはアスリートにとって重要である。高強度運動の実施や、その繰り返しのよって、運動パフォーマンスが筋疲労や筋振戦により低下することが知られており（28）、このことは運動に伴う筋疲労と呼ばれている（exercise-induced muscle damage：EIMD, 23）。運動の継続によりエネルギーの枯渇等が生じることで、筋の収縮様式にも影響を及ぼす。それにより、筋形状（筋厚、筋束長、羽状角、全筋長）や筋スチフネスが変化することがEIMD中にも観察されており、パフォーマンスの低下とも関連する。EIMDに対応するために、マッサージ、積極的回復、交代浴、冷水浴、サプリメント摂取、コンプレッションウェア（compression garments：CG）の着用などが行われている（7, 12, 15, 16, 24, 26）。近年では、スポーツの現場において高強度運動に伴うEIMDの予防のためにCGの使用が増加している。CGは元々、外部より圧力を加えることで、静脈還流、

血流速度、組織の酸素化などを増加させて、むくみや筋の振動を減少させることから、深部静脈血栓症など慢性静脈不全などの治療として広く用いられていた(3, 7, 9, 17, 23)。また、末梢の循環と静脈還流を補助することから、運動中および運動後の血中乳酸の wash out を促進させる(6, 17)。医療現場での使用のみならず、これらの作用がスポーツウェアとしても好ましい効果をもたらすことが期待されて、スポーツの現場でも用いられるようになっている。運動中にCGを着用することの効果を検討した報告では最大筋力発揮やスプリント走、最大での跳躍など、全力で行うパフォーマンスがよく用いられている(2, 29)。しかしながら、実際のスポーツの現場では、最大下の強度でトルクや筋力を調節できる、すなわち安定した筋力発揮は最大筋力の発揮と同様に重要である。さらに、多くのスポーツ活動では最大筋力を発揮する局面よりも、最大下での発揮筋力を調節する局面の方が頻繁にみられる(9, 21)。最大下での筋力を安定して発揮することは動作の巧みさとも関連するものであり(22)、最大下での筋力発揮における筋力の変動は、動作の制御の個人差を説明する上でも重要である。さらに、筋厚や筋束長などの筋形状は筋力を発揮することで大きく変化し、筋形状の変化はスティフネスのような力学的特性の変化を伴う(13, 32, 33)。筋の力学的特性の変化は、一定のトルク発揮を安定して行なっていたとしても主動筋と拮抗筋の活動水準へ影響を及ぼす(21)。これは最大下で安定したトルク発揮を行おうとしても、スティフネスが変化することで関節を安定させるために共収縮が高まるためである(21)。発揮されたトルクが安定しないことの原因として、筋の力学的特性の変化によって、運動単位の発火頻度にも影響が及ぼされる(11, 27)。

CGについては多くの報告があるものの、最大下での発揮トルクの安定性や、筋形状、筋スティフネスに対してどのような影響を及ぼすかについてはあまり知られていない。そこで、本研究の目的は高強度運動の前後で、等尺性でのトルク発揮を行なった際に、発揮トルクの安定性に対してCGが及ぼす影響を明らかにすることであった。本研究での仮説では、高強度運動中にCGを着用していることで、一定の圧力が筋へ与えられることにより(28)、筋内のコンディション(筋形状、筋スティフネス)を変化させないこと。また、高強度運動後に行う最大下でのトルク発揮では、特別な機能を有さないタイツを着用した時と比較して、より安定したトルク発揮が行えることとした。

2. 方法

2-1. 被験者

16名の健康な成人(9名の男性, 7名の女性)が被験者として実験に参加した(年齢: 33.3 ± 5.4 歳, 身長: 165.6 ± 5.8 cm, 体重: 59.9 ± 7.8 kg)。被験者は定期的な運動習慣がある者であったが、本格的なトレーニングを実施しているものは含まなかった。被験者は実験前の24時間は通常の飲食を心がけ、強度の高い運動やトレーニングは控えるように指示された。全ての

被験者は実験の手順に慣れており、等尺性でのトルク発揮については事前（実験実施の1週間から3日前）に安定したトルク発揮が行えるように練習を行なった。本研究は国立スポーツ科学センター倫理委員会より承認され（# 007-2015）、ヘルシンキ宣言に則ったものであった。実験の実施前に全ての被験者は十分な説明を受けて、同意書に署名を行なった。

