

長時間のペダリング運動中のコンプレッションウェア着用が筋酸素動態，糖代謝および運動パフォーマンスに及ぼす影響

立命館大学
日本学術振興会
特別研究員

水野 沙 洸

Effect of Wearing Compression Garments on Muscle Oxygenation, Glucose Metabolism and Exercise Performance During Prolonged Pedaling

by

Sahiro Mizuno

*Graduate School of Sport and Health Science,
Ritsumeikan University*

Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science

ABSTRACT

The purpose of the present study was to determine effect of wearing compression garments (CG) with different pressure level on muscle oxygenation, glucose metabolism and exercise performance during prolonged pedaling. Ten triathletes (19.9 ± 1.2 years, 172.2 ± 4.4 cm, 62.0 ± 3.8 kg, BMI; 20.9 ± 0.7 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$; $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$; 59.3 ± 4.4 $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) completed three trials on different days, consisting of ¹⁾ exercise with wearing CG which exerted high pressure on the thigh (approximately 40 hPa, HIGH) ²⁾, exercise with wearing CG which exerted moderate pressure on the thigh (approximately 20 hPa, MED) ³⁾, exercise with normal sport garments which exerted low pressure on the thigh (below 10 hPa, CON). Each trial was performed with randomized orders, and four weeks of washout period were provided between the trials. The exercise consisted 90 min of pedaling at 65% of maximal oxygen uptake ($\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$). Time-courses of changes in heart rate (HR), ratings of perceived exertion (RPE), oxy-hemoglobin, exogenous glucose utilization (¹³C glucose) and respiratory

variables were evaluated during 90 min of pedaling. After completing 90 min of pedaling, time to exhaustion (TTE) test was conducted at 85% of $\dot{V}O_{2max}$.

Exercise rapidly increased ^{13}C excretion, but highest value of ^{13}C excretion was shown earlier in the MED trial (47.1 ± 9.9 min) compared with in the other trials (HIGH trial; 67.3 ± 23.7 min, CON trial; 53.95 ± 9.5 min, $P < 0.05$). No significant difference was observed for changes in other variables and TTE among the trials. In conclusion, wearing CG which exerted 20 hPa on the thigh facilitated exogenous glucose utilization during 90 min of pedaling.

要 旨

本研究では、長時間のペダリング運動中における着圧の異なるCGの着用が、筋酸素動態および糖代謝に及ぼす影響を検討することを目的とした。男性トライアスロン競技選手10名を対象に、運動時に①強圧（約40hPa）の着圧が大腿部に施されるCG（強圧条件）、②弱圧（約20hPa）の着圧が施されたCG（弱圧条件）、③着圧を施さない（10hPa以下）タイツ（コントロール条件）のいずれかを着用する測定を、それぞれ異なる日に実施した。運動には、最大酸素摂取量の65%に相当する負荷での90分間のペダリングを用いた。運動中は、筋酸素動態（酸素化ヘモグロビン）、糖代謝（ ^{13}C 標識グルコースの利用動態により評価）、心拍数、主観的運動強度の経時変化を検討した。運動中の ^{13}C 排出量の最高値は、弱圧条件が強圧条件およびコントロール条件と比較して早期に出現した（ $P < 0.05$ ）。組織酸素飽和度、心拍数および主観的運動強度の変化の動態には、条件間での有意差は認められなかった。90分間のペダリング運動中における大腿部に弱圧（約20hPa）を施したCGの着用は、血中グルコースの利用を変化させることが明らかとなった。

緒 言

コンプレッションウェア（Compression

garment；CG）とは、身体に適度な着圧が課されるように設計されたスポーツウェアの総称である。著者らはこれまでに、ランニング中におけるCG着用は、運動に伴う心拍数の上昇や下肢筋力の低下、筋損傷・炎症反応の亢進を有意に抑制することが明らかにしてきた^{1,2)}。一方で、ペダリング運動中のCG着用の効果を検討した研究はさきわめて少ない。先行研究では、ペダリング運動中のCG着用に伴い、無酸素性作業閾値下での仕事量が増加すること³⁾、活動筋での酸素化レベルが亢進すること⁴⁾が認められており、これらの要因として、CGの着圧に伴う「活動筋での血液量の増加」や「代謝物の除去促進」が示唆されている。このことから、ペダリング運動中におけるCG着用の効果には、骨格筋における酸素利用率の亢進や、糖取り込みの促進などの関与が予想される。しかし、これら要因が、CG着用に伴う活動筋の代謝・循環動態の改善に関連していることを示した研究は存在しない。また、運動中におけるCG着用の効果を得る上では、至適な着圧が存在することが認められているが¹⁾、ペダリング運動中のCG着用が運動パフォーマンスの改善にもたらす効果を、着圧の相違まで考慮して検討した研究はみられない。そこで本研究では、長時間のペダリング中における異なる着圧のCGの着用が、下肢筋群における酸素動態、糖代謝エネルギー代謝および運動パフォーマンスに及ぼす影響を着圧の相

