

原著論文

暑熱環境下における長時間運動時のパフォーマンス低下と 体温調節機能および循環系機能の関連

Effect of cardiovascular and thermoregulatory responses on maintaining performance during prolonged exercise in a hot environment

金谷 和幸¹⁾ 村川 増代^{1)・2)} 河端 隆志¹⁾

Kazuyuki Kanatani¹⁾ Masuyo Murakawa^{1)・2)} Takashi Kawabata¹⁾

Abstract

The aim of the present study was to examine the effect of cardiovascular and thermoregulatory responses on maintaining performance during prolonged exercise in a hot environment. Seven trained subjects (3 males, 4 females) completed a submaximal (60%VO₂max) constant load exercise test for 50 min at 25°C (NORM) and 32°C (HOT) (RH:40%). During exercise in a HOT compared with NORM, the power output was not maintained from 38 min (NORM:115±11W, HOT:107±9W) and stroke volume from 33 min (NORM:116±7ml, HOT:106±4ml) decreased significantly ($p<0.05$). Esophageal temperature (Tes) in HOT increased significantly from 7 min (NORM:36.97±0.11°C, HOT:37.15±0.07°C) at rest to the end of exercise (NORM:37.31±0.12°C, HOT:38.13±0.14°C) compared with NORM ($p<0.05$). It is suggested that an impaired maintain power output during prolonged exercise in a hot environment may be suppression of thermoregulation response caused by SV reduction. This appears to form part of an anticipatory response which impaired power output to reduce heat production, thereby ensuring that thermal homeostasis is maintained during exercise in the hot environment.

キーワード：暑熱環境、体温調節機能、循環系機能、運動パフォーマンス、仕事量
hot environment, thermoregulatory, cardiovascular, exercise
performance, power output

暑熱環境下での身体運動において、生体では運動を継続するために要求される骨格筋への筋血流量の維持と体内で産生された熱を放散するための皮膚血流量の維持という2者の制御機能が高次元で働く。そのため、心・循環系機能と

体温調節反応は密接な関係があるといえる。

暑熱環境下における運動時の深部体温および皮膚温の動態は通常環境下と比較して上昇傾向にあり、また運動パフォーマンスも低下することが報告されている (Nielsen et al., 1993; Nybo

1) 関西大学大学院 人間健康研究科

Kansai University Graduate School of Health and Well-being

2) 明治国際医療大学

Meiji University of Integrative Medicine

et al., 2014; Parkin et al., 1999).

González-Alonso et al. (1999) によれば、運動開始前に被験者の食道温を水浸によって 36.37, 38℃ に変化させたのちに疲労困憊まで自転車運動を行わせたが、疲労困憊時の食道温はどの条件下でも 40.1 ~ 40.2℃ であり、さらに、運動前の食道温が高温なほど運動継続時間が短くなることを報告した。このことから運動時の体温上昇には限界レベルがあり、高体温が運動時の制限因子のひとつと考えられ、運動パフォーマンスや運動継続は深部体温の影響を大きく受けるものと考えられる。

また、体温調節の制御機能は心・循環系機能とも密接な関係があり、運動時の高体温に繋がる過度な体温上昇を抑制するためには血液の循環系機能の役割が重要といえる。暑熱環境下での運動は、活動筋への血流の供給に加えて皮膚への血流の配分が要求され、脳を除くその他の臓器では血液の再分配により血流量の低下を示し、通常環境下における同程度の運動強度と比較して循環系への負担は大きいものとなる。さらに、運動を継続すると深部体温が上昇し、同時に皮膚血流の増加に伴う血管拡張により末梢循環に血液が貯留し、さらには発汗による体液の喪失が生じる。こうした血液量の相対的・絶対的低下は中心静脈環流の低下および 1 回心拍出量 (SV) を低下させる。活動筋への血液供給が十分に行われなければ運動継続は困難となる。

これまでの研究では暑熱環境下における運動強度 70% VO_2max での運動によって引き起こされる高体温が、運動パフォーマンスの低下を引き起こすという報告がなされている (Galloway and Maughan, 1997; Parkin et al., 1999)。しかし、自己ペースによる運動では体温が過度に上昇する前に運動パフォーマンスの低下が発生するという報告もされている (Périard and Racinais, 2016; Schlader, 2011; Tucker et al., 2006; Tucker et al., 2004)。スポーツの競技特性により瞬発的に最大限の力を求められる競技もあるが、マラソンや自転車競技におけるロードレースなどの高いパフォーマンスを長時間、