2-2. 実験概要

高強度運動後の発揮トルクの安定性に対するコンプレッションタイツ（CG: A400, SKINS, Sydney, Australia）の効果を検証するために、全ての被験者は実験室内でのカーフレイズを最低でも2ヶ月間空けて2回実施した。試行はCGを着用して行う試行と、特別な機能を有さないタイツを着用して行う試行（CON試行）で、順番は被験者ごとにランダムに決定した。CGのサイズは被験者の体格（身長と体重）をもとに、メーカーのサイズに関するガイドラインに沿って決定した。カーフレイズと全ての測定項目は右脚について行った。カーフレイズの前後で、筋力のパフォーマンスの指標として等尺性最大底屈トルクと最大下での発揮トルクの安定性の測定を実施した。また、筋コンディションのデータとして筋形状と筋スティフネスを測定した。全ての測定項目は先行研究で測定の信頼性と妥当性が確認されている（1, 20, 21）。両方の試行をほぼ同じ時間帯に実施した。

2-3. 実験手順

2-3-1. カーフレイズ

被験者は右脚のみのカーフレイズを高さ20cmのステップ台の上で実施した。足部の前方のみをステップ台に乗せて、膝関節と股関節は完全伸展のままであった。カーフレイズの動作範囲は足関節の最大背屈から最大底屈までとし、事前に2本のプラスチックテープを最大底屈位と最大背屈位に合わせて張り、被験者には毎回の底背屈運動の際に触るように指示をした。Svantessonら（31）によると、片脚でのカーフレイズの最大値が平均で25回（15 - 32回）であったため、本研究では20回を1セットとし、2分間の休憩を挟んで3セット繰り返した。被験者はカーフレイズの際に右手の人差し指の指尖のみを壁に触れることで姿勢を安定させた。メトロノーム（MA-1, KORG, Japan）を46 bpmに設定し、1分間に23往復のカーフレイズを行えるテンポで試行を実施した。カーフレイズは1回の音で最大背屈から最大底屈までの運動を行う相と最大底屈から最大背屈までを行う相に分かれており、音に遅れないことや、動作を早く完了させて最大背屈位または最大底屈位で次の動作の開始を待つことのないように指示を行なった。被験者の足部がプラスチックテープに触れなかった時はあらかじめ定めた足関節の可動域を確保するように適宜、験者は声をかけた。

本実験のプロトコルの作成に際して、先行研究で採用されているカーフレイズの回数により、疲労と筋損傷がその程度生じるのかを確かめるために、事前に被験者14名を対象として予備実

験を実施した。その際に、主観的疲労度である VAS (Visual analogue scale) により被験者は運動前後の疲労感を回答した。また、運動前と実験の翌日、およびその翌日に筋損傷マーカーである CK 活性を測定した。以上の測定結果から、VAS では運動後に有意に増加した。また、CK 活性においても翌日、およびその翌日に有意な高値を示した。以上から、本実験プロトコルは十分に疲労と筋損傷をもたらすプロトコルであったと判断した。

2-3-2. 筋スティフネス

腓腹筋内側頭 (gastrocnemius medialis : MG) の力学的特性の変化を定量するために下腿長 (大腿骨外側上顆と外踝の直線距離) の近位より 30% の部位を超音波法で測定した。この位置を選択した理由は筋の横断面積が最大となるためであった (19)。験者は実験のはじめに下腿長を測定した。被験者は静止立位姿勢をとり、その際の下腿長をスチールメジャーを用いて 5mm 刻みで測定された。測定部位を決定した後に被験者は等尺性筋力計 (VTF-002, VINE, Japan) のシート部分に股関節角度 30 度伸展 (内角 : 120 度)、膝関節完全伸展の座位で (20)、足関節角度は 90 度 (解剖学的正位) をとった。筋スティフネスは剪断波超音波法を、筋形状は B モード法を用いて測定した。超音波装置 (Aixplorer, SuperSonic Imagine, France) のリニアアレイプローブ (SuperLinear 15-4, SuperSonic Imagine, France ; 7.5-MHz wave frequency with 38-mm scanning length) を下腿に対して長軸方向に貼付した。剪断波超音波法は生体内の密度が一様であれば、硬い組織では速度が速く、柔らかい組織では速度が遅くなる。このことを利用して組織の硬さを評価する。超音波画像診断装置のモニタの表示において、組織の硬さに応じた着色 (カラーフローイメージ) により、柔らかい組織では青く、硬い組織では赤く着色されるように設定した。また 10mm 四方の関心領域 (region of interest: ROI) 内のスティフネスは装置に内蔵されたソフトウェアで自動的に計測され、数値化された (1)。ROI を MG の中心に来るようにし、カーフレイズ前後の筋スティフネスを測定した。筋スティフネス計測の妥当性のために、本研究の被験者を含む 20 名を対象として、安静時の筋スティフネスを足関節角度 90 度で 2 回測定した。2 回目の測定は別の日に行い、その際の変動係数 (coefficient variation: CV) は $1.7\% \pm 0.3\%$ であり、級内相関係数は 0.91 - 0.99 であった。