違と関連づけて検討することを目的とした。

1. 方法

1. 1 対象者

男性トライアスロン競技選手 10 名 (19.9 ± 1.2 years, 172.2 ± 4.4 cm, 62.0 ± 3.8 kg, BMI; 20.9 ± 0.7 kg·m⁻²; $\dot{V}O_{2\max}$; 59.3 ± 4.4 ml·kg⁻¹·min⁻¹) を対象に、以下の 3 条件を異なる日に実施した。

1. 1. 1 強圧条件

大腿部に 40hPa の着圧が課された CG を運動中に着用する条件

1. 1. 2 弱圧条件

大腿部に 20hPa の着圧が課された CG を運動中に着用する条件

1. 1. 3 コントロール条件

大腿部に 10hPa 以下の着圧が課されたタイツを運動中に着用する条件

実験期間を通して、被験者は合計 6 回実験室へ入室した。最初の入室時には、詳細な実験に関する説明を行い同意書への署名を得た。2 回目の入室では、各条件での運動実施時における走速度を決定するために、最大酸素摂取量を測定した。3 回目の入室では、各条件で使用する CG の着圧を専用の着圧センサーを用いて測定した。4～6 回目の入室では、3 条件の中のいずれかの条件での測定を実施した。いずれの条件においても、被験者は前日 22 時以降に食事を摂取しない状態で、午前 8 時に実験室へ集合した。

運動には、90 分間のペダリング運動（最大酸素摂取量の 65% に相当する運動負荷、85 回転／分）を用いた。また、90 分間のペダリング運動終了 5 分後から、定常負荷でのペダリング運動を実施し、疲労困憊に至るまでの継続時間を評価した（最大酸素摂取量の 85% に相当する運動負荷、85 回転／分）。

1. 2 測定項目

90 分間にわたるペダリング運動中は以下の項目を測定した。

1. 2. 1 心拍数および主観的運動強度

運動中は 90 分間にわたり、胸部無線式ハートレートモニター（RCX3, Polar 社）を用いて心拍数を測定した。また、10 分毎に脚および呼吸の主観的疲労感を評価した。

1. 2. 2 筋酸素動態

運動 10 分、20 分、30 分、40 分、50 分、60 分、70 分、80 分、90 分経過時に、近赤外線分光装置（Hb14-2, アステム社）を用い、外側広筋（大転子-膝間の遠位 50% 部位）における酸素化ヘモグロビンを評価した。本装置のプロープにおける送光部と受光部の距離は 3cm であったことから、測定範囲は体皮表面より約 1.5cm 程度であった。測定中、プロープは防水機能をもったサージフィルムを用いて皮膚上に固定した。運動中における測定値は安静時に対する相対値によって示した。安静時の測定は、各条件でのウェア着用下で行った。安静時の姿勢は立位安静とし、測定開始後、値が定常状態となることを確認した後に、30 秒間の平均値を安静時の測定値として採用した。サンプリング周波数は 5Hz とした。

1. 2. 3 糖代謝動態

運動 10 分、20 分、30 分、40 分、50 分、60 分、70 分、80 分、90 分経過時における外因性グルコースの利用動態（¹³C 排出量）を安定同位体呼気試験により評価した。運動開始直前に安定同位体により標識したグルコース（¹³C グルコース）500mg を経口摂取し（100ml の蒸留水に溶解）、運動中は規定の時点で専用のバッグに呼気を採取した。その後、赤外分光分析装置（POCone, 大塚電子社）を用いて呼気中に含まれる ¹³CO₂/¹²CO₂ 比を測定した。また、この際は運動開始前（¹³C グルコース摂取前）に採取したベースラインの呼気サンプルと運動中に採取した

$^{13}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2$ 比の差分を評価した。その後、先行研究における計算式を用いて、単位時間あたりの ^{13}C 排出量に換算した。

1. 2. 4 呼気ガス指標

運動 15 分、30 分、45 分、60 分、75 分、90 分経過時の呼気ガス指標を評価した。呼気の測定には、代謝分析測定機 (AES300S, ミナト医科学社) を用い、酸素摂取量 ($\dot{V}\text{O}_2$)、二酸化炭素排出量 ($\dot{V}\text{CO}_2$)、分時換気量 ($\dot{V}\text{E}$)、呼吸交換比 (RER) を breath-by-breath 法により評価した。

