

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K12671

研究課題名(和文) 骨格筋冷却による筋代謝制限下で行う運動トレーニング手法の開発

研究課題名(英文) New training method with hypothermic skeletal muscle

研究代表者

若林 斉 (WAKABAYASHI, HITOSHI)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：50452793

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、骨格筋冷却状態で行う新たなトレーニング手法の開発を目的とした。まず、水温12℃で30分間の下半身水浸を行った後、陸上で乳酸閾値強度の自転車運動を行った際に血中乳酸濃度の上昇など解糖系代謝の動員を確認した。次に、水温12℃で30分間水浸の後、水中で自転車運動を行ったところ、同様に解糖系代謝の動員が示されたが、低水温による影響で運動継続が困難な対象者が見られた。そこで、水温15℃に設定し、筋冷却状態で30分間の水中自転車運動トレーニングを週3回4週間実施し、前後にパフォーマンステストを行った。中立温度条件と比較し、筋冷却トレーニングが無酸素パワーを亢進させるという仮説について検証した。

研究成果の概要(英文)：This study investigated the new training method with hypothermic skeletal muscle. We observed greater anaerobic contribution as show in the higher blood lactate concentration during lactate threshold level exercise on land after pre-cooling in 12°C water. Then, we observed similar result during exercise using an underwater cycle ergometer, while some of the participants could not continue exercise because of the cold environment. Thus, we conducted training session with hypothermic skeletal muscle in 15°C water 3 times a week for 4 weeks. The hypothesis of greater improvement of anaerobic power after training with hypothermic skeletal muscle was assessed.

研究分野：環境生理学，環境人間工学

キーワード：筋冷却 筋温 解糖系代謝 プレクーリング 冷水浴 筋酸素動態

1. 研究開始当初の背景

これまでに、申請者は寒冷環境における体温調節応答の適応現象や (Wakabayashi et al. 2012; Tipton et al. 2013; Wakabayashi et al. 2015) や運動能力に関する研究を行ってきた。その中で、骨格筋温の低下に伴う掌握運動時の筋有酸素代謝の抑制や、膝伸展運動時の筋電図周波数の徐波化と振幅の増加などを検証してきた。これは、筋温の低下に伴う神経伝導速度の低下を反映しており、筋線維単位の出力低下を動員線維数の増加により補償しようとしたと考えられた。これらの研究成果や先行研究の知見を元に、骨格筋冷却状態における運動時の速筋線維動員と解糖系代謝の増員を特徴とする「骨格筋冷却トレーニング」を提案した。

2. 研究の目的

本研究では、骨格筋を冷却した状態で行う低中強度の運動が、運動時の生理応答ならびにトレーニング効果に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。まず、下半身水浸によるプレクーリングによって運動前に骨格筋温度を低下させた状態で運動を行った際の一過性の応答から、特に、解糖系代謝の動員の増加が見られるかを検証する課題を設定した。次に、プレクーリング後に寒冷水中で運動を行うトレーニング実験を実施し、骨格筋冷却トレーニングが運動パフォーマンスに及ぼす影響を検証する課題を設定した。

3. 研究の方法

(1) 骨格筋冷却運動による一過性の影響

健康な成人男性 8 名を対象に研究を行った。各被験者は以下のプロトコルで下半身を冷却する冷却条件と冷却を行わない非冷却条件の 2 条件の実験試技を行った。

冷却条件では、被験者の下半身を 12 の水に 30 分間水浸させ、大腿部組織温度を 23 以下に低下させた。退水後、水循環式冷却パッドにより大腿部の冷却を継続しながら、事前に設定した乳酸閾値 (LT) 強度の自転車運動を陸上にて 60 分間行った。運動中は呼気ガス分析器 (METALYZER, Cortex 社) により酸素摂取量を、近赤外線式組織血液酸素モニター (BOM-L1TR, OMEGAWAVE 社) により外側広筋の筋酸素動態を経時的に測定した。また、血中乳酸濃度の測定 (Lactate Pro, Arcray 社) を行った。外側広筋の筋温を熱流補償法による深部組織温度計 (コアテンプ CM-210, テルモ社) を用いて測定した。

得られたデータに基づき、プレクーリングによる骨格筋冷却状態で LT 強度運動を行った際の解糖系代謝動員について評価を行った。また、運動開始時の呼気ガス酸素摂取動態および骨格筋脱酸素化動態の立ち上がり応答について評価を行った。