2-3-3. 筋形状

カーフレイズ前後の MG の筋形状を測定した。筋形状の測定は筋スティフネスの測定と同時に行った。超音波画像診断装置のディスプレイ部分が二画面表示になっており、片方では剪断波超音波法で測定した筋スティフネスの結果が表示され、もう片方では超音波 B モード法で測定した筋形状の結果が表示されるように設定した。筋厚 (Muscle thickness: MT) は MG の中心の浅部腱膜と深部腱膜の垂直距離とした。筋束長 (Fascicle length: FL) は浅部腱膜と深部腱膜を結ぶ筋束の長さとした (8, 10)。なお、カーフレイズの前後でプローブを同じ位置に貼

付できるように、測定前に被験者の皮膚上に油性ペンを用いてプローブの位置を記載した。さらに、CG 試行と CON 試行において同じ位置を測定できるよう、被験者の骨の位置からプローブまでの距離を測定し、カメラで撮影し、画像として保存した。MG の筋形状の測定は3回行い、3回の測定の CV は MT で $1.3\% \pm 0.9\%$ で、FL で $0.5\% \pm 0.3\%$ 、級内相関係数は MT で $0.842 - 0.986$ 、FL で $0.843 - 0.987$ であった。

2-3-4. 等尺性最大底屈トルクと最大下での発揮トルクの安定性

被験者は筋力計のシート部分に筋スティフネスおよび筋形状の測定と同じ姿勢をとった。被験者は十分な練習の後に等尺性最大底屈トルク (maximal voluntary contraction: MVC) を発揮した。その際にフットプレートに足部を固定するため、非伸縮性のストラップで足部の甲と足関節周りを固定し、トルク発揮に伴う足関節の角度変化が起こらないようにした。足部を固定する際に被験者への不快感は最小限となるように留め、試行ごとに被験者へ口頭で不快感の有無に関する確認を行なった。MVC の測定はカーフレイズ前には2分間の休憩を設けて2回実施し、カーフレイズ後には1回実施した。カーフレイズ前の MVC の値に5%以上の隔たりがあった場合には2回目の測定後に2分間の休憩を設けて3回目の測定を行なった (21)。カーフレイズ前に測定した MVC の全ての値の中の最大値をもとに、最大下での発揮トルクの安定性でのターゲットトルク (20% MVC) を設定した。MVC および発揮トルクの安定性の試行中に発揮された底屈トルクは筋力計のフットプレートに埋設したロードセル (model LTZ -500KA, linear range 0-5000 N, Kyowa, Osaka, Japan) で取得された。筋力計で測定されたトルク信号は生体アンプ (DPM-911B, KYOWA, Osaka, Japan) で増幅された。

発揮トルクの安定性の試行において被験者は測定前に十分な練習をした。その後、験者は被験者に眼前 1m のモニタにソフトウェア (LabChart, version 7. 2-32 bit, ADInstruments, Dunedin, New Zealand) 経由で映写された 20% MVC のターゲットトルクを見ながら、なるべく安定した等尺性の底屈トルク発揮を 20 秒間継続するように指示した。発揮トルクの平均値、標準偏差 (standard deviation : SD)、CV を 20 秒間のうちの中央の 16 秒間について分析し、CV を発揮トルクの安定性の指標とした (21)。予備実験で行なった MVC の CV は $4.4\% \pm 3.1\%$ であり、発揮筋力の調整能力の CV は $7.4\% \pm 4.6\%$ であった。また、MVC の級内相関係数は $0.889 - 0.988$ で、発揮トルクの安定性の級内相関係数は $0.839 - 0.875$ であった。

