

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K10910

研究課題名（和文）等張性運動時の下肢着圧衣の心臓循環系機能への効果に関する研究

研究課題名（英文）Study on autonomic nervous system activity with compression socks on lower limbs in isotonic exercise

研究代表者

中村 英夫（Nakamura, Hideo）

大阪電気通信大学・医療健康科学部・准教授

研究者番号：40411475

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、自転車エルゴメータを用いた運動負荷での心拍数、心臓自律神経系活動と筋活動について靴下着圧の強度の違いで差異が認められるかを調査した。被験者は健常若年男子とし、自転車エルゴメータによる運動とその前後の安静時で心拍解析、筋活動計測を行った。従来研究と同様に、強着圧靴下着用時の方が、弱着圧靴下着用時よりも心拍数の有意水準5%で低下が回復過程において認められた。また、心臓自律神経系活動についても、有意水準5%ではわずかに有意差とならないものの、強着圧靴下着用時で心臓自律神経系活動が総体的に上昇する傾向を示した。大腿部筋群は下腿部の靴下着圧に影響を及ぼさない可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、多くの研究者らが着圧衣の効果について積極的な効果を認めている。しかし、着圧衣の生理学的なメカニズムは未だ不明である。本研究では、自転車エルゴメータによる運動負荷を与えた際の心拍数及び心臓自律神経系活動と筋電図による筋活動計測も含め、靴下着圧の強度が高い場合と低い場合の2種類で差異が認められるかについて検討した。従来研究と同様に、強着圧靴下着用時の方が、弱着圧靴下着用時よりも心臓循環系機能を補助する活動となることが結果により示された。結果より、運動中における下腿着圧衣効果の科学的根拠を示したものであり、関連分野への寄与が大きく、高い関心を得られることから意義があるといえる。

研究成果の概要（英文）：This study is to investigate the difference of cardiovascular activity between the pressure of compression socks by means of heart rate, heart rate variability, and muscle activity of the femoral region. Twelve young subjects were participated and their heart rates during the ergometer exercises and seated positions were recorded. Like our previous reports, the heart rates in higher pressure socks are lower than lower ones. Also, autonomic nervous system activities in higher pressure socks are higher than lower ones. There are little difference of muscle activities around femoral region by means of EMG analysis.

研究分野：生体信号解析

キーワード：着圧衣 心拍数 心拍変動解析 等張性運動

1. 研究開始当初の背景

申請者らの研究グループでは、等張性筋収縮のように動作をともなう筋収縮運動で靴下着圧効果を確認し、かつ着圧に比例してその効果が増大することをすでに示している。本申請研究における「着圧効果」とは、心拍数及び心拍変動解析によって得られた心拍数の抑制、心臓自律神経系活動の亢進ことを指し、靴下着圧による静脈還流促進が心臓循環系機能の補助的機能を指している。着圧衣による心身への生理学的効果については、弾性ストッキングが医療機器として厚生労働省からの認可をうけて販売されていることより、下肢血流促進効果についてはすでに社会的に認知されている。弾性ストッキングは主に下肢静脈瘤の生成抑制や痩身効果を謳っている。スポーツ分野においてもサッカーやランニングといった有酸素運動を必要とするような競技における着圧衣の効果を調査する報告が多くある。医療用途として着圧衣の効果が認められる状況において、スポーツ分野において利用できるか検討することは当然といえよう。Brophy-Williams¹⁾は、着圧衣によりランニング時のパフォーマンス改善が認められたと報告している。ただし、酸素摂取量、乳酸値等には差がみられなかったとも報告していることから、生理学的なメカニズムについては不明と結論付けている。Marques-Jimenez²⁾は、サッカーの試合後の回復過程に着圧衣の着圧は効果を与えそうであるとの報告を与えている。Ehrstrom³⁾は、ダウンヒル走で着圧衣を着用することで筋機能回復効果を認めることを示唆している。