1. 2. 5 運動継続時間

90 分間のペダリング運動終了 5 分後から、定常負荷でのペダリング運動 (最大酸素摂取量の 85% に相当する強度) を実施し、疲労困憊に至るまでの運動継続時間を評価した。運動中の回転数は 85rpm に規定し、70rpm を 5 秒間下回った時点を疲労困憊と規定した。

1. 3 統計解析

すべての測定値は、平均値 \pm 標準偏差で示した。心拍数、主観的運動強度 (脚・呼吸)、筋酸素動態、 ^{13}C 排出量、呼気ガス指標の時間経過に伴う平均値の差の検定には、反復測定による二元配置の分散分析 (two-way ANOVA) を用い、交互作用および主効果 (条件、時間) の有無を検定した。ANOVA により交互作用または主効果が認められた場合には、Tukey-Kramer test により多重比較検定を行った。 ^{13}C 排出量の最高値出現時間および運動継続時間の平均値の差の検定には、一元配置の分散分析 (one-way ANOVA) を用いた。なお、有意性の検定には危険率 5% 以下を採用した。

2. 結果

2. 1 心拍数および主観的運動強度

運動中の HR、脚および呼吸の RPE は、いずれの条件においても運動に伴い有意に上昇した

($P < 0.05$)。しかし、交互作用および条件の主効果は認められなかった ($P > 0.05$)。

2. 2 筋酸素動態

図 1 には、運動中の酸素化ヘモグロビンの経時変化を示した。組織酸素飽和度の変化には、条件および時間の主効果、交互作用のいずれも認められなかった ($P > 0.05$)。

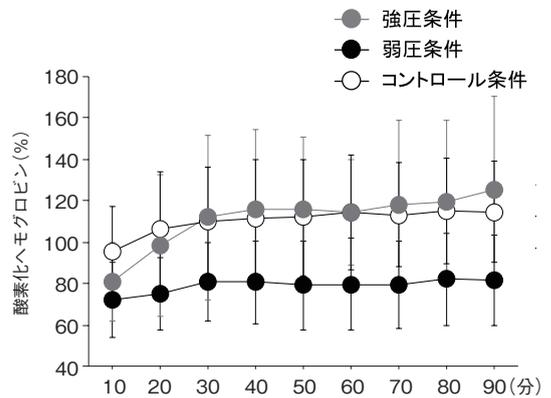


図 1 運動中における酸素化ヘモグロビン
平均値 \pm 標準偏差

2. 3 糖代謝動態

図 2 には、運動中の ^{13}C 排出量の経時変化を示した。いずれの条件においても運動の進行に伴い ^{13}C 排出量は有意に増加し、交互作用が認められた。各条件における ^{13}C 排出量の最高値の出現時間を比較した結果、弱圧条件 (35.5 ± 12.0 分) が強圧条件 (52.7 ± 21.0 分) およびコントロール条

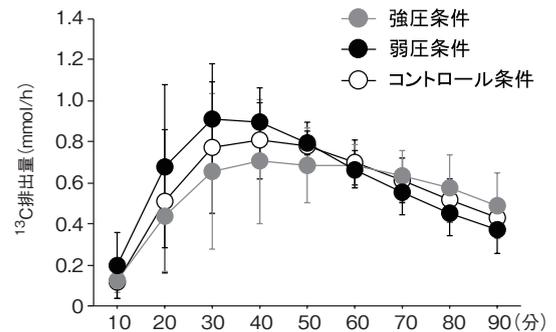


図 2 運動中における ^{13}C 排出量
平均値 \pm 標準偏差

件 (50.9±20.2 分) と比較して有意に低値を示した (P<0.05)。

2. 4 呼気ガス指標

いずれの指標においても時間の主効果は認められたが (P<0.05), 条件の主効果および交互作用は認められなかった (P>0.05)。

2. 5 運動継続時間

運動継続時間には, 条件間での有意差は認められなかった (強圧条件 ;440±167 秒, 弱圧条件 ;350±145 秒, コントロール条件 ;403±235 秒, P>0.05)。

3. 考 察

本研究では, 長時間 (90 分間) のペダリング運動中における異なる着圧の CG 着用が, 運動に伴う筋酸素動態および糖代謝, 運動パフォーマンスに及ぼす影響を検討することを目的とした。その結果, 弱圧条件における運動中の ^{13}C 排出量の最高値の出現時間は強圧条件およびコントロール条件と比較して短縮し, 摂取したグルコースの早期に利用されることが明らかとなった。一方で, 運動に伴う心拍数および主観的運動強度, 筋酸素動態, 呼気ガス指標および運動継続時間に, CG の着圧の相違の影響は認められなかった。