2-4. 統計処理

全ての測定項目に対して、平均値と SD を求めた。カーフレイズ前後の筋スティフネス、MT、FL、MVC、発揮トルクの安定性については反復測定の実験配置の分散分析 (条件 × 時間) を用いた。被験者内因子の分散の等質性について Mauchly の球面性検定を行った。有意な交互作用や主効果がみられた場合には Tukey の事後検定を行った。統計処理は SPSS (IBM SPSS

Statistics version 22.0 for Windows, IBM Co., USA) を用いて行った。

3. 結果

筋スティフネスにおいて条件 (CG または CON) と時間 (カーフレイズ前または後) の間には有意な交互作用がみられた ($p < 0.05$, $F[3, 15] = 46.576$; $\eta^2 = 1.22$, Figure 1)。多重比較の結果, 筋スティフネスはカーフレイズ後に両試行で有意に増加していた ($p < 0.05$)。また, CG と CON を比較した結果, カーフレイズ後の筋スティフネスは CON と比較して CG で有意に低値を示した ($p < 0.05$, Figure 1)。

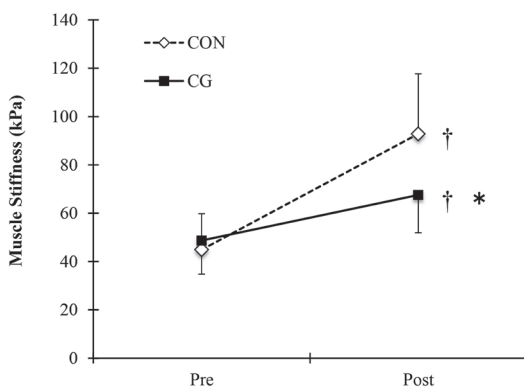


Figure 1

カーフレイズ前後の MG の筋スティフネス

† : カーフレイズ前後で有意差あり ($p < 0.05$)。* : CG 試行と CON 試行の間に有意差あり ($p < 0.05$)

CG, Pre: 48.4 ± 14.3 kPa, Post: 65.4 ± 15.4 kPa, CON, Pre: 44.5 ± 15.3 kPa, Post: 90.2 ± 21.3 kPa

MVC は CG と CON の両方において, 時間に有意な主効果がみられた (CG, Pre: 160.2 ± 36.2 Nm, Post: 128.7 ± 33.1 Nm, CON, Pre: 159.8 ± 36.3 Nm, Post: 124.0 ± 33.7 Nm, $p < 0.05$, $F[3, 15] = 41.018$; $\eta^2 = 0.51$)。多重比較の結果, MVC はカーフレイズ後に両試行で有意に低下した ($p < 0.05$)。

発揮トルクの安定性は条件 (CG または CON) と時間 (カーフレイズ前または後) の間には有意な交互作用がみられた ($p < 0.05$; $F[3, 15] = 69.187$; $\eta^2 = 1.00$, Figure 2)。多重比較の結果, 発揮トルクの安定性はカーフレイズ後に両試行で有意に低下していた ($p < 0.05$)。また, CG と CON を比較した結果, カーフレイズ後の発揮トルクの安定性は CON と比較して CG で有意な差がみられた ($p < 0.05$, Figure 2)。

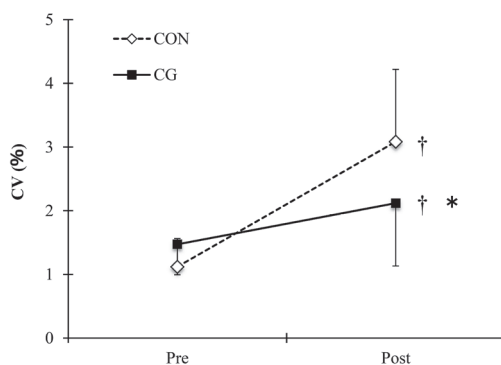


Figure 2

カーフレイズ前後の発揮トルクの安定性

† : カーフレイズ前後で有意差あり (p<0.05) * : CG 試行と CON 試行の間に有意差あり (p<0.05)

