

段階的弾性圧迫ストッキングの着用が歩行中の足関節底屈筋群の
血液量・筋活動および主観的運動強度に与える影響
**The effects of Graded elastic compression stocking on
muscle blood volume, muscle activity and the level of perceived exertion
during walking.**

光川眞壽¹, 宮本直和², 平田浩祐¹, 利光徹哉³, 川村明⁴, 福永哲夫⁵, 川上泰雄²
Naotoshi Mitsukawa¹, Naokazu Miyamoto², Kousuke Hirata¹, Tetsuya Toshimitsu³,
Akira Kawamura⁴, Tetsuo Fukunaga⁵, Yasuo Kawakami²

¹ 早稲田大学大学院スポーツ科学研究科

² 早稲田大学スポーツ科学学術院

³ 東光株式会社

⁴ AK インターナショナル株式会社

⁵ 鹿屋体育大学

¹ Graduate School of Sport Sciences, Waseda University.

² Faculty of Sport Sciences, Waseda University.

³ TOKO incorporated.

⁴ AK international company limited.

⁵ Japan National Institute of Fitness and Sports in Kanoya.

キーワード: 近赤外分光法, 組織酸素飽和度, 筋電図, 主観的運動強度, 心拍数

Keywords: Near-infrared spectroscopy, Tissue oxygenation, Electromyography, Rating perceived exertion, Heart rate

要 約

本研究は、段階的弾性圧迫ストッキング (Graded elastic compression stocking: EC_{ST}) の着用が歩行中の下腿血液量・筋活動および主観的運動強度に与える影響を明らかにすることを目的とした。成人男性 8 名が、EC_{ST} を着用する条件 (EC_{ST} 条件) と段階的な圧迫のないストッキングを着用する条件 (CON_{ST} 条件) で、30 分間の歩行課題および立位安静課題を行った。近赤外分光装置を用いて、課題遂行時の腓腹筋内側頭およびヒラメ筋の総ヘモグロビン量 (THb) を測定した。同時に、両筋の筋活動および主観的運動強度も記録した。歩行中および立位安静時の両筋の THb は、CON_{ST} 条件と比較して EC_{ST} 条件において有意に低下したが、その THb の低下量は歩行時と安静時と同程度であった。歩行中の平均筋電位および主観的運動強度は、CON_{ST} と EC_{ST} 条件との間に有意な差はみられなかった。これらの結果から、EC_{ST} の着用による筋ポンプ作用は、歩行中と立位安静時ともに同程度促進されるが、歩行中の下腿筋群の筋活動および主観的運動強度を軽減させる効果は少ないことが示された。

スポーツ科学研究, 6, 88-96, 2009 年, 受付日: 2009 年 9 月 24 日, 受理日: 2009 年 11 月 25 日

連絡先: 川上泰雄 〒359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島 2-579-15 TEL: 04-2947-6784

E-mail: ykawa@waseda.jp

緒言

段階的弾性圧迫ストッキング (Graded elastic compression stocking: EC_{ST})は、下腿の足首部から近位部にかけて段階的に着圧が減少するように設計された医療用の装具である。EC_{ST}の着用によって、安静下での下肢からの静脈還流量が増大し(早田ら, 2006; Bringard ら, 2006), 長時間の姿勢保持によって生じる静脈血の鬱滞, 浮腫および主観的な疲労感が軽減されることがすでに報告されている(熊澤ら, 2005; Hirai ら, 2006)。さらに、スポーツ現場において、末梢循環の改善や疲労軽減効果を期待して、EC_{ST}を着用して運動を実施する試みがなされている。しかしながら、EC_{ST}を着用して運動した際、末梢循環の動態(Ibegbuna ら, 2003), 筋活動(Matton ら, 2006a,b)や疲労感(熊澤ら, 2005)を軽減するといった効果に関する知見は十分に蓄積されているとはいえない。