90 分間のペダリング運動中の CG 着用は, 外側広筋での筋酸素動態に影響を及ぼさず, 着圧の相違による影響も認められなかった。一方で, 60 分間のペダリング運動中の CG 着用の効果を検討した先行研究では, CG の着用に伴い外側広筋の酸素利用効率 (単位時間あたりの発揮パワーに対する組織酸素飽和度) が有意に改善したことを認めている³⁾。本研究の結果と差異が生じた理由として, Scanlan et al. (2018) の研究では, 大腿部および下腿部を着用部位とする CG (大腿部 : 19.9±3.1 hPa, 下腿部 : 23.1±4.0 hPa) が用いら

れていた点が挙げられる。CG の被覆範囲の相違は体温調節や循環器に影響を及ぼす可能性があり⁵⁾, 本研究で用いたような被覆範囲を大腿部のみとする CG の着用では, 筋酸素動態の変化がみられなかったのかもしれない。また, Scanlan et al. (2008) の研究で用いた 60 分間のペダリング運動では, 高強度の運動負荷 (CG 着用条件下 : 226±50.0 W, CG 非着用条件下 : 225±50.0 W) が用いられた一方で, 本研究では中程度の運動負荷 (171.9±15.6 W) を用いた。これらの運動負荷の違いも, 運動中における筋酸素動態に影響を及ぼした可能性が考えられる。なお, 本研究で用いた近赤外線分光法による測定は, 外側広筋の浅層部 (皮下 1.5cm) の 1 箇所のみを対象領域としていた。大腿四頭筋を構成する 4 つの筋では筋活動パターンが異なること, 同一筋の浅層部と深層部においても筋線維組成の相違から筋酸素動態が異なることも指摘されている⁶⁾。したがって, 今後は複数箇所を対象に, 深層部を含めた筋酸素動態や循環指標の測定を行うことも重要になると考えられる。

長時間運動に伴う筋疲労には, 複数の要因が関与する⁷⁻⁹⁾。その中でも, 筋グリコーゲン量の減少は筋疲労に強く影響することから¹⁰⁾, 運動に伴う糖代謝の改善は, 長時間にわたり優れたパフォーマンスを発揮する上で重要な課題となる。これらの点に関連して, 安定同位体 (^{13}C) により標識したグルコースを経口摂取し, 呼気中への排出 ($^{13}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2$) 動態からペダリング運動中の糖代謝の様相を詳細に検討した。その結果, 弱圧条件では ^{13}C の呼気中への排出が早期に生じた。安定同位体呼気試験における ^{13}C の排出様相は, 胃からの排出や小腸での消化・吸収, また骨格筋や肝臓での代謝の速度を反映する¹¹⁾。今回は, 運動中を評価の対象としたことから, ^{13}C グルコースは胃排出・小腸での吸収を経て血中に出現したのち, 骨格筋にてインスリン非依存性の経

路を介して代謝されたものと考えられる。一方で、CGの着用に伴い胃排出や消化・吸収の動態に変容が生じることは考えにくく、弱圧条件でみられた¹³C排出動態の前進は、血中への出現（消化・吸収）後から筋での代謝までの速度を反映していると推察される。また、全身性のエネルギー代謝に関わる指標の動態には、条件間の有意差が認められていないことを踏まえると、¹³Cの排出動態は活動筋における代謝応答の差異を顕著に反映する指標であるかもしれない。

運動に伴う代謝物の蓄積は、疲労感の上昇および運動時間の短縮を引き起こす。この背景には、筋張力の低下や、心拍数・血圧の昇圧応答に起因した心血管系への負荷の増大が関与している¹²⁾。この点に関して、運動中のCG着用は、静脈還流の亢進に起因した心拍数の低下に効果を有することが示唆されてきた^{2,13)}。しかし、本研究では、これらの動態にCG着用に伴う有益な効果は認められず、運動継続時間にも条件間での有意差は認められなかった。対照的に、Scanlan et al. (2008)³⁾は、漸増負荷でのペダリング運動中に大腿部および下腿部を着用部位とするCGの着用が血中乳酸濃度の上昇を抑制することを認めている。一方で、CG着用に伴う代謝物の除去促進には、着圧に起因した筋ポンプ作用の増加の関与が示唆されており¹⁴⁾、特に下腿筋群に着圧を施した場合の効果が指摘されている¹⁵⁾。これらの知見から、着圧に伴う静脈還流の促進の効果は、被覆範囲が大腿部のみを対象としたCGでは、顕著に認められない可能性が示唆された。