(2) 骨格筋冷却トレーニングの水温設定

上述の一過性応答の検証により、プレクーリング後の陸上運動では筋温の回復が早く、トレーニング方法として用いるには冷却能力の高い、寒冷水中での運動を行う必要性が考えられた。そこで、実験用恒温水槽内に設置された水中自転車エルゴメーターを用いた運動により、3 段階の水温設定で一過性の応答を評価した。

健康な成人男性 6 名を対象に研究を行った。各対象者は以下のプロトコルで、水温 12、18、33 の 3 条件で実験試技を行った。まず、陸上にて安静基準値を測定した後、下半身水浸した状態で 30 分間安静にし、再度陸上にて外側広筋の筋温を深部組織温度計により測定した。続いて、事前に 33 条件で設定した LT 強度の水中自転車運動を 30 分間行った。実験中に酸素摂取量、二酸化炭素排出量、呼吸交換比、近赤外線分光法による外側広筋組織酸素動態を経時的に測定した。また、血中乳酸濃度の測定を運動中 5 分毎に行った。

(3) 骨格筋冷却トレーニングの効果

健康な成人男性 7 名を対象に研究を行った。対象者を冷却群 4 名、コントロール群 3 名の 2 群に分け、週 3 回の水中自転車運動トレーニングを 4 週間にわたって実施し、トレーニング前後にパフォーマンステストを行った。

対象者は、事前にトレーニング強度を設定するため、実験用恒温水槽内に設置された水中自転車エルゴメーターを用いて、水温 33 環境で最大下漸増負荷テストを行い、LT 強度を求めた。

運動パフォーマンスを評価するために、陸上にて、自転車エルゴメーター (PowerMax-V, KONAMI 社) を用いて漸増負荷運動を行い、最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) を求めた。また、同一の自転車エルゴメーターを用いてウィングテストを実施し、ピークパワーおよび 30 秒間の平均パワーを評価した。LT 強度の評価と運動パフォーマンスに関する測定は、トレーニング介入前後に同一プロトコルで実施した。

トレーニング介入は、冷却群は水温 15、コントロール群は 33 で実施し、実験プロトコルは同様とした。冷却群の水温設定については、上述の水温設定に関する検証により、解糖系代謝の亢進が見込まれ、かつ、対象者が 30 分間運動を継続可能な水温として 15 を採用した。まず、下半身を水浸させ、30 分間座位安静にした。浸水終了後、一度退水し、外側広筋の筋温を測定し、その後再度入水し、水中自転車エルゴメーターによる運動を開始した。各トレーニング試技の運動強度は、事前に設定した LT 強度に固定し、運動時間は 30 分間とした。また、運動中の水中自転車エルゴメーターの回転数は 60rpm を維持するように指示した。

トレーニング介入後に、上述のパフォーマンステストを実施し、骨格筋冷却トレーニングのトレーニング効果について検証した。

4. 研究成果

(1) 骨格筋冷却運動による解糖系代謝亢進
冷却条件では運動開始時の外側広筋温度が約 23 を示し、運動中徐々に筋温が上昇し 20 分後には約 32 を示し、冷却前の筋温近くに回復した(図 1). 運動中一貫して冷却条件で有意に筋温が示された ($P < 0.05$).

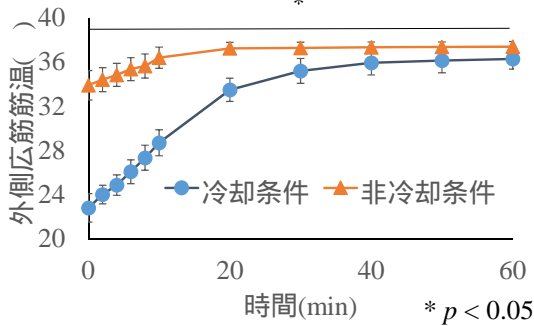


図 1 自転車運動中における外側広筋筋温の経時変化 (平均 ± 標準偏差)

外側広筋の組織酸素飽和度は運動開始 20 分後まで冷却条件で有意に低い値を示した ($P < 0.05$). 運動開始 4 分から 20 分後まで、冷却条件において有意に高い血中乳酸濃度を示した ($P < 0.05$) (図 2).