EC_{ST}の着用が運動中の末梢循環を改善させる効果がみられるかについて、Ibegbuna ら(2003)は、静脈疾患を持つ中年女性を対象に、air-plethysmographyを用いて、歩行中の下腿の静脈容積を観察した。その結果、EC_{ST}非着用時と比較して、EC_{ST}着用時には下腿の静脈容積が減少したことから、EC_{ST}着用により運動中の静脈還流が促進されると報告している。しかし、Ibegbuna ら(2003)の報告では、運動中の静脈容積の減少量が安静時にみられる減少量とどの程度異なるものなのかについては明らかにされていない。EC_{ST}の着用が筋内圧に与える影響は、筋活動水準に影響されず一定であることが示されている(Moton ら, 2006)ことを考慮に入れると、歩行中においても安静時と同様のEC_{ST}による筋ポンプ作用の促進が認められる可能性がある。

また、EC_{ST}を着用して運動を行うと、非着用時と比較して運動中の末梢から心臓への静脈還流が増加し、心拍数、筋活動や疲労感が軽減する効果が期待されている。しかしながら、これまでの研究では、EC_{ST}の着用によって運動中の心拍数(Berry ら, 1990)や筋活動(Moton ら, 2006a, b)が軽減する効果は認められておら

ず、EC_{ST}の着用が運動中の筋活動や疲労感に与える影響については再考する必要があるといえる。そこで、本研究は、EC_{ST}の着用が歩行中の下腿筋群の血液量・筋活動および主観的運動強度に与える影響を明らかにすることを目的とした。

II. 方法

1. 被検者

被検者は健康な成人男性8名(年齢:21.1 ± 0.8歳, 身長:168.0 ± 3.6cm, 体重:60.8 ± 7.2kg; 平均値 ± 標準偏差)であった。被検者の下腿長(右:36.8 ± 1.3cm, 左:36.6 ± 1.5cm), 下腿近位30%周径圍(右:35.6 ± 2.9cm, 左:35.1 ± 2.6cm)および足首周径圍(右:21.3 ± 1.1cm, 左:21.1 ± 1.3cm)に左右差は認められなかった。本実験を行うにあたり、被検者には実験の目的、方法、実験にともなう危険性等について説明し、実験参加の同意を得た。

2. 実験環境および実験プロトコル

全実験日時における室内の温度および湿度の平均値±標準偏差は、24.0 ± 0.9°Cおよび56.6 ± 9.9%であった。立位安静課題として、立位姿勢における被検者の心拍数および右下腿の筋血液量および筋酸素動態を計測した。これらの計測に際して、被検者には、素足の状態で足を肩幅程度に開き、両足に均等に体重がかかるように注意して立位姿勢を3分間保持するように指示した。次に、トレッドミル歩行動作に慣れてもらう目的と、ウォーミングアップを兼ねてトレッドミル(L7 Sport Trainer treadmill, LANDISE)上にて10分間歩行を実施した。トレッドミルの速度および傾斜は1.4 m/s および8度(0度:水平)とした(本試行と同設定)。ウォーミングアップ試行後、心拍数が安静時の値に戻るまで十分に休息をとった。休息後、30分歩行課題を行った。歩行課題は、同日内に20~30分の完全休息を挟んで、コントロールストッキング条件(Control stocking: Con_{ST}条件)および弾性ストッキング条件(EC_{ST}条件)の計2条件実施した。その際、試行の順序は被検者ごと

にランダムに選択した。歩行課題中 5 分毎にボルグスケールによる主観的運動強度を調査した。

3. 測定項目

1). 形態計測および段階的弾性圧迫ストッキングのサイズ

下腿長は、外踝から膝皺までの長さを、周径囲は、下腿近位 30%および脛骨内果上部にて、それぞれメジャーを用いて計測した。周径囲測定の結果、足首の周径囲が 21 cm 未満は M-size を、21 cm 以上のものには L サイズの EC_{ST} (プラスワンマジック® POM-3, AK インターナショナル株式会社)を使用した。両サイズの着圧は足首において 18 ± 3 mmHg, 下腿近位 30%では 14 ± 3 mmHg であった。一方, Con_{ST} は、市販されているサッカー用ストッキング (足首: 8 mmHg, 下腿近位 30%: 8 mmHg)を使用した。本研究においては、スポーツ現場において頻繁に用いられているストッキングとの違いに着目するため、コントロール条件にはサッカー用のストッキングを使用した。このことによって、ストッキングの着用の有無ではなく、段階的な弾性圧迫の有無の影響を検討することができると考えた。

