

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：14501

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26882026

研究課題名(和文) 高温下における長時間の間欠運動時の体温調節特性

研究課題名(英文) Thermoregulation during intermittent exercise in the heat

研究代表者

天野 達郎 (Amano, Tatsuro)

神戸大学・人間発達環境学研究所・研究員

研究者番号：60734522

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：間欠運動時の体温調節特性を検討するため、10名の健康な男子大学生が室温25℃、相対湿度50%の環境下で50%V02maxの継続運動を30分間および同じ運動強度の間欠運動(30s運動+30s休息および180s運動+180s休息)を60分間実施した。運動・休息時間に関わらず間欠運動時の食道温は継続運動のそれと同様であった。一方、発汗および皮膚血管拡張は間欠運動時に低い値を示した。間欠運動時の熱放散反応に影響する体温以外の要因のうち、筋代謝受容器活動は筋機械受容器活動よりも大きな熱放散反応を示すことや、この活動が体温上昇時の熱放散反応を促進することも明らかになった。

研究成果の概要(英文)：To investigate the characteristics of thermoregulation during intermittent exercise, 10 young male performed 50%V02max cycling exercise (30 s exercise + 30 s rest and 180s exercise + 180s rest) for 60 minutes as well as continuous exercise for 30 minutes at the same exercise intensity. Results showed that the intermittent exercises do not affect the elevation of esophageal temperature while it reduces sweat rate and skin blood flow compared with normal continuous exercise at the same exercise intensity. We also revealed that muscle metaboreceptors activation which influence heat loss responses during intermittent exercise would modify both sweating and cutaneous vasodilation during passive heat stress. The influence of muscle metaboreceptors activation on sweating response seems larger than that of muscle mechanoreflex.

研究分野：環境生理学

キーワード：体温調節 発汗量 皮膚血流量 食道温 熱中症 間欠運動

1. 研究開始当初の背景

近年の夏の猛暑より、夏季スポーツ活動時の熱中症や運動パフォーマンス低下を予防するには実際のスポーツ形態を想定した体温調節の研究が不可欠になる。スポーツ場面で最もよく行われている運動形態の一つに、短時間の運動と休息・軽運動を長い時間繰り返す間欠運動がある(例:サッカー)。この運動時には継続運動時とは異なる体温調節特性が認められている。例えば、最大酸素摂取量(VO_{2max})の60%強度の継続運動と90% VO_{2max} (1.5分)+50% VO_{2max} (4.5分)の間欠運動時の体温調節反応を比較すると、間欠運動時の直腸温上昇が継続運動時と比較して有意に大きくなる(Mora-Rodriguez et al. 2008)。このことは、間欠運動を夏の高温下で行うと運動パフォーマンスが低下したり、熱中症のリスクが高くなりやすいことを示している。しかし、これまで行われている体温調節の研究はほとんど継続運動時の反応から検討されているため、間欠運動時の体温調節特性には不明な点が多く残されている。高強度の間欠運動時には体温上昇の他に運動を行うという脳の活動(セントラルコマンド)、乳酸などの代謝産物の蓄積による反射(筋代謝受容器活動)、筋の動きに応じて起こる反射(筋機械受容器活動)といった温度に依存しない非温熱性要因が熱放散反応に影響している。間欠運動時の体温調節特性を明らかにするためには、この非温熱性要因による熱放散反応の特性を解明することが不可欠となる。

2. 研究の目的

上述した背景より、本研究では、間欠運動時の体温調節特性に関して以下の点について検討することを目的とした。

- (1) 間欠運動時の運動時間の違いが体温調節反応に及ぼす影響
- (2) 非温熱性要因のうち筋機械受容器と筋代謝受容器活動による熱放散反応の特性。

3. 研究の方法

(1) 実験1

健康な男子大学生 10 名を被験者として、室温 25℃、相対湿度 50%の環境下において以下の運動を行った時の体温調節反応を測定した。

50% VO_{2max} の継続運動を 30 分間

50% VO_{2max} の間欠運動 (30s 運動+30s 休息および 180s 運動+180s 休息) を 60 分間

データ解析は、仕事量が同じになるようにセクションごと各生体反応を平均した。

(実験2)