CG, Pre: 1.5 ± 0.5%, Post: 2.2 ± 1.0%, CON, Pre: 1.1 ± 0.4%, Post: 3.2 ± 1.1%

カーフレイズによって、筋形状はCG 試行と比較してCON 試行でより大きな変化がみられた。MT と FL において、条件 (CG または CON) と時間 (カーフレイズ前または後) の間には有意な交互作用がみられた (MT: $p<0.05$; $F[3, 15] = 13.601$; $\eta^2 = 0.80$, FL: $p<0.05$ $F[3, 15] = 4.173$; $\eta^2 = 1.08$, Table)。多重比較の結果, MT は CON 試行においてカーフレイズ後に有意に増加した ($p<0.05$, Table)。しかし, CG 試行においてはカーフレイズ後に有意な増加はみられなかった ($p>0.05$, Table)。また, FL は CON 試行においてカーフレイズ後に有意に減少していた ($p<0.05$, Table)。一方, CG 試行においては有意な変化はみられなかった ($p>0.05$, Table)。

Table カーフレイズ前後の MT と FL の値 (平均値 ± SD)。

		CG	CON
MT	Pre	mm 22.4±2.9	22.1±2.3
	Post	mm 23.6±2.4	24.2±2.9†
FL	Pre	mm 59.5±7.4	59.3±7.2
	Post	mm 58.3±6.9	55.6±8.0†

† : カーフレイズ前後で有意差あり (p<0.05)

4. 論議

本研究の目的は高強度運動後に発揮トルクの安定性, 筋形状, 筋ステイフネスにCG が及ぼす影響を明らかにすることであった。発揮トルクの安定性については, CON 試行と比較してCG 試行においてカーフレイズ後のパフォーマンスの低下が少なかった (Figure 2)。多くのスポーツ活動で最大下での筋力発揮を安定して行うことは重要な因子であるにも関わらず, 高強度運

動後における CG の役割はこれまでにあまり検討されてこなかった。先行研究では高強度運動中に CG を使用することで力学的な面においても、生理学的な面においてもパフォーマンスに有利となるような効果が報告されている (3, 18)。生理学的なメカニズムにおいては、皮膚上から直接加圧する機能を有するウェアを着用することで血流や筋の酸素化を促進し、動作中の筋の振動を減少させることで、運動を実施する際にそのパフォーマンスに有利に働くことが示されている (3, 16)。これらの効果を考慮しながら、力学的特性と生理学的特性という 2 つの点から今回の結果について、論じることとする。

まず、MG の力学的な特性について、超音波 B モード法で測定した FL の結果より、CG 試行ではカーフレイズの前後で有意な変化はみられなかったが、CON 試行ではカーフレイズの後に有意に FL が短縮していた (Table)。先行研究によると、底屈筋群の FL が短い方が等尺性で発揮するトルクの変動が大きくなることが報告されている (21)。また、筋の力-長さ関係より、20% MVC を発揮している際の MG は上行脚 (力-長さ関係において筋長の増加により発揮できる筋力も増加する領域) を用いる (25)。CON 試行においては、カーフレイズ後の MG が筋の力-長さ関係において、より短い方へシフトしていたことから、20% MVC という最大下での筋力を発揮する際に、不利な長さで発揮せざるを得なくなったものと考えられる。また、別の可能性として腱のスティフネスの変化があげられる。カーフレイズ中に、アキレス腱には筋収縮に伴う長さ変化が生じる。カーフレイズの前後で、超音波 B モード法で測定した MG の FL は同一の関節角度で測定したにも関わらず、有意に短縮していた (Table)。この結果は CON 試行においてカーフレイズ後に腱組織が伸長されたことを示唆する。カーフレイズ中にアキレス腱が繰り返し伸縮されることにより、アキレス腱ヘストレッチと同様の効果が働いて、アキレス腱のスティフネスが低下したものと考えられる。これにより、アキレス腱のスラック長が変化し、発揮トルクの安定性に対してより変動が大きくなったものと考えられる (21)。さらに、FL とアキレス腱の長さ変化は底屈筋群の最大下でのトルク発揮において、筋の活動水準に変化をもたらすことが報告されている (21)。以上の力学的特性の変化により、発揮トルクの安定性は CG 試行の方が CON 試行と比較して、パフォーマンスが低下しにくかったものと考えられる。