2). 下腿筋血液量および筋酸素動態

近赤外線分光装置 (NIRO-200, 浜松ホトニクス)を用いて、右脚腓腹筋内側頭 (Medial gastrocnemius muscle: MG), および右足ヒラメ筋 (Soleus muscle: SOL) の総ヘモグロビン (Total Hemoglobin: THb)および組織酸素化指標 (Tissue Oxygenation Index: TOI)を測定した。TOI は酸素化ヘモグロビンが THb に占める割合 (%)を表したものであり、近赤外光が通過する組織内のヘモグロビンの酸素飽和度を表している。近赤外線分光装置のプロープは MG の下腿近位 30%部位, SOL は下腿近位 60%部位付近に貼付した。貼付位置は、B モード超音波装置 (SSD-6500, Aloka)を用いて特定した。また、貼付部位の皮下脂肪厚は、MG において 0.4 ± 0.1 cm、SOL で 0.7 ± 0.2 cm であり、被検者間でほぼ同様であった。プロープは、送受光部距離が 4cm に設

定されたものを使用し、両面テープおよびサージカルテープを用いて皮膚上に固定した。得られた信号は A/D 変換機 (Power Lab, AD Instruments)を介してパーソナルコンピュータにサンプリング周波数 2 Hz にて記録した。

3). 表面筋電図および心電図

プリアンプ表面筋電図システム (The Bagnoli-8 EMG System, DELSYS)を用いて MG および SOL の表面筋電図を計測した。表皮の前処理を行った後、プリアンプ内蔵の表面電極 (サイズ: 7×1 mm, 電極間距離: 10mm)を MG の筋腹および SOL の外側部に貼付した。心電図は、マルチテレメーターシステム (WEB-5000, 日本光電)を用いて胸部双極誘導法によって導出した。得られた信号は 1000 倍に増幅された後に、A/D 変換機を介してパーソナルコンピュータにサンプリング周波数 1 kHz にて記録した。

4). 主観的運動強度

歩行中の脚と全身の主観的運動強度をボルグスケール (Borg, 1976)にて 5 分毎に被検者に口頭で評価してもらった。

4. 分析方法

1). 総ヘモグロビンおよび筋酸素化指標

歩行前の THb および TOI の分析区間は、立位安静時の 3 分間のデータのうち終盤 1 分間の波形が安定している区間を選び、その区間の平均値を安静時の値とした。歩行中の THb および TOI は、5 分間毎のデータの平均値を求めた。

2). 表面筋電図および心電図

MG および SOL に貼付した表面電極から得られた信号は、ソフトウェア (Chart ver.5.4, AD Instruments)上で全波整流した後、筋酸素動態と同様の分析区間の平均筋電位を算出した。心拍数は、心電図の R-R 波間隔時間から算出した。心拍数の分析区間は、筋酸素動態

および平均筋電位の分析区間の中から無作為に 3 拍分を抽出し, 3 つの値の平均値を採用した。

5. 統計処理

結果はすべて平均値 \pm 標準偏差で示した。周径囲の試行間の差の検定には, 対応のある t 検定を用いた。歩行課題中および立位安静時の THb, TOI, 平均筋電位, 心拍数および主観的運動強度の検定には, 反復測定による二元配置の分散分析 (ストッキングの種類 \times 時間)を用いた。歩行課題中および立位安静課題の THb および TOI の CON_{ST} 条件と EC_{ST} 条件間の差分は, 反復測定による一元配置の分散分析を用いた。全ての統計分析に対して, 危険率 5%未満を有意とした。