現在、多くの研究者らが着圧衣の効果について積極的な効果を認めている。しかし、着圧衣の生理学的なメカニズムについての科学的な根拠を与える報告はいまだに十分示されていない⁴⁾。しかし、着圧衣の生理学的なメカニズムについて示唆を与える実験室環境における精密な実験ではその根拠が示されつつある。Kelly⁵⁾は、着圧衣によってティルティングテーブルにより身体を傾けることによって強制的に身体の血流を制御し、自律神経系活動の影響を観察する実験を実施した。その結果、着圧衣によって頻脈が抑制されることが認められた。つまり、着圧衣が心拍数及び心臓自律神経系活動に影響する科学的根拠が示された。また、Nguyen⁶⁾は、着圧衣が心電図のQT、ST間隔や心拍数にも影響を与えることを報告し、心拍数及び心臓自律神経系活動に影響を与える結果を示唆している。また、Hockin⁷⁾は、断続的カフ圧刺激を下腿筋群に加えることで下肢滞留物の還流や心臓循環を改善する示唆を与えている。つまり、断続的な圧刺激が静脈還流を促進している可能性を示している。以上より、本申請内容である等張性収縮時の靴下着圧効果の科学的根拠を実験的に示すことができるものと推察される。よって、本申請研究を遂行することはスポーツ分野における科学的根拠を与えられる点において高い意義が見込まれる。

本研究グループの従来研究では、段階的着圧によって、着圧強度が変化に依存して心拍変動による心拍数及び心臓自律神経系活動に一定の差異が認められる結果を得た。特に心拍数については、着圧強度が増大すると、有意な低下が認められ、心臓自律神経系活動は抑制的になることが観察された。また、運動様式も筋運動をともなわない等尺性収縮時より、筋運動をともなう等張性収縮時にその効果が大きく表れることをすでに確認している。

2. 研究の目的

今回の申請研究では、実際の動作をともなう運動として自転車エルゴメータを選択し、被験者に対して運動負荷を与えた際の心拍数及び心臓自律神経系活動と、新たに筋電図による筋活動計測も含め、靴下着圧の強度が高い場合と低い場合の2種類で差異が認められるかについて検討することを目的とした。つまり、実際の運動時において靴下着圧効果が認められるかについての科学的根拠を示すことが本研究の目標である。

また、本研究では、心臓自律神経系活動の計測指標としてトーン-エントロピー法と使用している。トーン-エントロピー法は従来法である周波数パワースペクトル解析等の解析方法と比較して精度が高いことが示されている。本申請研究において、運動時における心臓自律神経系計測においてもトーン-エントロピー法が従来法より精度が高く計測できることを示すことも合わせて目的とする。

3. 研究の方法

本研究グループにおける従来までの調査研究と同様に着圧衣を着用した際の心臓自律神経系機能を計測するために心拍変動解析としてトーン-エントロピー法を使用する。本申請研究では、等張性運動負荷を与える機器として自転車エルゴメータを用い、靴下着圧効果を比較検討した。また、下肢筋力への影響についても検討を加えるために、今回の申請研究では、大腿直筋及び半腱様筋外側頭における筋電図を記録し、それらの筋活動について比較検討を実施する。

被験者は健康若年男子12名(年齢 21.4 ± 1.6 歳)とした。いずれもこれまでに下肢筋や心臓循環系に関する疾患や傷害がなかったことを事前に確認した。本実験に関しては、大阪電気通信

大学生体倫理委員会の承認を得ている（生倫認 17-007）。被験者には実験前に実験内容についての具体的な説明を実施し、内容について理解したことを確認してから実験に参加してもらった。

着圧靴下は株式会社キタイが製造した。今回は強着圧靴下及び弱着圧靴下の相対的に着圧に差異のある 2 種類の着圧靴下を利用し、本稿では着圧の高い靴下を「強着圧靴下（最大着圧 30.0mmHg）」、着圧の低い靴下を「弱着圧靴下（最大着圧 11.0mmHg）」と呼ぶこととする。