次に、生理学的な特性について、low-frequency fatigue (LFF) があげられる。カーフレイズに伴う伸張性筋活動の繰り返しにより生じた筋張力で、運動の最中に筋線維は伸張される。このことで、LFF が生じる (30)。伸張性筋活動を含む運動は EIMD のような運動パフォーマンスを低下させる大きな原因となる (6)。先行研究の結果と本研究の結果に基づくと、伸張性筋活動中に張力下で伸張された MG は、筋線維に損傷が生じていたことが考えられる。Clarkson and Sayers (6) は筋線維への力学的な損傷が生じることで炎症反応がもたらされ、その状態で伸張性筋活動を繰り返すことによって損傷をさらに悪化させることを示している。伸張性筋活動中に生じた筋損傷は筋線維に対して力学的なストレスをもたらすのみならず、筋細胞内のカ

ルシウムの恒常性を崩すことで、局所的な炎症を引き起こす (6)。本研究で行なったカーフレイズでは、足関節の最大背屈が含まれていたため、被験者はカーフレイズの実施によって60回の伸張性筋活動を繰り返したことになる。このことは運動課題を実行したことによって結果的にLFFをもたらしたものと考えられる。本研究では発揮トルクの安定性は20% MVCの強度で測定した。この運動強度は、運動単位のサイズの原理より、速筋線維よりも遅筋線維を多く動員する運動強度であった。そのため、発揮トルクの安定性に関する測定では、速筋線維を多く動員するMVCよりもLFFの影響がより大きかったことが予想される。以上の理由から、CON試行ではカーフレイズ後により発揮トルクの安定性が低下したものと考えられる。CGに伴う利点として下肢全体を動的なギプス (dynamic cast) が覆うことで、筋のアライメントを整えることを促し、運動中の筋の振動を抑えることでEIMDの発生を抑制していたものと考えられる (2, 3, 9, 18)。また、振動を抑えることがLFFの抑制にも繋がっていたものと考えられる。CG試行では筋の振動を抑制することと、LFFを抑えることにより、カーフレイズ後に最大下での等尺性トルク発揮をより安定して行えたものと考えられる。また、CGは外部から抑えるだけでなく筋内圧を高めることで合わせて筋の振動を減少させ、力学的な損傷の程度を緩和させる働きが報告されている (9)。外部から加圧することで血流を加速させ、筋ポンプ作用を促し、静脈還流を増加させる (2, 4)。このことにより、乳酸などの代謝産物の除去が速やかに行われたものと考えられる。CGの着用に関わらず、MVCはカーフレイズの後に有意に低下した。この結果は、筋力発揮において、随意的な筋の活動水準の減少によるものであろう (5, 14)。疲労を伴うようなカーフレイズ後の筋力低下は筋損傷による炎症反応から生じる痛みと、局所的な筋の外傷によるものや、代謝産物の蓄積により、筋収縮を一層困難にしていたものと考えられる。

筋スティフネスは筋コンディションの重要な指標である。カーフレイズ中の筋収縮の繰り返しにより筋スティフネスが増加し、筋形状も変化する (34)。CON試行でのみ、カーフレイズ後にMTが有意に増加し、FLが有意に減少した (Table)。一方で、CG試行ではMTもFLもカーフレイズの前後で有意な変化はみられなかった (Table)。筋形状の変化はカーフレイズ後のCG試行とCON試行の間に生じた筋スティフネスの差と関連するだろう。高強度で行なう運動中にCGを着用することで筋形状には有意な変化が生じず、筋スティフネスについてはCON試行と有意な差がみられた。現場への提言として、本研究ではCGが高強度運動後に行う発揮トルクの安定性に対して、有利となるような結果が得られた。これらの結果のメカニズムは筋の力学的特性と生理学的生の両方により説明されうるものである。最大下で筋力を調節する局面は、実際のスポーツパフォーマンスでも観察される。結論として、CGは高強度運動後の発揮トルクの安定性に対して有利と働く可能性が示された。