III. 結果

図 1A に, 各条件における歩行課題中および立位安静時の THb および TOI の経時変化を示した。二元配置の分散分析の結果, THb は, 両筋ともに交互作用は

みられず, ストッキングおよび時間の主効果が認められた。つまり, MG および SOL ともに, THb は, 時間の経過にともない有意に増加したが, EC_{ST} 条件の THb が CON_{ST} 条件と比較して有意に低値を示した。一方, TOI は, 交互作用はみられず, ストッキングの主効果は, 両筋ともに確認されなかった。また, TOI の時間の主効果は SOL にのみ観察された。図 1B は THb の CON_{ST} 条件と EC_{ST} 条件との差分 (Δ THb)の経時変化を示している。一元配置の分散分析の結果, Δ THb の経時変化に有意な変化は認められなかった。

歩行課題中の平均筋電位に, 歩行課題開始時から有意な変化は認められず, ストッキングによる主効果も観察されなかった (図 2)。心拍数, 全身および脚の主観的運動強度においても, 条件間で有意な差はみられなかった (図 3)。また, 周径囲は課題前後ともに条件間に有意な差は認められなかった (課題後; 30%部位; 35.6 ± 3.4 vs. 35.7 ± 3.5 cm; CON_{ST} vs. EC_{ST})。