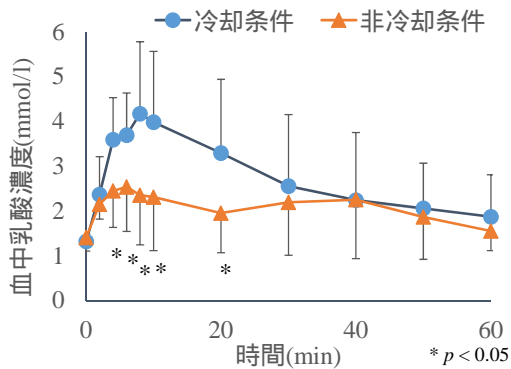


図 2 自転車運動中における血中乳酸濃度の経時変化 (平均 ± 標準偏差)

骨格筋温度を通常以下まで冷却した状態で運動を行うと高い血中乳酸濃度が示され、解糖系代謝の動員が増えることが示唆された。また、プレクーリング後の陸上運動では、骨格筋温度が 20 分程度で通常温度に回復するため、骨格筋冷却トレーニングを実施する上では、冷却能力の高い水中環境で運動を行う必要性が示された。

(2) 筋冷却運動開始時の酸素摂取動態遅延

運動開始直後の酸素摂取動態を解析した結果、冷却条件で有意に長い時定数を示した。また、外側広筋の脱酸素化ヘモグロビンの応答に一時的な上昇が見られた(図 3)。また、脱酸素化ヘモグロビンのオーバーシュートと酸素摂取動態の遅延に関係性が見られた。

これらの結果から、骨格筋冷却状態での運動開始時には、骨格筋における酸素需要に対して血流による酸素供給の不足が生じていると考えられ、結果的に呼気ガス酸素摂取動態の立ち上がりの遅延が生じていると考えられた。

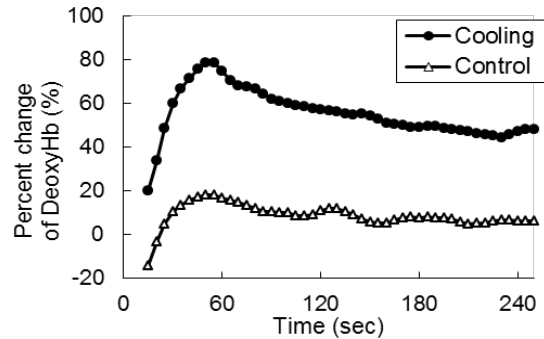


図 3 筋冷却運動開始時における筋脱酸素化ヘモグロビンの一時的上昇 (1 例)

(3) トレーニング水温の設定

30 分間の下半身水浸安静後の外側広筋温度は、水温 12, 18, 33 条件それぞれにおいて、約 22, 25, 34 を示した。水温 12 条件においては 3 名の対象者が 16 分以降運動を継続できなかった。運動開始 10 分から 15 分後まで、12 条件において 33 条件よりも有意に高い血中乳酸濃度を示した ($P < 0.05$)。酸素摂取量には条件間の差は見られなかったが、二酸化炭素排出量および呼吸交換比が運動開始 15 分後まで 12 条件で 33 条件よりも有意に高値を示した ($P < 0.05$)。

これらの結果から、水温 12 環境における LT 強度運動時の解糖系代謝の亢進が検証された。一方で、水温 12 環境では対象者の半数が 16 分以上の運動を継続できなかったことから、トレーニングを行う際の水温設定としては、12 以上 18 以下が妥当であると考えられた。

(4) 骨格筋冷却トレーニングの効果

冷却群のトレーニング期間中の生理応答については、一過性の検証と同様に LT レベルを超える血中乳酸濃度が示されたことから、解糖系代謝の亢進が確認された。

トレーニング効果については、冷却群のピークパワーが増加する傾向を示したが、最大酸素摂取量や LT 強度については変化を示さなかった。現時点で対象者数が少ないため、トレーニング効果の検証が十分でない。現在さらに対象者数を追加してトレーニング実験を遂行中である。

参考文献

- Wakabayashi H, Wijayanto T, Kuroki H, Lee JY, Tochihara Y. The effect of repeated mild cold water immersions on the adaptation of the vasomotor

- responses. *International Journal of Biometeorology* 56(4): 631–637, 2012
- (2) Tipton MJ, Wakabayashi H, Barwood MJ, Eglin CM, Mekjavic IB, Taylor NAS. Habituation of the metabolic and ventilatory responses to cold-water immersion in humans. *Journal of Thermal Biology* 38(1): 24–31, 2013
- (3) Wakabayashi H, Oksa J, Tipton MJ. Exercise performance in acute and chronic cold exposure, *The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine* 4(2): 177-185, 2015