次に、図 1 に本実験における実験手順を示す。実験開始より 5 分間安静座位の姿勢を維持してもらい（Rest1）、Rest1 は運動前の心身の状態を把握するための基準データとして用いる。次に、被験者は 30 秒かけて自転車エルゴメータに乗る。測定開始から 5 分 30 秒から運動を始める。運動開始時の負荷は 20W とし、30 秒ごとに 20W ずつ段階的に負荷を増大させ、100W に達するまで負荷を上げる（Warm-up）、7 分 30 秒で 100W に達したのち 5 分間継続して漕ぎ続けてもらう（Exercise）、Exercise で自転車エルゴメータのペダルを漕ぐ際の一回転速度が 60bpm で一定となるようリズム音に合わせて被験者が一定の回転数を維持するようにした。Exercise 終了後、被験者は自転車エルゴメータから降り、再度椅子に 30 秒以内に座らせる。実験開始から 13 分後より再度安静座位姿勢で安静状態を記録する。運動後の安静状態は合計 10 分間連続して記録する。運動後安静時の前半 5 分間を Rest2_1、後半 5 分間を Rest2_2 として運動後の心臓自律神経系の回復過程について評価する。

4. 研究成果

図 2 に強着圧靴下着用時（赤実線）及び弱着圧靴下着用時（青実線）における心拍数の変化過程の一例を示す。最初の 5 分間と 13 分以降が安静座位の心拍数を示し、5 分 30 秒から 12 分 30 秒までが自転車エルゴメータ運動負荷時の心拍数の変化過程を示している。開始当初の 5 分間の安静時においては、図 5 の例では赤実線と青実線とを比較するとおおよそ同程度の心拍数に見える。しかし、13 分目以降の回復過程を示す区間では、見た目には弱着圧靴下着用時の方が心拍数は高くなっていることがわかる。また、運動時でも若干ではあるが、弱着圧靴下着用時の方が、心拍数は高いように見受けられる。

被験者 12 名での心拍数の平均分布を各区間で評価した結果を述べる。統計処理として各段階の心拍数に対して対応のある t 検定を適用した。結果、Rest1 では有意差はみられなかった。また、Rest2_1 及び Rest2_2 の運動後のいずれの安静時においても強着圧靴下着用時に有意な心拍数の低下が $p < 0.01$ で観測された。つまり、回復過程において有意な心拍数の低下がみられた。このことは従来までの研究報告と同様の傾向を示している。以上の結果から、定常過程よりも回復過程のように身体的活動の過渡的な段階において変化がみられる可能性を示唆している。それに対して、自転車エルゴメータ運動負荷が一定な、一定負荷時においては有意な心拍数の変化は観測されなかった。