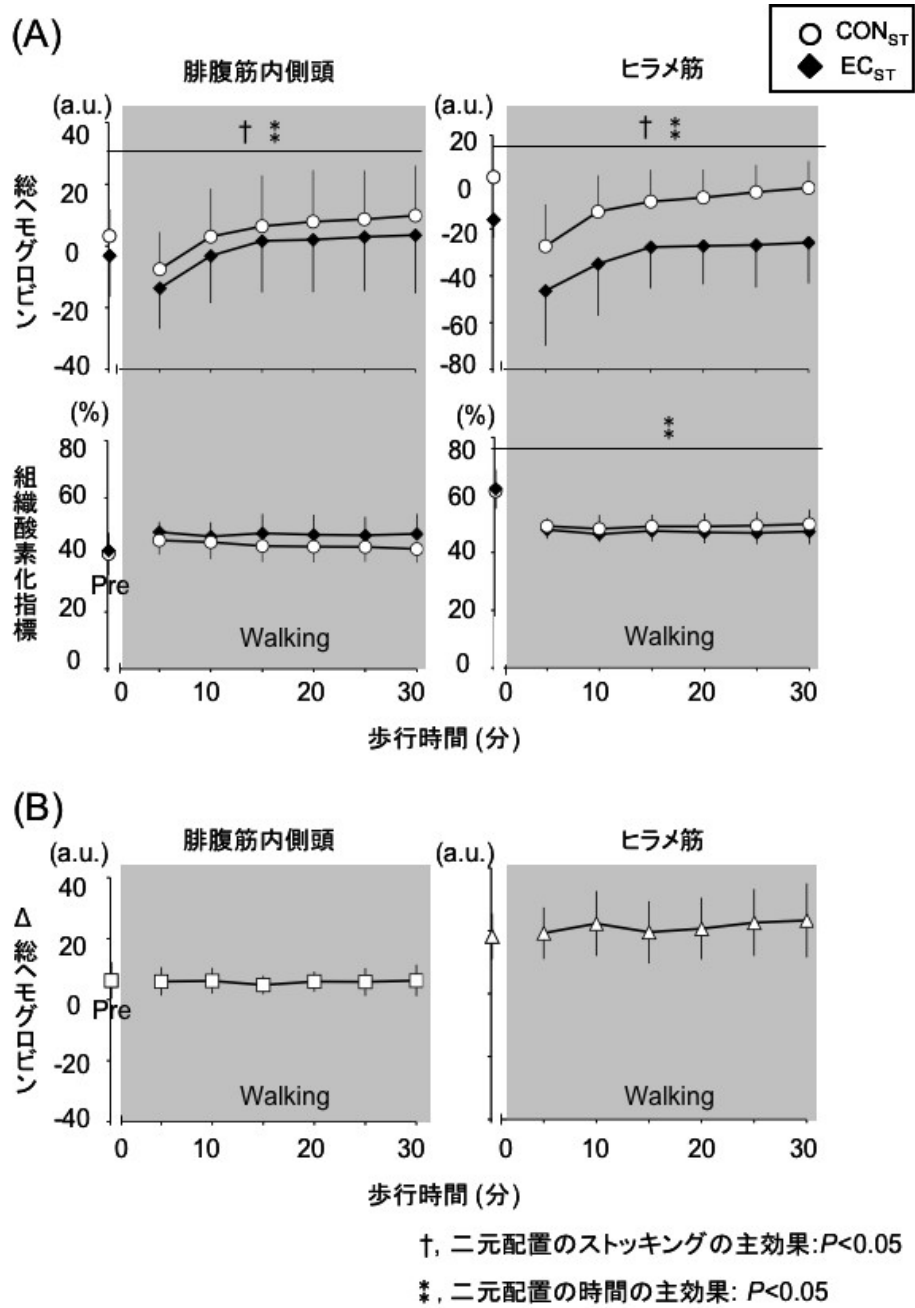


図 1. (A) 立位安静時および歩行時の下腿筋群の総ヘモグロビン量および組織酸素飽和度

(B) 立位安静時および歩行時の下腿筋群の総ヘモグロビン量における条件間の差分 (CON_{ST} 条件-EC_{ST} 条件)

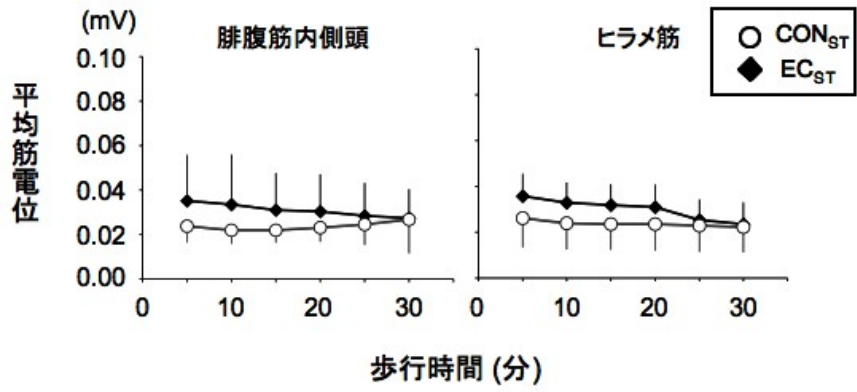


図2. 歩行中の下腿筋群の平均筋電位 (Con_{ST}: ○, EC_{ST}: ◆)

