

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：14303

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23650418

研究課題名(和文)非侵襲的に測定した動的運動時の筋温と体温調節能・運動能に関する定量的解析

研究課題名(英文)Quantitative analysis of the relationship between muscle temperature measured by non-invasive method, thermoregulatory responses, and work performance during dynamic exercise

研究代表者

常岡 秀行(Tsuneoka, Hideyuki)

京都工芸繊維大学・工学科学研究科・教授

研究者番号：20188600

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は熱流補償法(ZHF法)を用いて非侵襲的に測定した活動筋温と動的運動時の体温調節反応や有酸素性・無酸素性運動能力との関係を定量化してZHF法の有用性を検証し、さらに暑熱環境下における運動能力の維持のための至適筋温について検討した。実験は水循環スーツを用いて身体各部位を冷却・加温する実験条件を設定し、運動時の生理学的反応を測定した。その結果、運動強度が高く体温上昇が大きい場合はZHF法による前額部深部温から中枢温(食道温)を精度良く推定出来ることが示された。また温熱ストレスを軽減して運動能力を最大限に発揮できる下肢筋温は、無酸素性能力：36、有酸素性能力：34であることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：This study performed to analyze quantitatively the relationship between active muscle temperature measured by non-invasive method (zero-heat-flow method, ZHF), thermoregulatory responses, and aerobic and anaerobic performance during dynamic exercise, and clarify the usefulness of ZHF method and optimal muscle temperature maintaining work performance in hot environments. Physiological responses to body cooling or body warming were measured using water perfused suits during exercise. As a results, core temperature (esophageal temperature) could be estimate accurately from deep head temperature measured by ZHF method when increases in body temperature were greater during high intensity of exercise. Furthermore, present study suggested that the optimal lower limb muscle temperature maintaining work performance with attenuation of heat stress was 36 degree C for anaerobic exercise and/or 34 degree C for aerobic exercise.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学・応用健康科学

キーワード：熱流補償法 活動部位深部温 有酸素能力 無酸素能力 水循環スーツ 発汗量 身体冷却

1. 研究開始当初の背景

近年、地球温暖化やヒートアイランド現象により、スポーツ活動時における熱中症が多発している(中井他, 体力科学, 2007). 熱中症発生の主な原因は 過度の体温上昇と発汗による脱水が原因となる体温調節不全であり、さらに脱水は高体温を、高体温は発汗を促進させる。また脱水による運動能力の低下は熱中症発生よりも早期に生じる(Yoshida, T., et al., Eur. J. Appl. Physiol. 2002)ので、暑熱環境下のスポーツ時における運動能力の低下は熱中症発生の危険信号である。さらに運動時には活動筋から熱が産生されるので、暑熱環境における筋温の上昇と運動能力・体温調節能力の低下とは密接に関係すると考えられるが、活動筋温の程度と体温調節反応や運動能力との関係については一致した見解が得られていない。

我々はこれまで、非侵襲的に深部温度測定が可能である熱流補償法(ZHF法, 図1)を用いて測定した動的運動時の筋温(Tm)と、熱電対により測定した食道温(Tes), および平均体温(Tb)との関係について検討し、運動時には Tes よりも Tm が早期に上昇すること(Shin-ya H, et al., Environmental Ergonomics 2002), また Tb と Tm の上昇は類似すること(出町他, 体力科学, 2008)を明らかにした。したがって、ZHF法を用いた深部温度計は筋パワーや持久的運動能力など多様な動的運動時にも使用可能で、活動部位の筋温と体温調節能力さらに運動能力との関係について検討できると考えられる。

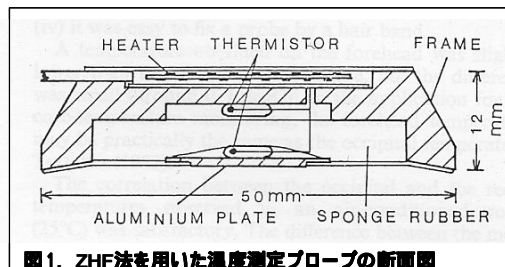


図1. ZHF法を用いた温度測定プローブの断面図

(Yamakage et al. 2002より引用)

プローブは断熱材のスポンジをはさんで体表に接する部分と断熱材の上部に温度センサが設置され、さらに熱伝導性の良い金属で断熱材を囲む構造となっている。断熱材上部に取り付けられたヒーターは断熱材の上下の温度差が0になるように温度を調節し、体表から体外への熱流を0に保つ。その結果、体表の温度は体深部の温度に平衡となるためプローブ装着部の体深部の温度が測定できる仕組みとなっている。