次に、心臓自律神経系活動の変化過程を比較するために心臓自律神経系活動の総体を表す

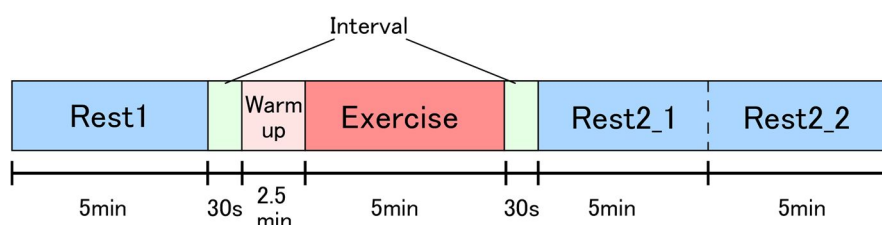


図 1 実験手順

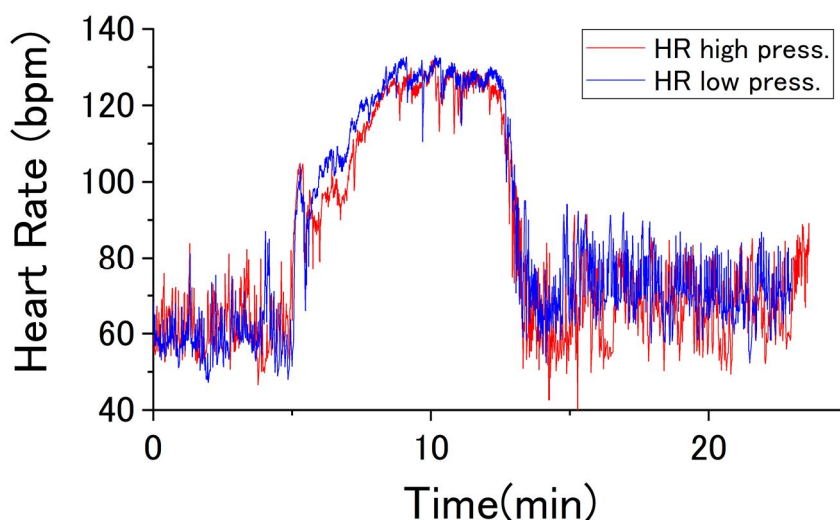


図 2 靴下着圧による心拍数変化過程

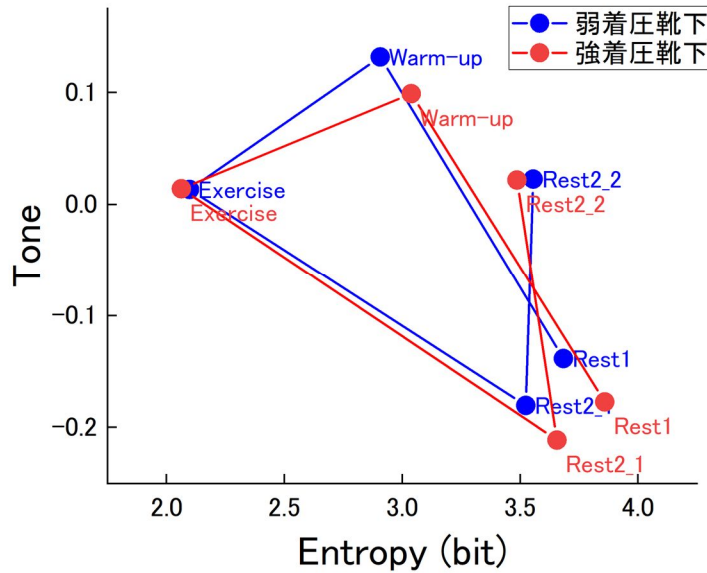


図3 強着圧と弱着圧靴下でのトーン-エントロピー点描図の変化過程

Entropy に着目して各区間における着圧の効果について比較する。結果、 $p < 0.05$ で統計的な有意な差異はいずれの区間でも観測されなかった。しかし、安静時 2_1 の段階で有意ではないものの p 値が 0.054 であり強着圧でエントロピーが増大し、副交感神経系活動の増大が一定程度みられた。安静時 2_1 での際は心臓自律神経系活動の過渡的な変化過程によるものである可能性が高い。段階的負荷時では、強着圧靴下着用時において Entropy が 3.04 ± 0.76 bit、弱着圧靴下着用時では 2.91 ± 0.83 bit と強着圧靴下着用時の方が高値を示している。安静時 2_1 では、強着圧靴下着用時では、 3.66 ± 1.10 bit、対する弱着圧靴下着用時では 3.52 ± 1.19 bit とこちらも強着圧靴下着用時に高値を示す結果となった。Entropy が高値を示すことは、心臓自律神経系活動が総体的に活発であることを示し、安静時には特に副交感神経系活動が活発であることを示している。過渡的な過程においては交感神経系活動による心拍変動も含む可能性があることから、段階的負荷時には交感神経系及び副交感神経系のいずれもが活発である可能性が示唆される。Entropy の標準偏差が比較的大きく、本実験の被験者間の心臓自律神経系活動に大きさ差異がみられることが検定の結果に影響を及ぼしている可能性がある。