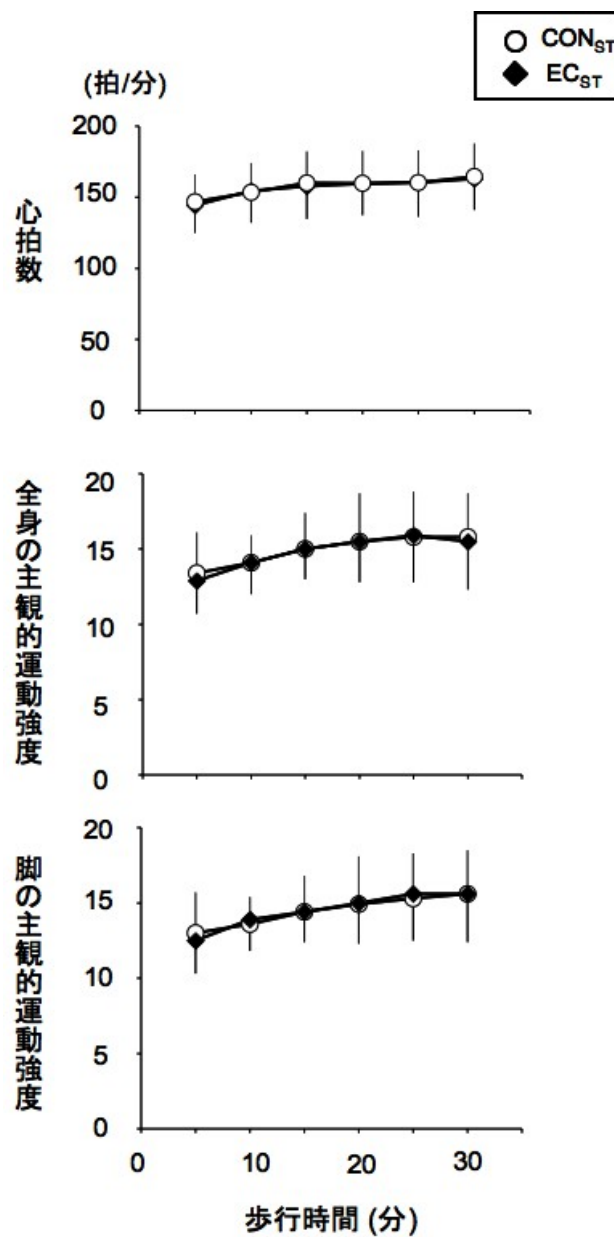


図3. 歩行中の心拍数および主観的運動強度の経時変化 (Con_{ST}: ○, EC_{ST}: ◆)

IV. 考察

本研究で得られた主な知見は以下のとおりである。

- 1) EC_{ST} 着用によって歩行中、立位安静時ともに MG および SOL の THb が低下した。また、その低下量は歩行時と安静時で有意な差はみられなかった。
- 2) 歩行中の心拍数、主観的運動強度（全身、脚）および MG および SOL の平均筋電位に、CON_{ST} 試行と EC_{ST} 試行間で有意な差はみられなかった。

CON_{ST} に比べ EC_{ST} 着用時の MG および SOL の THb は、歩行課題中および立位安静時ともに低値を示した（図 1A）。しかし、両課題の低下量に有意な差は認められなかった（図 1B）。THb は組織内のヘモグロビンの総量の指標であり、筋血液量を反映している。また、NIRS で記録した信号は静脈血流を反映していることが報告されている（Mancini ら, 1994）。Ibegbuna ら（2003）は、air-plethysmography を用いて、EC_{ST} 非着用時と比較して EC_{ST} を着用することにより、歩行中の静脈容積が減少することを報告している。本研究でみられた歩行時および安静時における EC_{ST} 着用による THb の減少は、彼らの結果を支持するものである。しかし、彼らの報告では、歩行中にみられた EC_{ST} 着用による静脈容積の減少量が安静時の減少量と比較してどの程度であったかについては明らかにされていない。本研究の結果は、Ibegbuna ら（2003）の知見に加えて、EC_{ST} によって低下する下腿の静脈血液量は歩行時と立位安静時で変わらないことを示したといえる。

Alimi ら（1994）が報告している立位安静時の下腿筋群の筋内圧（12.7 mmHg）は、本研究で用いた EC_{ST} の着圧（14~20 mmHg）よりも低く、歩行中の接地期および遊脚期の筋内圧の平均値（約 36.1 mmHg）は、EC_{ST} の着圧よりも高い。そのため、安静時と歩行時では筋内圧と EC_{ST} の着圧の関係が変化する。しかしながら、Maton ら（2006）は、EC_{ST}（足首: 23.6 mmHg, 腓骨頭付近: 10.5 mmHg）着用時と非着用時における短縮性収縮中の前脛骨筋の筋内圧と筋電図を測定し、EC_{ST} 着用によって増加する筋内圧の大きさは平均筋電位の大き

さに依存せず一定であることを確認した。この結果は、EC_{ST} の着用が筋内圧を高める効果は、安静時と筋収縮によって筋内圧が増加した条件下とで一定であることを示唆している。Maton ら（2006）の報告はあくまで、等速性の短縮性収縮を対象としたものであり、直接本研究にあてはめることはできない。しかし、本研究においても、EC_{ST} 着用による THb の低下が安静時と歩行時で差がみられなかったことから、EC_{ST} による筋内圧の上昇は安静時と歩行中で同程度であり、このことが下腿血液量の低下に安静時と歩行時で差がみられなかった要因の一つであったと考えられる。