2. 研究の目的

本研究では生体にプローブを挿入・留置しない ZHF法を用いて測定した活動筋温や従来の測定法による中枢温(食道温)と動的運動時の体温調節能力や有酸素性・無酸素性運動能力との関係を定量化して ZHF法の有用性を検証し、最終的には筋温と体温調節能力・運動能力との相互関係を解析して暑熱環境下における運動能力の維持のための至適

筋温や、熱中症予防に関する科学的根拠を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 環境条件の変化に伴う体温変動と体温調節反応の定量化: 環境条件の変化に伴う運動時及び安静時の生体反応について、皮膚温や筋温、前額部深部温や中枢温変化と体温調節反応との関係を定量化して ZHF法による深部組織温測定の有用性を検証し、さらに運動時の効果的な冷却部位についても検討した。

1) 実験方法: 以下 i) ~ iii) の被験者は健康な成人男子 8~10 名を対象とし、所属大学の「ヒトを対象とする研究倫理審査委員会」の承認を受けて実施した。

i) 水循環スーツ(芳田他, デサントスポーツ科学, 2004)を用いて 頭部・頸部, 下半身(活動筋), 頭部・頸部と下半身を冷却(循環水 20°C)する条件に、冷却なしを加えた各 4 条件(図2)にて、室温を 25°C に設定した実験室にて自転車エルゴメーターを用いた運動(最大酸素摂取量の 30% 負荷)を実施した。

ii) 环境温度 21 ~ 31 にて軽・中強度運動(30%・50%負荷)を実施し、能動的皮膚血管拡張反応と平均体温との関係、および前額部深部温と食道温との関係を定量化した。

iii) スチームフットバスを用いた安静下肢温浴時(図3)の大腿部深部温上昇と大腿部の皮膚温や皮膚血流量、および筋酸素動態(ヘモグロビン量)との関係を定量化した。

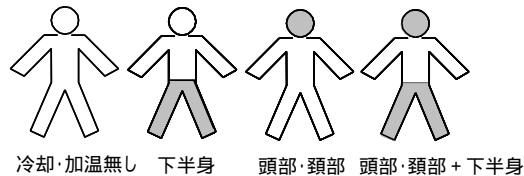


図2. 動的運動時の身体冷却部位



図3. 安静時下肢温浴

2) 測定項目：大腿部及び前額部の深部温 (ZHF 法, Yamakage, M, et al., J. Anesth, 2002), 皮膚温・食道温 (熱電対), 皮膚血流 (レーザードップラー法) を実験中に継続して測定し, 実験前後の体重変化から発汗量を定量した。また安静時の下肢温浴については上記の測定項目に加えて筋酸素動態(ヘモグロビン量)を測定した。



図 4. 水循環ズボン

(2) 筋温と無酸素性能力との関係：水循環ズボン (図 4) を用いて活動筋周囲を冷却・加温した場合の無酸素性作業能力と体温反応及び温熱ストレス (発汗量, 心拍数) を測定し, 温熱ストレスを軽減して無酸素性能力を維持できる至適筋温について検討した。

1) 実験方法：被験者は健康な成人男子 8 人とし, 所属大学の「ヒトを対象とする研究倫理審査委員会」の承認を受けて実施した。実験は室温 25°C に設定した実験室にて下半身の水循環ズボンを着用し, 6°C, 17°C, 30°C, 44°C の水を循環させて大腿部の筋温がそれぞれ 32, 34, 36, 38 に達した時点から, 自転車負荷装置 (POWERMAX-V3) を用いて最大パワー出現時の 60% 負荷強度による最大速度の自転車漕ぎ運動を 8 秒間, 40 秒の休憩を挟んで 8 回実施した。

2) 測定項目：大腿部及び下腿部の筋温 (ZHF 法), 鼓膜温 (赤外線反射法), 心拍数, 発汗量, 自転車運動による平均出力パワー, 最大パワー, 及びパワーの低下率を測定した。

(3) 筋温と有酸素性能力との関係：(2) と同様に水循環ズボンを用いて活動筋周囲を冷却・加温した場合の有酸素性能力と体温反応や発汗量, 心拍数を測定し, 温熱ストレスを軽減して有酸素性能力を最大限に発揮できる至適筋温について検討した。

1) 実験方法：被験者は健康な成人男子 8

人とし, 所属大学の「ヒトを対象とする研究倫理審査委員会」の承認を受けて実施した。実験は室温 25°C に設定した実験室にて下半身の水循環ズボンを着用し, 6°C, 17°C, 30°C, 44°C の水を循環させて大腿部の筋温がそれぞれ 32, 34, 36, 38 に達した時点から, リカベント式エルゴメーターを用いたエアロビックパワー (漸増負荷運動) テストを実施した。

2) 測定項目：大腿部及び下腿部の筋温 (ZHF 法), 皮膚温 (熱電対), 鼓膜温, 最大運動時間, 最大酸素摂取量 (呼気ガス分析), 発汗量, 心拍数を測定した。