健康な男子大学生 27 名が環境温 35℃、相対湿度 50%の実験室内で上腕部を阻血した状態で最大握力の 35%および 50%強度の静的掌握運動を 1.5 分間行った。運動終了後、前腕部阻血を 3 分間実施して筋代謝受容器を

賦活させた。この状態で下肢を受動的にストレッチして筋機械受容器が活動した時の発汗反応を測定した。

(実験3)

健康な男女大学生 14 名が、実験2と同様の方法を用いて前腕部で筋代謝受容器活動を賦活させ、静的掌握運動後の阻血を 9 分間維持した。この阻血と同時に下肢温浴による安静温熱負荷を行い、筋代謝受容器活動が発汗および皮膚血管拡張が開始する深部体温閾値と各反応の傾きに及ぼす影響を検討した。

4. 研究成果

(1) 実験1

継続運動時の心拍数は間欠運動条件(30秒条件および3分条件)よりも有意に高い値で推移した。また、心拍数同様に、運動時の平均血圧は間欠運動時と比較して継続運動時に有意に高くなった。一方、自覚的運動強度は条件間に差が認められなかった。これらのことは、間欠運動の時間の長さに関わらず、継続運動時には間欠運動時よりも循環反応が大きくなることを示している。

図1に継続運動および間欠運動(30秒条件および3分条件)時の食道温、平均皮膚温および平均体温の変化を示した。食道温は条件間に差が認められなかったものの、平均皮膚温は継続運動条件で有意に高い値を示した。この影響により、平均体温も継続運動時に間欠運動条件よりも有意に高い値で推移した。

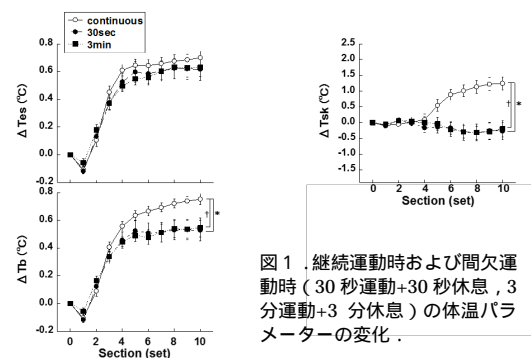


図1. 継続運動時および間欠運動時(30秒運動+30秒休息, 3分運動+3分休息)の体温パラメーターの変化。

皮膚温と関連して、継続運動時の皮膚血管コンダクタンス(皮膚血流の流れやすさの指標)は両間欠運動条件と比べて有意に高い値を示した(図2)。また、皮膚血管コンダクタンスと同様に、胸部および前腕部の局所発汗量も継続運動時に間欠運動条件よりも有意に高い値を示した(図2)。運動の開始と停止を繰り返す間欠運動時には、運動を行う意志であるセントラルコマンドがより多く活動することが予想される。セントラルコマンドは皮膚血管を収縮させることが報告されていることから(Shibasaki et al. 2005)、同じ絶対強度の運動でも、間欠運動時にはこの入力の影響で皮膚血管拡張が低下したのかもしれない。また、前述のように間欠運動