歩行中の MG および SOL の TOI は、交互作用がみられず、時間およびストッキングによる主効果も認められなかった（図 1）。TOI は酸素化ヘモグロビンが THb に占める割合（%）を表したものである。また、筋内の酸素消費量が酸素供給量を上回ると、筋内の酸素化ヘモグロビンは減少し、TOI も低下する。それゆえ、本研究の結果は、EC_{ST} 試行および CON_{ST} 試行ともに、下腿筋群への酸素供給が保たれており、歩行中の筋内で生じる酸素消費の程度においても試行間に差がなかったことを示している。また、歩行中の MG および SOL の平均筋電位は、試行間に有意な差は認められなかった（図 2）。この結果は、EC_{ST} の着用が歩行時の MG および SOL の筋活動に与える影響は少ないことを示唆している。Maton ら（2006a）は、EC_{ST} が最大筋力の 50% の強度で足関節背屈筋力を持続できなくなるまで持続した時の前脛骨筋の平均筋電位に与える影響を検討した結果、EC_{ST} の着用によって平均筋電位は変化しないことを報告しており、本研究は、彼らの結果を支持するものである。THb、TOI および平均筋電位の結果を合わせて考えると、EC_{ST} によって血液量は低下するものの、活動筋への酸素供給が不足する程度ではなかったために、筋疲労はおこらず、筋活動が CON_{ST} 条件と同様となったと解釈できる。低強度の筋収縮によって筋疲労が生じた場合、一定の筋出力に対して平均筋電位が増加する（Edwards と Lippold, 1956）が、本研究の歩行課題時の下腿三頭筋の平均筋電位の経時変化に有意な

増加は認められていない (図 2). そのため, 本研究の歩行課題は下腿三頭筋の筋疲労を引き起こすほどの運動強度ではなかった可能性がある. 今後は, 30 分以上の歩行課題あるいはランニングといった本研究よりも比較的下腿三頭筋への負荷が高い運動課題を用いて, EC_{ST} の着用が主働筋の筋疲労に与える影響については, さらに検討する必要があるだろう.

歩行中の心拍数 (159 ± 21, 159 ± 22 拍/分; Con_{ST} vs. EC_{ST}) に試行間で有意な差はみられなかった (図 3). 段階的弾性圧迫タイツを着用して 15 分間走行した後の心拍数を検討した Berry ら (1990) の報告においても, 非着用時と比較して心拍数に有意な差が認められていない. 心拍出量は心拍数と一回拍出量の積であるため, ある一定の心拍出量に対して一回拍出量が増加すると心拍数は低下する. スターリングの法則に基づくと, 一回拍出量は心臓へ戻る静脈還流量に依存して増減する (真島, 1972). そのため, 心臓へ戻る静脈還流量が増大した場合, 一回拍出量が増大し, 結果として心拍数が減少する. 本研究の結果, 下腿からの静脈還流量は EC_{ST} の着用によって高まることが示唆された. しかし, 心拍数に変化がみられなかったことから, EC_{ST} 着用による下腿からの静脈還流量の増加は, 心臓への静脈還流量の増大させるほどではなかったといえる. また, 心拍数と主観的運動強度には直線関係がみられることから (Borg, 1976), 全身の主観的運動強度において条件間で差がみられなかったことは, 心拍数に条件間で差がなかったことに起因したと考えられる.