継続的に発揮しなければならない持久的な力を必要とする競技もある。これまでの実験室的プロトコルでは、最大下一定負荷運動時の仕事量を維持できる範囲の運動を負荷するため、最大下一定負荷運動時の仕事量 (運動パフォーマンス) の経時変化を明確に示したものが無い。一定量の仕事量の維持を要求しても維持できずパフォーマンスが低下する局面を時系列に応じて示した研究はみられない。

そこで本実験では、通常環境下 ($Ta25^{\circ}C$, 40% RH) と暑熱環境下 ($Ta32^{\circ}C$, 40%RH) の 2 つの環境下で 50 分間の最大下運動負荷中 (60% VO_2max の生理的相対負荷) の仕事量の連続測定を行い、暑熱環境下長時間運動時の仕事量 (運動パフォーマンス) と心・循環器系機能および体温調節反応との関係から仕事量の維持に及ぼす影響について検討することを目的とした。

方法

被験者：

被験者は定期的に運動を行っている健康な成人 7 名 (男性 3 名, 女性 4 名, 年齢: 22 ± 1 歳, 身長: 171.9 ± 4.3 cm, 体重: 68.2 ± 4 kg) を対象とした。

被験者には、まず本実験に関するインフォームドコンセントについて十分に説明し、同意を得たものについて被験者とした。実験に先立ち、実験時に被験者への運動強度を決定するために、人工気候室 ($Ta25^{\circ}C$, RH40%) にて通常環境下で最大酸素摂取量 (VO_2max) の測定を行った。

環境条件と運動様式：

環境条件は、発汗によって熱放散が引き起こされる暑熱環境下 ($Ta32^{\circ}C$, RH40%) (Lind, A. R., 1963) と対照として運動時の体温が環境温の影響を受けない通常環境下 ($Ta25^{\circ}C$, RH40%) (Davies CTM, 1987) の 2 つの環境条件を設定し、人工気候室 (ESPEC 社製) 内において実施した。運動様式は、暑熱環境下での運動継続によって心・循環器系機能に影響を及

ほすようにするため、プレテストで計測した $VO_2\max$ の60%に相当する負荷強度 (Nose et al., 1994; González-Alonso et al., 1998) を算出し、30分間以上の椅座位安静の後、一定負荷 (60% $VO_2\max$) による最大下運動を50分間遂行した。運動終了後の回復期は30分間とした。実験は2条件とも同時刻に行い、実験間隔は、前の運動の影響がないように十分な期間 (1週間以上) を空けて実施した。

測定項目：

測定項目は、HR (心拍数)、CO (心拍出量)、SV (1回心拍出量)、Tes (食道温)、FBF (前腕血流量) を安静時より1分ごとに連続測定を行った。また、50分間の運動中は自転車運動による仕事量の連続測定も行った。

実験プロトコル：

被験者は、来室後、短パンとTシャツに着替えてから約300mlの水を摂取した後排尿をして体水分の平衡を行った。つぎに、人工気候室内にて椅座位安静を取り、その間に計測機器を装着した。はじめに、心拍センサー (PolarH10) を装着した。CO、SV (EV-1000, Edward Lifescience Ltd.) は左手中指の指尖部にカフを装着し、ポリウムクランプ法およびフィジオキナル法により指尖動脈圧から上腕動脈圧を算出して連続的に測定を行った (Bartels et al., 2011; Panzarino et al., 2017)。さらに、Tesはサーミスター (LT-8, Gram Corporation) を鼻腔より身長 $1/4$ cm挿入し測定した。FBFはレーザードップラー法による血流測定器 (ALF21, アドバンス社製) を左前腕外側部に装着して測定した。

被験者はすべての測定機器を装着したあと計測用の自転車に移動して実験を遂行した。

仕事量の測定：

仕事量の測定は、DRIVO (ダイレクトドライブ式トレーナー シマノ ELITE 社) とEDGE1030 (GARMIN) をセットで使用し、運動時の仕事量の変化を1秒ごとに測定した。運