時には継続運動時よりも皮膚温が低下していたため(図1), 皮膚温の影響により, 間欠運動時の発汗が抑制されていた可能性もある。

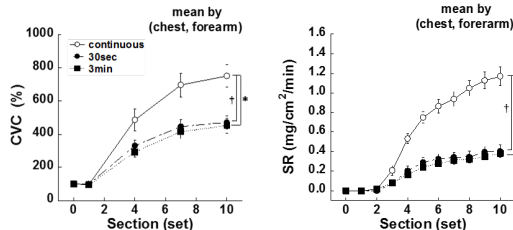


図2. 継続運動時および間欠運動時(30秒運動+30秒休息, 3分運動+3分休息)の熱放散パラメータの変化。

(2) 実験2

図3に筋代謝受容器活動時に下肢ストレッチで筋機械受容器を刺激した時の心拍数, 血圧, 局所発汗量(有毛部の平均値と手掌)を示した。ストレッチを単独で行うと, 筋機械受容器刺激と関連して血圧および有毛部発汗量の有意な増加が認められた。これらの反応は筋機械受容器活動の特性を検討した先行研究と一致する結果である(Gladwell and Coope 2002; Kondo et al. 1997)。しかし, 同じ下肢ストレッチを前腕部で筋代謝受容器活動時に行うと, 下肢ストレッチ単独で認められた発汗量の増加が認められなかった。一方, 平均血圧はストレッチ単独条件と同様に増加した。これらの結果は, 筋機械受容器活動と筋代謝受容器活動による統合的な発汗と血圧の調節はそれぞれ異なることを示している。特に, 発汗反応においては, 筋代謝受容器活動の影響が筋機械受容器活動のそれより大きく, 下肢ストレッチ単独で認められた発汗量の増加をマスクしたと推察される。筋機械受容器と筋代謝受容器は異なる部位で刺激されていたことから, これらの調節は中枢レベルで行われていると考えられる。

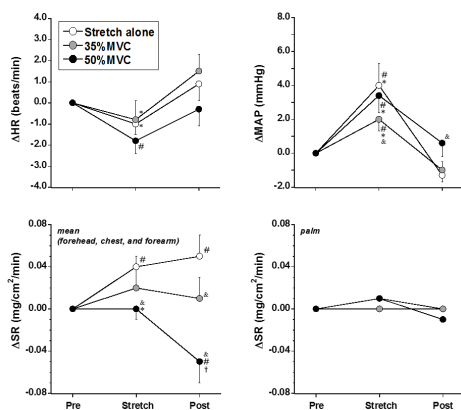


図3. 前腕部で筋代謝受容器活動時に下肢ストレッチで筋機械受容器を刺激した時の生体反応。#: vs. ストレッチ前, *: vs. ストレッチ後, &: vs. ストレッチのみ, †: vs. 35%MVC。

(3) 実験3

図4に前腕部で筋代謝受容器を賦活した時の循環, 体温調節反応を示した。先行研究と同様に, 運動後阻血時には血圧が増大し, その増加は9分間持続されたことから, 本研

究で用いた方法でも筋代謝受容器活動が刺激できていたと考えられる。さらに, 下肢温浴に伴う皮膚温および食道温の変化は筋代謝受容器活動条件とコントロール条件で同様であったため, 温度に関する要因の影響は条件間で同じだったと考えられる。

下肢温浴時の発汗および皮膚血管コンダクタンスは筋代謝受容器活動条件でコントロール条件よりも有意に高い値を示した(図4)。このことは, 筋代謝受容器活動は両反応を促進することを示している。先行研究では, 筋代謝受容器活動は皮膚血管拡張を抑制することが報告されている(Crandall et al. 1998)。本研究と結果が異なる理由は明らかではないものの, 本研究で認められた皮膚血管拡張は血圧増加に伴って血液が末梢へ受動的に分布した可能性が考えられる。

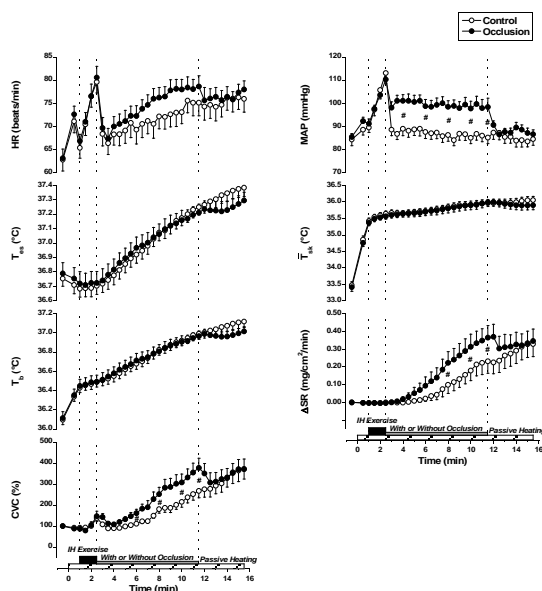


図4. 前腕部で筋代謝受容器活動時に安静温熱負荷を行った時の生体反応。

発汗および皮膚血流反応を深部体温との関係から検討すると, 両反応とも, その反応が開始する体温閾値が有意に低下することで熱放散を促進することが分かった。体温閾値の変化は中枢性の熱放散調節であることが示唆されているため(Nadel et al. 1974), 本研究の結果より, 筋代謝受容器活動は体温調節中枢の活動を促進することで熱放散反応を増大させる可能性が明らかになった。