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- (1) Wakabayashi H, Wijayanto T, Tochihara Y. Neuromuscular function during knee extension exercise after cold water immersion. *Journal of Physiological Anthropology*, 36: 28, 2017. 査読有

〔学会発表〕(計 12 件)

- (1) 若林 斉. Exercise in Cold, Live in Mild Cold, 日本体力医学会北海道地方会第 20 回大会.札幌, 2018.4.21(招待講演)
- (2) 若林 斉. 寒冷環境における運動パフォーマンス低下とその要因. ヒューマン・ハイ・パフォーマンス Collaborative Research シンポジウム, ARIHHP ヒューマン・ハイ・パフォーマンスフォーラム 2017.つくば, 2017.3.8 (招待講演)
- (3) Hitoshi Wakabayashi, Hiroyuki Sakaue, Yasuo Sengoku, Hideki Takagi. New training method in cold water with hypothermic skeletal muscle ARIHHP Human High Performance International Forum. Tsukuba, 2018.3.5
- (4) Hiroyuki Sakaue, Hitoshi Wakabayashi, Yasuo Sengoku, Hideki Takagi. Effect of exercise training at lactate threshold level with lower muscle temperature in cold water. ARIHHP Human High Performance International Forum. Tsukuba, 2018.3.5
- (5) Hitoshi Wakabayashi, Ke Li, Hiroyuki Sakaue, Yasuo Sengoku, Hideki Takagi. Greater contribution of glycolytic metabolism during exercise in cold water with hypothermic skeletal muscle. The 17th International Conference on

Environmental Ergonomics, Kobe, 2017.11.13-17

- (6) Hitoshi Wakabayashi, Titis Wijayanto, Yutaka Tochihara. Neuromuscular function during knee extension exercise following cool-water immersion. The 17th International Conference on Environmental Ergonomics, Kobe, 2017.11.13-17
- (7) Hitoshi Wakabayashi, Mizuki Osawa, Ke Li, Hiroyuki Sakaue, Yasuo Sengoku, Hideki Takagi. Transient overshoot in muscle deoxygenation and slowed oxygen uptake kinetics at the exercise onset with hypothermic skeletal muscle. 2017 Symposium of the Society for the Study of Human Biology & International Association of Physiological Anthropology. Loughborough, 2017.9.12-15
- (8) Hitoshi Wakabayashi, Ke Li, Hiroyuki Sakaue, Yasuo Sengoku, Hideki Takagi. Greater contribution of anaerobic metabolism during exercise in cold water. ヒューマン・ハイ・パフォーマンスフォーラム 2017, つくば, 2017.3.8
- (9) Hitoshi Wakabayashi, Mizuki Osawa, Ke Li, Hiroyuki Sakaue, Yasuo Sengoku. Pulmonary oxygen uptake kinetics and tissue oxygenation during exercise with hypothermic skeletal muscle in human. 6th International Conference on the Physiology and Pharmacology of Temperature Regulation, Slovenia, 2016.12.5-9.
- (10) 若林 斉, 大澤 瑞樹, 李 柯, 坂上 輝将, 仙石 泰雄. 骨格筋冷却下で行う乳酸閾値強度自転車運動時に見られる代謝応答. 第 71 回日本体力医学会大会, 盛岡, 2016.9.23-25.
- (11) Wakabayashi H, Osawa M, Sengoku Y. Physical performance and metabolic response in hypothermic skeletal muscle. JPA/JSPA/UTAR Seminar on Physiological Anthropology, UTAR Kampus, Malaysia, 2016.3.3.(招待講演)
- (12) Wakabayashi H. Physical performance in cold environment and adaptation after repeated cold exposure. The 12th International Congress of Physiological Anthropology, Chiba, 2015. 10. 27-30.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

若林 斉 (WAKABAYASHI HITOSHI)
北海道大学・工学研究院・准教授
研究者番号：50452793

(2) 研究分担者

引原有輝 (HIKIHARA YUKI)
千葉工業大学・創造工学部・教授
研究者番号：10455420
金田晃一 (KANEDA KOICHI)
千葉工業大学・先進工学部・准教授
研究者番号：10534589
仙石泰雄 (SENGOKU YASUO)
筑波大学・体育系・助教
研究者番号：30375365