5. 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP18K10872 の助成を受けたものである。

6. 引用一覧

1. Akagi, R, and Takahashi, H. Acute effect of static stretching on hardness of the gastrocnemius muscle. *Med Sci Sports Exerc* 45: 1348-1354, 2013.
2. Berry, MJ, and McMurray, RG. Effects of graduated compression stocking on blood lactate following an exhaustive bout of exercise. *Am J Phys Med* 66: 121-132, 1987.
3. Bringard, A, Perrey, S, and Bulluye, N. Aerobic energy cost and sensation responses during submaximal running exercise-positive effects of wearing compression tights. *Int J Sports Med* 27: 373-378, 2006.
4. Chauveau, M. Effects of compression on venous haemodynamics. In: Gardon-Mollard, C, and Ramlet, AA, eds. *Compression therapy*. Paris: Masson, 23-28, 1999.
5. Chleboun, GS, Howell, JN, Baker, HL, Ballard, TN, Graham, JL, Hallman, HL, Perkins, LE, Schauss, JH, and Conatser, RR. Intermittent pneumatic compression effect on eccentric exercise-induced swelling, stiffness, and strength loss. *Arch Phys Med Rehabil* 76: 744-749, 1995.
6. Clarkson, PM, and Sayers, SP. Aetiology of exercise-induced muscle damage. *J Appl Physiol* 24: 234-248, 1999.
7. Davies, V, Thompson, KG, and Cooper SM. The Effects of Compression Garments on Recovery. *J Strength Cond Res* 23: 1786-1794, 2009.
8. de Boer, M, Seynnes, O, di Prampero, P, Pisot, R, Mekjavić, I, Biolo, G, and Narici, M. Effect of 5 weeks horizontal bed rest on human muscle thickness and architecture of weight bearing and non-weight bearing muscles. *Eur J Appl Physiol* 104: 401-407, 2008.
9. Doan, BK, Kwon, Y, Newton, RU, Shin, J, Popper, EM, Rogers, RA, Bolt, LR, Robertson, M, and Kraemer, WJ. Evaluation of a lower-body compression garment. *J Sports Sci* 21: 601-610, 2003.
10. Duclay, J, Martin, A, Duclay, A, Cometti, G, and Pousson, M. Behavior of fascicles and the myotendinous junction of human medial gastrocnemius following eccentric strength training. *Muscle Nerve* 39: 819-27, 2009.
11. Enoka, RM, Christou, EA, Hunter, SK, Kornatz, KW, Semmler, JG, Taylor, AM, and Tracy BL. Mechanisms that contribute to differences in motor performance between young and old adults. *J Electromyogr Kinesiol* 13: 1-12, 2003.
12. Goodall, S, and Howatson, G. The effects of multiple cold water immersions on indices of muscle damage. *J Sports Sci Med* 7: 235-241, 2008.
13. Guissard, N, and Duchateau, J. Neural aspects of muscle stretching. *Exerc Sport Sci Rev* 34: 154-158, 2006.
14. Hill, J, Howatson, G, van Someren, K, Leeder, J, and Pedlar, C. Compression garments and recovery from exercise-induced muscle damage: a meta-analysis. *Br J Sports Med* 48: 1340-1346, 2014.
15. Hilbert, JE, Sforzo, GA, and Swensen, T. The effects of massage on delayed onset muscle soreness. *Br J Sport Med* 37: 72-75, 2003.
16. Howatson, G, and Van Someren, K. The prevention and treatment of exercise induced muscle damage. *Sports Med* 38: 483-503, 2008.