トーン-エントロピー点描図を図 3 に示す。トーン-エントロピー点描図は各区間の心臓自律神経系活動の変化を視覚的に理解することができる。図 3 より、Rest1 及び Rest2_1 が右下に分布している。トーン-エントロピー分布で安静時に右下に点描が位置することは、副交感神経系活動が亢進していることを示す。安静座位姿勢で測定していることから、適切な生理的状態推移であると考えられる。また、本実験に参加してもらった学生らは 20 代前半であり、従来までの研究報告における 20 代の安静座位時における平均分布として紹介されている 4.1 bit 近傍と比較するとエントロピーはやや低いところに分布しているが、差異があるとまで認められるものではない。図 8 の各区間での点描位置の差異について詳細に観察すると、Warm-up において強着圧靴下着用時の方がエントロピーが高く、トーンが低い結果となっており、副交感神経系活動が亢進もしくは交感神経系活動が抑制されている可能性が示唆される。また、Rest2_1 でも強着圧靴下着用時でエントロピーが高く、トーンが低くなっており、同様に副交感神経系活動の亢進もしくは交感神経系活動の抑制が働いている。

本研究結果より、従来の調査研究で明らかになった等張性収縮時の靴下着圧効果による心臓自律神経系活動の亢進と心拍数の低下が、強着圧靴下着用時に自転車エルゴメータ運動負荷を与えた際に類似の結果を与えた。従来までの調査結果では、等張性運動時には靴下着圧の着圧が増大するほど、心拍数が低下することが結果より示された。靴下着圧が皮膚表面上の毛細血管を圧迫し、静脈還流を促進することが推測される。静脈還流の増大によって、上体の血圧が上昇し、大動脈部にある圧受容器を圧刺激した神経性信号が孤束核へと投射され、疑核を亢進して心臓の副交感神経活動を賦活させることで心拍数を低下させる経路があることが知られている。心拍数を低下させることで血圧上昇を防ぐためのネガティブ・フィードバックループが形成されており、血圧が一定に保たれている。つまり、靴下着圧を下腿部に加えることにより、本来であれば下腿からの静脈還流を心拍数上昇によって補助する機能を担っていると推察する。実際に、従来までの研究報告でも示してきた通り、等尺性収縮時のように動作をとまなわない筋収縮では血流が促進されることはなく、心拍数の低下も等張性収縮のような動作をとまなうような運動と比較すると限定的であった。この事実は動作をとまなう運動では血流を阻害しないことが、上記の機能を促進することに寄与していることを支持する。また、等張性収縮において靴下着圧を段階的に増大させるにしたがって、心拍数が低下する程度も大きくなることが従来までの結果で明らかとなっている。このことは靴下着圧強度が心拍数と比例関係にあることを示して

り、先述の血圧調節機構の影響が推察される重要な状況証拠として考えられる。今回の結果は、実際に自転車エルゴメータでの運動時における靴下着圧効果を評価した点で、これまでの限定的動作における結果から一歩進んだ研究であるといえる。本研究結果は、従来までの研究結果も含め、靴下着圧が自転車エルゴメータのような周期的な動作をするような運動時においても心臓自律神経系活動を亢進し、かつ心拍数の低下に寄与することが結果として明らかとなった。以上から、本研究結果は靴下着圧が実際のスポーツの場面においてパフォーマンス向上や疲労回復といった近年の研究報告で示された結果を支持する内容であると同時に、それらの生理学的な機序を示す一助となるデータを示すものであると考える。