歩行前後の下腿周径囲の変化量に両条件ともに有意な差は認められなかった. この結果は, 歩行課題中に下腿の血液が過度に増加したり, むくみが生じたりしていないことを示している. また, 下腿の周径囲に変化がみられなかったことは, 脚の主観的運動強度に条件間で差がみられなかったことに関与したと推察される. 熊澤ら (2005) は, 長時間 (10 時間前後) の飛行機移動前後の下腿周径囲の増加率を検討し, EC_{ST} の着用により周径囲の増加率が低下し, 到着地での疲労感が軽

減したことを報告している. また, Hirai ら (2006) は, 三次元形状測定法を用いて, 健常女性 10 名の下腿周径囲および体積を朝と夕に測定し, EC_{ST} 非着用時には周径囲が 3.6~6.9% 増加したが, EC_{ST} 着用時には, 周径の増加は認められていないとしている. 本研究の結果と先行研究の報告 (熊澤ら, 2005; Hirai ら, 2006) をあわせて考えると, 8~12 時間程度の立位や座位姿勢保持による下腿血液貯留や主観的な疲労感に対しては EC_{ST} の着用が効果的であるといえるが, 30 分程度の運動では, 運動性充血や立位姿勢持続による下腿血液貯留量の変化は少なく, 主観的疲労度への影響は少ないと考えられる.

本研究は, EC_{ST} の着用が, 30 分間歩行中の下腿における筋血液量・筋活動および主観的運動強度に与える影響を検討した. その結果, EC_{ST} による THb の減少に立位安静時と歩行中とで有意な差はみられなかった. また, 歩行中の心拍数, 平均筋電位および主観的運動強度に差はみられなかった. これらの結果から, EC_{ST} の着用によって, 立位安静時と歩行中で同程度の筋ポンプ作用が観察されるが, 30 分程度の歩行中の筋活動および主観的運動強度を軽減する効果は少ないことが示された.

V. 参考文献

- Alimi YS, Barthelemy P, Juhan C. (1994) Venous pump of the calf: a study of venous and muscular pressures. *J Vasc Surg* 20: 728-735.
- Berry MJ, Bailey SP, Simpkins LS, TeWinkle JA. (1990) The effects of elastic tights on the post-exercise response. *Can J Sport Sci* 15: 244-248.
- Borg GA. (1976) Perceived exertion: a note on "history" and methods. *Med Sci Sports* 5: 90-93.
- Bringard A, Denis R, Belluye N, Perrey S. (2006) Effects of compression tights on calf muscle oxygenation and venous pooling during quiet resting in supine and standing positions. *J Sports Med Phys Fitness* 46: 548-554.

- Edwards RG, Lippold OC. (1956) The relation between force and integrated electrical activity in fatigued muscle. *J Physiol* 132: 677-681.
- Hirai M, Nukumizu Y, Kidokoro H, Hayakawa N, Iwata H, Nishikii N, Sho K, Tsujisaka T, Komatsubara R. (2006) Effect of elastic compression stockings on oedema prevention in healthy controls evaluate by a three-dimensional measurement system. *Skin Research and Technology* 12: 32-35.
- Ibegbuna V, Delis KT, Nicolaides AN, Aina O. (2003) Effect of elastic compression stockings on venous hemodynamics during walking. *J Vasc Surg* 37: 420-425.
- Mancini DM, Bolinger L, Li H, Kendrick K, Chance B, Wilson JR. (1994) Validation of near-infrared spectroscopy in humans. *J Appl Physiol* 77: 2740-2747.
- Maton B, Thiney G, Dang S, Tra S, Bassez S, Wicart P, Ouchene A. (2006a) Human muscle fatigue and elastic compressive stockings. *Eur J Appl Physiol* 97: 432-442.
- Maton B, Thiney G, Ouchène A, Flaud P, Barthelemy P. (2006b) Intramuscular pressure and surface EMG in voluntary ankle dorsal flexion: Influence of elastic compressive stockings. *J Electromyogr Kinesiol* 16: 291-302.
- 早田 剛, 三浦 隆, 岩寄 徹治, 宮地 元彦. 段階的弾性ストッキング着用による下腿圧増加が下腿静脈コンプライアンスを増加させる. (2006) 体力科学 55: 421-428.
- 熊澤 祐輔, 稲福 全人, 青木 治人. (2005) スポーツ活動に及ぼす医療用弾性ストッキングの効果について. 臨床スポーツ医学 22: 569-574.
- 真島英信. (1972) 生理学, 第 6 版, 金芳堂, p 255-272.