4. 結 論

長時間（90分間）のペダリング運動中に大腿部に約20 hPaが課されるCGの着用下では、外因性グルコースが早期に利用されることが明らかとなった。しかし、心拍数および主観的運動強度、筋酸素動態、呼気ガス指標および運動継続時間に、

CG着用の有無および着圧の相違の影響は認められなかった。

謝 辞

本研究を委託いただきました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学財団に厚く御礼申し上げます。また、本研究の実施にあたり、御指導を賜りました立命館大学・後藤一成教授に心より感謝いたします。

文 献

- 1) Mizuno S., Arai M., Todoko F., Yamada E., Goto K., Wearing Compression Tights on the Thigh during Prolonged Running Attenuated Exercise-Induced Increase in Muscle Damage Marker in Blood., *Front Physiol.*, 8:834-9 (2017)
- 2) Mizuno S., Arai M., Todoko F., Yamada E., Goto K., Wearing lower-body compression garment with medium pressure impaired exercise-induced performance decrement during prolonged running. Sacchetti M, editor. *PLoS ONE. Public Library of Science*; 12:e0178620(2017)
- 3) Scanlan A.T., Dascombe B.J., Reaburn P.R.J., Osborne M., The effects of wearing lower-body compression garments during endurance cycling. *Int. J. Sports Physiol. Perfor.*, 3:424-38(2008)
- 4) Boucourt B., Bouhaddi M., Mourout L., Tordi N., Ménétrier A., Changes in tissue oxygen saturation with calf compression sleeve: before, during and after a cycling exercise. *J. Sports Med. Phys. Fitness.*, 55:1497-501.(2015)
- 5) MacRae B.A., Laing R.M., Niven B.E., Cotter J.D., Pressure and coverage effects of sporting compression garments on cardiovascular function, thermoregulatory function, and exercise performance. *Eur. J. Appl. Physiol. Springer-Verlag.*; 112:1783-95.(2012)
- 6) Koga S., Barstow T.J., Okushima D., Rossiter H.B., Kondo N., Ohmae E., et al., Validation of a high-power, time-resolved, near-infrared spectroscopy system for measurement of superficial and deep muscle deoxygenation during exercise. *J. Appl. Physiol.*, 118:1435-42.(2015)
- 7) Proske U., Allen T.J., Damage to Skeletal Muscle

- from Eccentric Exercise. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, **33**:98-104. (2005)
- 8) Nielsen O.B., Clausen T., The Na⁺/K⁺-pump protects muscle excitability and contractility during exercise. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, **28**:159-64 (2000)
 - 9) Vandenberghe K., Walter G., Ploutz-Snyder L., Dudley G., Elliott M.A., De Meirleir K., Relationship between muscle T₂ relaxation properties and metabolic state: a combined localized 31P-spectroscopy and 1H-imaging study. *Eur J. Appl. Physiol.*, **82**:76-82 (2000)
 - 10) Lees S.J., Franks P.D., Spangenburg E.E., Williams J.H., Glycogen and glycogen phosphorylase associated with sarcoplasmic reticulum: effects of fatiguing activity. *J. Appl. Physiol.*, **91**:1638-44 (2001)
 - 11) Tanaka K., Matsuura T., Shindo D., Aida Y., Matsumoto Y., Nagatsuma K., et al., Noninvasive assessment of insulin resistance in the liver using the fasting ¹³C-glucose breath test. *Translational Research.*, **162**:191-200 (2013)
 - 12) Boushel R., Muscle metaboreflex control of the circulation during exercise. *Acta Physiol. Blackwell Publishing Ltd.*; **199**:367-83 (2010)
 - 13) Lovell D.I., Mason D.G., Delphinus E.M., McLellan C.P., Do compression garments enhance the active recovery process after high-intensity running? *J. Strength Cond. Res.*, **25**:3264-8 (2011)
 - 14) Agu O., Baker D., Seifalian A.M., Effect of graduated compression stockings on limb oxygenation and venous function during exercise in patients with venous insufficiency. **12**:69-76 (2004)
 - 15) Sperlich B., Haegeler M., Achtzehn S., Linville J., Holmberg H.-C., Mester J., Different types of compression clothing do not increase sub-maximal and maximal endurance performance in well-trained athletes. *J. Sports Sci. 2nd ed. Routledge*; **28**:609-14 (2010)