本研究では若年健常男子 12 名を対象に自転車エルゴメータ運動時における強着圧及び弱着圧靴下着用時の心拍変動による心臓自律神経系活動及び心拍数を評価した。結論として、従来研究と同様に、強着圧靴下着用時の方が、弱着圧靴下着用時よりも心拍数の有意な低下が、段階的負荷時及び回復過程において認められた。また、心臓自律神経系活動についても、有意水準 5%ではわずかに有意差は見られなかったものの、強着圧靴下着用時で心臓自律神経系活動が総体的に上昇する傾向を示した。つまり、靴下着圧は自転車エルゴメータ運動時においても適切な血圧調整のために静脈還流を促し、血圧低下を抑止する効果を担っており、心臓への負担を軽減する可能性が示唆された。

参考文献

- 1) N. Brophy-Williams, M. W. Driller, C. M. Kitic ほか. Wearing compression socks during exercise aids subsequent performance. *Journal of Science and Medicine in Sport*. 2019, Vol.22, No.1, p.123-127.
- 2) D. Marques-Jimenez, J. Calleja-Gonzalez, I. Arratibel ほか. Physiological and physical responses to wearing compression garments during soccer matches and recovery. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*. 2018, Vol.58, No.11, p.1642-1651.
- 3) S. Ehrstrom, M. Gruet, M. Giandolini ほか. Acute and Delayed Neuromuscular Alterations Induced by Downhill Running in Trained Trail Runners: Beneficial Effects of High-Pressure Compression Garments. *Frontiers in Physiology*. 2018, Vol.9, p.18.
- 4) N. M. de Sousa, R. F. Magosso, G. B. Pereira ほか. Acute cardiorespiratory and metabolic responses during resistance exercise in the lactate threshold intensity. *Int J Sports Med*. 2012, Vol.33, No.2, p.108-113.
- 5) K. L. Kelly, C. P. Johnson, L. E. Dunne ほか. Active compression garment prevents tilt-induced orthostatic tachycardia in humans. *Physiological Reports*. 2019, Vol.7, No.7, p.6.
- 6) L. T. N. Nguyen, D. Eager, H. Nguyen. The relationship between compression garments and electrocardiogram signals during exercise and recovery phase. *Biomedical Engineering Online*. 2019, Vol.18, p.10.
- 7) B. C. D. Hockin, I. A. Ruiz, G. K. Brar ほか. Intermittent calf compression reverses lower limb pooling and improves cardiovascular control during passive orthostasis. *Autonomic Neuroscience-Basic & Clinical*. 2019, Vol.217, p.102-113.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nakamura Hideo	4. 巻 2021
2. 論文標題 Study on autonomic nervous system activity with compression socks on lower limbs in isotonic exercise	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Impact	6. 最初と最後の頁 69～71
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21820/23987073.2021.5.69	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 中村英夫, 田川統基
2. 発表標題 脈波計による心臓自律神経系活動計測の妥当性について
3. 学会等名 第58回日本生体医工学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村英夫, 片山博志, 喜多輝昌
2. 発表標題 心拍変動による自転車エルゴメータ運動中における靴下着圧効果について
3. 学会等名 日本繊維製品消費科学会 2019年年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nakamura H., Tagawa M.
2. 発表標題 Pitfall of heart rate variability analyses for autonomic nervous system activity with photoplethysmography
3. 学会等名 41st Engineering in Medicine and Biology conference 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上貴文、高安健太、吉田建志、中村英夫
2. 発表標題 前腕表面筋電図による外科手技技能評価についての検討
3. 学会等名 MEとバイオサイバネティックス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田川統基、中村英夫
2. 発表標題 心電図と脈波による心臓自律神経系活動の計測時間短縮化の可能性
3. 学会等名 MEとバイオサイバネティックス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村 英夫、片山 博志、喜多 輝昌
2. 発表標題 等張性筋収縮運動時の靴下の段階的着圧変動にともなう心臓循環系動態に関する検討
3. 学会等名 第25回日本バイオメカニクス学会大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------