17. Ibegbuna, V, Deils, KT, Nicolaidis AN, and Alina, O. Effect of compression stockings on venous hemodynamics during walking. *J Vasc Surg* 37: 420-425, 2003.
18. Jakeman, JR, Byrne, C, and Eston, RG. Lower limb compression garment improves recovery from exercise-induced muscle damage in young, active female. *Eur J Appl Physiol* 109: 1137-1144, 2010.
19. Kanehisa, H, Ikegawa, S, Tsunoda, N, and Fukunaga, T. Cross-Sectional Areas of Fat and Muscle in Limbs during Growth and Middle Age. *Int J Sports Med* 15: 420-5, 1994.
20. Kato, E, Kanehisa, H, Fukunaga, T, and Kawakami, Y. Changes in ankle joint stiffness due to stretching: The role of tendon elongation of the gastrocnemius muscle. *Eur J Sport Sci* 10: 111-119, 2010.
21. Kato, E, Vieillevoye, S, Balestra, C, Guissard, N, and Duchateau, J. Acute effect of muscle stretching on the steadiness of sustained submaximal contractions of the plantar flexor muscles. *J Appl Physiol* 110: 407-415, 2011.
22. Kornatz, KW, Christou, EA, and Enoka, RM. Practice reduces motor unit discharge variability in a hand muscle and improves manual dexterity in old adults. *J Appl Physiol* 98: 2072-2080, 2005.
23. Kraemer, WJ, Bush, JA, Wickham, RB, Denegar, CR, Gomez, AL, Gotshalk, LA, Duncan, ND, Volek, JS, Putukian, M, and Sebastianelli, WJ. Influence of compression therapy on symptoms following soft tissue injury from maximal eccentric exercise. *J Orthop Sports Phys Ther* 31: 282-290, 2001.
24. MacRae, BA, Cotter, JD, and Laing, RM. Compression garments and exercise: garment considerations, physiology and performance. *Sports Med* 41: 815-843, 2011.
25. Maganaris, CN. Force-length characteristics of in vivo human skeletal muscle. *Acta Physiol Scand* 172: 279-285, 2001.
26. Mastaloudis, A, Traber, MG, Carstensen, K, and Widrick, JJ. Antioxidants did not prevent muscle damage in response to an ultramarathon run. *Med Sci Sports Exerc* 38: 72-80, 2006.
27. Moritz, CT, Barry, BK, Pascoe, MA, and Enoka, RM. Discharge rate variability influences the variation in force fluctuations across the working range of a hand muscle. *J Neurophysiol* 93: 2449-2459, 2005.
28. Morrison, S, Kavanagh, J, Obst, SJ, and Haseler, LJ. The effects of unilateral muscle fatigue on bilateral physiological tremor. *Exp Brain Res* 167: 609-621, 2005.
29. Scanlan, AT, Dascombe, BJ, Reaburn, PR, and Osborne, M. The effects of wearing lower-body compression garments during endurance cycling. *Int J Sports Physiol Perform* 3: 424-438, 2008.
30. Semmier, JG. Motor unit activity after eccentric and muscle damage in humans. *Acta Physiol* 210: 754-767, 2014.
31. Svantesson, U, Osterberg, U, Thomee, R, and Grimby, G. Muscle fatigue in a standing heel-rise test. *Scand J Rehab Med* 30: 67-72, 1998.
32. Toft, E, Espersen, GT, Kalund, S, Sinkjaer, T, and Hornemann, BC. Passive tension of the ankle before and after stretching. *Am J Sports Med* 17: 489-494, 1989.
33. Weir, DE, Tingley, J, and Elder, GC. Acute passive stretching alters the mechanical properties of human plantar flexors and the optimal angle for maximal voluntary contraction. *Eur J Appl Physiol* 93: 614-623, 2005.
34. Yoshitake, Y, Takai, Y, Kanehisa, H, and Shinohara, M. Muscle shear modulus measured with ultrasound shear-wave elastography across a wide range of contraction intensity. *Muscle Nerve* 50: 103-113, 2014.

The effect of compression garments on controlled force output following strenuous exercise

Emika KATO

Abstract

The purpose of this study was to elucidate the effects of compression garments (CGs) on controlled force output after strenuous exercise. Sixteen healthy volunteers completed trials both with CGs and without CGs (control trial: CON) on two separate, random days that were at least two months apart. Both trials required participants to perform heel-rise exercises from maximal dorsiflexion to maximal plantar flexion 20 times using a single leg. The subjects repeated 3 sets of the exercise and rested for 2 minutes between sets. Before and after the heel-rise exercise, mechanical (stiffness) and architectural properties of the gastrocnemius medialis muscle were evaluated using ultrasound. Furthermore, the isometric maximal voluntary contraction (MVC) of plantar flexion was measured, and the subjects maintained 20% MVC of plantar flexion torque for 20 seconds as steadily as possible (steadiness task) as an index of force control. Repeated two-way analysis of variance (CG/CON \times time) indicated that all the parameters declined immediately after the heel-rise exercise in both the CG and CON trials. The MVC did not show different tendencies between CG and CON trials, but muscle stiffness and steadiness declined less in the CG trial than in the CON trial ($p < 0.05$). In conclusion, CGs are considered to positively benefit controlled force output following strenuous exercise.

Keywords: compression garments, heel-rise exercise, muscle stiffness, steadiness, ultrasound