(4) まとめ

本研究では, 間欠運動時の体温調節特性を明らかにするため, 運動時間の違いが体温調節反応に及ぼす影響を実験1で検討した。また, 間欠運動時には非温熱性要因がより大きく動員されることから, その入力による熱放散反応の調節メカニズムを筋機械受容器と筋代謝受容器活動に着目して検討した(実験2と3)。実験1で示唆されたように, 間欠運動時には継続運動とは異なる体温調節反応が認められるが, 間欠運動の時間はその違

いに影響しない。運動条件間の体温変化には有意差が認められなかったことから、本研究で認められた間欠運動時の体温調節特性は主に非温熱性要因に関連していると考えられる。実験2や実験3の結果と合わせて考えると、筋代謝受容器も間欠運動時に体温調節反応に影響している可能性があり、特にそれは中枢性の調節だと推察される。一方、筋機械受容器活動は筋代謝受容器活動と比べると、大きくは間欠運動時の熱放散反応に影響していないのかもしれない。

(5) 国内外における位置づけ

一般的に行われているスポーツのほとんどが間欠運動であることを考慮すると、本研究はスポーツの安全性の確立に大きく貢献するものだと考えられる。特に、非温熱性要因に着目して運動時の体温調節反応を検討している研究者は少ないため、世界的に見ても本研究は重要である。実際に、研究成果の一部は国際的に評価の高い学術誌に掲載された。しかし、未だに非温熱性要因による体温調節メカニズムには不明な点が多く残されているため、運動の安全性を真に考えるにはその解明が不可欠だと考えられる。

(6) 今後の展望

前述のように、非温熱性要因による熱放散反応の特性を明らかにすることは、本研究を進展させる上で不可欠となる。また、発汗や皮膚血流反応は温熱性や非温熱性の入力と共に汗腺や皮膚血管における末梢性の調節も重要となる。今後、さらに体温調節の研究を進展させるには、本研究で行った入力の視点に加えて、末梢の分子的な統合作用の研究が新たに必要になると考えられる。

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8件)

1. Amano T, Gerrett N, Inoue Y, Nishiyasu T, Havenith G, and Kondo N. Determination of the maximum rate of eccrine sweat glands' ion reabsorption using the galvanic skin conductance to local sweat rate relationship. *Eur J Appl Physiol*, in press. 査読有
2. 天野達郎, 島名孝次, 堀川直幹, Nicola Gerrett, 近藤徳彦. ヒトの体温調節特性を生かしたスポーツウェアの開発. *臨床スポーツ医学* 33:313-315, 2016. 査読無
3. Amano T, Ichinose M, Inoue Y, Nishiyasu T, Koga S, Kenny GP, and Kondo N. Influence of forearm muscle metaboreceptor activation on sweating and cutaneous vascular responses during dynamic exercise. *Am J Physiol Regul, Integr and Comp Physiol*, in press. 査読有
4. Amano T, Ichinose M, Inoue Y, Nishiyasu T,

Koga S, and Kondo N. Modulation of muscle metaboreceptor activation upon sweating and cutaneous vascular responses to rising core temperature in humans. *Am J Physiol Regul, Integr and Comp Physiol* 308: 990-997, 2015. 査読有

5. Amano T, Inoue Y, Koga S, Nishiyasu T, and Kondo N. Influence of exercise training with thigh compression on heat-loss responses. *Scand J Med Sci Sport* 25: 173-182, 2015. 査読有
6. Adami A, Koga S, Kondo N, Cannon DT, Kowalchuk JM, Amano T, Rossiter HB. Changes in whole tissue heme concentration dissociates muscle deoxygenation from muscle oxygen extraction during passive head-up tilt. *Journal of Applied Physiology* 118: 1091-1099, 2015. 査読有
7. Spencer MD, Amano T, Kondo N, Kowalchuk JM, and Koga S. Muscle O₂ extraction reserve during intense cycling is site-specific. *Journal of Applied Physiology* 117: 1199-1206, 2015. 査読有
8. Amano T, Ichinose M, Miwa M, Inoue Y, Nishiyasu T, and Kondo N. Sweating response to passive stretch of the calf muscle during activation of forearm muscle metaboreflex in heated humans. *Am J Physiol Regul, Integr and Comp Physiol* 306:728-734, 2014. 査読有