図 5. 自転車負荷装置 (POWERMAX-V3)

4. 研究成果

(1) 環境条件の変化に伴う体温変動と体温調節反応の定量化

) 身体各部位の冷却による運動時の生体反応について, 上半身冷却は全身冷却と同程度に中枢温を抑制可能で, かつ活動部位の深部温を高く維持できること, さらに冷却面積が全身の 40% 以上であれば, 運動時の食道温や大腿部深部温上昇を同等に抑制できることが示された。また運動中における皮膚表面の急激な冷却は活動部位深部温を低下させるが皮膚血流や発汗も減少することから中枢温 (食道温) の上昇を引き起こし, 温熱ストレスを増大させることが明らかになった。

) 環境温度 21 及び 31 における軽運動時において, 能動的皮膚血管拡張反応が発現する体温閾値は, 食道温と平均皮膚温から算出した平均体温 (Tb2) よりも, ZHF 法によ

って測定した活動部位（大腿部）深部温と食道温および平均皮膚温から算出した平均体温(Tb3)と密接に関係していた。さらにZHF法を用いて非侵襲的に測定した運動時の前額部深部温から中枢温の指標として有用である食道温を推定する精度は環境温度や運動強度の影響を受け、中性温度域の環境条件にて運動強度が高く体温上昇が大きい場合は比較的精度が良いが、低温環境条件で体温変動が小さい場合、その推定精度は低下することが示された。

）下肢温浴時の大腿部深部温上昇は大腿部の皮膚温や皮膚血流量よりも、大腿部の筋酸素動態(ヘモグロビン量)と密接に関係することが示された。

このように、本研究の多様な実験結果から非侵襲的方法(ZHF法)により測定した深部組織温測定の有用性が示された。

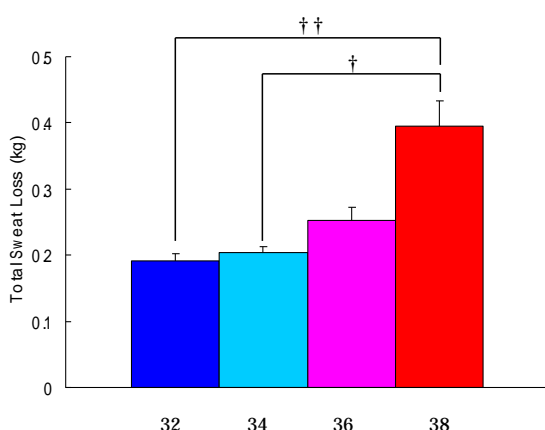


図6. 各実験条件間における最大パワー測定時の発汗量 (Total sweat loss)の比較(†, $p < 0.050$; ††, $p < 0.01$)

(2) 筋温と無酸素性能力との関係

平均出力パワー、最大パワー、パワーの低下率は大腿部及び下腿部筋温が38の条件では36の条件と類似し、34及び32の条件に比べて高かった。しかし、鼓膜温は38の条件では運動中に有意に上昇したが、36では一定の傾向を示し、34及び32では安静時に比べて有意に低下した。さらに運動中の発汗量(図6)や心拍数は38の条件が最も高く、34及び32の条件に比べて有意に高かった。したがって、最大速度における自転車漕ぎ運動中の最大出力パワーを維持し、かつ温熱ストレスを軽減できる活動筋温は36程度であることが示された。

(3) 筋温と有酸素性能力との関係

最大運動時間や最大酸素摂取量は各温度条件間で顕著な違いは認められなかったが、大腿部の筋温を36や38に設定した条件では鼓膜温や発汗量及び心拍数が34条件に比べて高かった。これらの結果から、温熱ストレスを軽減して有酸素パワーを最大限に発揮できる至適筋温は34程度であることが明らかになった。

以上の結果から本研究を総括すると、非侵襲的に深部組織温を測定できるZHF法は、熱電対を用いた食道温より応答時間が遅い傾向にあるため寒冷・温熱環境下における体温調節反応の測定には注意を要するが、運動能力と筋温との関係を明らかにする実験には有効利用できる可能性が示された。

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5件)

Tsuji, M, Kume, M, Tsuneoka, H, Yoshida, T. Differences in the heat stress associated with white sportswear and being semi-nude in exercising humans under conditions of radiant heat and wind at a WBGT of greater than 28°C. 査読有, Int. J. Biometeorology (in press), 2013, DOI:

10.1007/s00484-013-0722-3

Demachi, K, Yoshida, T, Kume, M, TsujiM, Tsuneoka, H. The influence of internal and skin temperature on active cutaneous vasodilation under different levels of exercise and ambient temperature in humans, 査読有, Int. J. Biometeorology, 57巻, 2013, 589-596. DOI: 10.1007/s00484-012-0586-y

Demachi, K, Yoshida, T, Kume, M, Tsuneoka, H. The effect of starting or stopping skin cooling on the thermoregulatory responses during leg exercise in humans, 査読有, Int. J. Sports Med. 33巻, 2012, 514-520. DOI: 10.1055/s-0031-13013292

Demachi K, Yoshida, T, Tsuneoka H. Relationship between mean body temperature calculated by two- or three-compartment models and active cutaneous vasodilation in humans: a comparison between cool and warm environments during leg exercise. Int. J. Biometeorology, 査読有, 56巻, 2012, 277-285. DOI: 10.1007/s00484-011-0430-9
出町耕一, 芳田哲也, 常岡秀行, 熱流補償法を用いて測定した運動時の前額部深部温と食道温との関係, 日本生気象学会雑誌, 査読有, 48巻, 2011, 119-127

[学会発表](計16件)

佐藤琢磨, 早朝空腹時安静時代謝の季節変動に与える体脂肪と運動習慣の影響, 第52回日本生気象学会大会, 2013年11月1日, 米子市文化ホール(鳥取県米子市)

井上恵子, 温熱ストレスを軽減して高強度の繰り返し運動能力を維持できる至適筋温の検討, 第68回日本体力医学会, 2013年09月21日, 日本教育会館(東京)

都)
佐藤琢磨, 女性スポーツ選手のトレーニング期における温熱負荷時の体温調節反応, 第 142 回京都滋賀体育学会, 2013 年 3 月 9 日, 京都工芸繊維大学(京都府京都市)
芳田哲也, 身体活動と水分・塩分, 第 27 回日本体力医学会近畿地方会, 2013 年 1 月 26 日, 大阪市立大学文化交流センター(大阪府大阪市)
佐藤琢磨, 成人男女の環境適応能力に与える運動習慣の影響, 第 51 回日本生気象学会大会, 2012 年 11 月 8 日~10 日, 長野県松本文化会館(長野県松本市)
新矢博美, 夏季における年齢階層別水分摂取基準の検討, 第 51 回日本生気象学会大会, 2012 年 11 月 8 日~10 日, 長野県 松本文化会館(長野県松本市)
芳田哲也, 現代日本人の環境適応能力に与える運動習慣の影響, 第 67 回日本体力医学会大会, 2012 年 9 月 14 日~16 日, 長良川国際会議場(岐阜県岐阜市)
田原育恵, 夏季における高齢者の 1 日の水分出納-特に不感蒸泄と発汗量からの検討-, 第 67 回日本体力医学会大会, 2012 年 9 月 14 日~16 日, 長良川国際会議場(岐阜県岐阜市)
良川諒介, 温熱負荷時における体温調節反応の季節差に与える運動習慣の影響, 第 141 回京都体育学会大会, 2012 年 3 月 3 日, びわこ成蹊スポーツ大学(滋賀県 大津市)
殿北将太, 温熱負荷時の温冷感上昇と運動習慣および性差との関連性, 第 141 回京都体育学会大会, 2012 年 3 月 3 日, びわこ成蹊スポーツ大学(滋賀県大津市)
良川諒介, 温熱負荷による体温調節反応の季節差に与える生活習慣の影響, 第 50 回日本生気象学会大会, 2011 年 11 月 4 日, 京都女子大学(京都府京都市)
久米 雅, 下肢温熱負荷時における大腿部の深部温とヘモグロビン量との関係, 第 50 回日本生気象学会大会, 2011 年 11 月 4 日, 京都女子大学(京都府京都市)
新矢博美, 体重計測より求めた水分損失量の測定精度に関する研究, 第 50 回日本生気象学会大会, 2011 年 11 月 4 日, 京都女子大学(京都府京都市)
廣田広恵, 体重計測より求めた水分損失に与える運動習慣と環境温度の影響, 第 50 回日本生気象学会大会, 2011 年 11 月 4 日, 京都女子大学(京都府京都市)
芳田哲也, 温熱負荷テスト時における体温調節反応に与える運動習慣の影響, 第 66 回日本体力医学会大会, 2011 年 9 月 19 日, 海峡メッセ下関(山口県下関市)
良川諒介, 温熱負荷時における体温調節反応の季節差に与える生活習慣の影響, 第 140 回京都体育学会, 2011 年 3 月 5 日, 京都女子大学(京都府京都市)

〔図書〕(計 1 件)

彼末一之, 他, 南江堂, やさしい生理学改訂第 6 版, 2011, 328

6. 研究組織

(1) 研究代表者

常岡 秀行 (TSUNEOKA HIDEYUKI)
京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授
研究者番号: 20188600

(2) 研究分担者

芳田 哲也 (YOSHIDA TETSUYA)
京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・准教授
研究者番号: 00191601