[学会発表](計11件)

1. Amano T and Kondo N. Muscle metaboreflex and heat loss responses during exercise and exercise training. *Human High Performance International Forum 2016*, 筑波大学(茨城), Japan, 3/3, 2016.
2. 天野達郎, 一之瀬真志, 井上芳光, 西保岳, 近藤徳彦. 前腕部における筋代謝受容器活動が自転車運動時の熱放散反応に及ぼす影響. 第70回日本体力医学会, 和歌山県民文化会館(和歌山), 9/18-20, 2015.
3. 天野達郎. 運動時の体温調節特性と運動トレーニングがそれに及ぼす影響: 筋代謝受容器活動に着目して. 第29回呼吸研究会および運動と循環研究会, セッション2, 特殊環境における運動時の循環調節, 和歌山県民文化会館(和歌山), 9/17, 2015.
4. 天野達郎. 運動時の体温調節特性と運動トレーニング効果. 2015年度生理人類学会夏季セミナー, 体温調節研究部会, 関西セミナーハウス(京都). 招待講演, 9/1, 2015.
5. Amano T, Inoue Y, Nishiyasu T, Kenny GP, and Kondo N. Effects of forearm muscle metaboreceptors activation on sweating and cutaneous vascular responses during passive heating and cycle exercising in humans. *The*

- 16th International Conference on Environmental Ergonomics, Portsmouth, United Kingdom, 6/28-7/3, 2015.
6. Amano T, Inoue Y, and Kondo N. Factors for improving heat loss responses to hot environment in humans. International Symposium on human Adaptation to Environment and Whole-body Coordination, 神戸大学(兵庫), Japan, 3/14-16, 2015.
 7. 天野 達郎, 一之瀬 真志, 井上 芳光, 西保 岳, 古賀 俊策, 近藤 徳彦. 筋代謝受容器活動が安静温熱負荷時の熱放散反応に及ぼす影響. 第71回日本生理人類学会, 神戸大学(兵庫), 11/1-2, 2014.
 8. 天野 達郎, 井上 芳光, 西保 岳, 近藤 徳彦. 局所発汗量と皮膚コンダクタンス関係から汗腺の塩分再吸収能力を評価する試み. 第69回日本体力医学会, 長崎大学(長崎), 9/19-21, 2014.
 9. Muhamed AMC, Roslan SR, Amano T, and Kondo N. Function of eccrine sweat glands during dynamic exercise among tropical natives. The 5th International Symposium on the Physiology and Pharmacology of Temperature Regulation. Skukuza, South Africa, 9/7-12, 2014.
 10. Bowen TS, Rossiter HB, Amano T, Kondo N, and Koga S. The spatial distribution of absolute skeletal muscle deoxygenation during ramp-incremental exercise is not influenced by hypoxia. The 42nd Meeting of the International Society on Oxygen Transport to Tissue. London, UK, 6/28-7/3, 2014.
 11. Adami A, Koga S, Amano T, Cannon DT, Kowalchuk JM, Kondo N, Rossiter HB. The relationships among muscle deoxygenation, total heme concentration, and blood flow during head-up tilt. The 61th Annual Meeting of the American College of Sports Medicine. Orlando, US, 5/27-31, 2014.

〔図書〕(計2件)

1. 天野 達郎, 近藤 徳彦. ニュー運動生理学, Section 12, 運動と体温, 熱放散, p174-181, 真興交易, 2015.
2. 天野 達郎, 近藤 徳彦. 人間科学の百科事典, 3章 カラダの機能 体温調節, p128-133, 丸善出版, 2015.

6. 研究組織

(1)研究代表者

天野 達郎 (Amano, Tatsuro)

神戸大学大学院・人間発達環境学研究科,
教育研究職員

研究者番号: 60734522