動中はメトロノームのリズムおよび被験者前面に表示されるデジタル式回転数を確認しながら自転車の回転数を60rpmにできる限り維持するように指示し、60rpm時に60% $VO_2\max$ の負荷になるようにギアを設定し、運動時の仕事量を測定した。

皮膚血管コンダクタンス (FVC) の算出：

皮膚血管拡張の程度を表すFVCはFBFを平均動脈血圧 (MAP) で除して算出した。

統計解析：

本実験の測定値は平均値 \pm 標準誤差 (mean \pm SE) で示した。通常および暑熱環境における運動条件の平均値の差は、環境条件と時間の2つを要因とする二元配置反復測定分散分析を用いて比較し、有意差が検出された場合においてはBonferroniを用いて多重比較検定を行った。また、運動時の仕事量とSVの関係はピアソンの相関係数から求め相関関係を検討した。すべての統計処理における有意水準は $p < 0.05$ とした。

なお本実験は関西大学人間健康学部研究倫理委員会の承認 (2017-11) を得て実施した。

結果

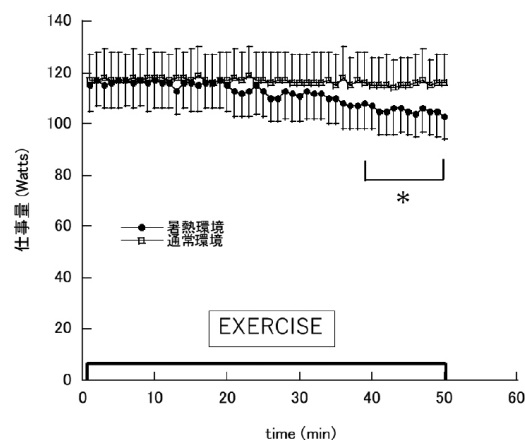


図1 運動時の仕事量の動態

* < 0.05 vs 通常環境

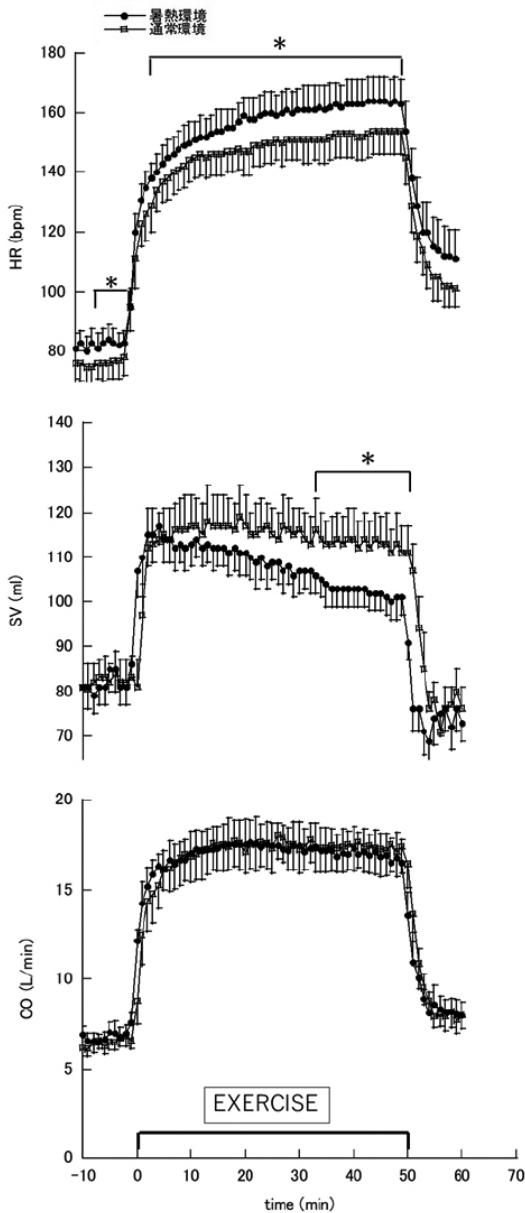


図2 HR, SV, COの安静時及び運動時の動態
* <math>< 0.05</math> vs 通常環境

仕事量の動態：

図1は運動時の仕事量の動態を示した。プレテストとして通常環境下 ($Ta25^{\circ}\text{C}$, $\text{RH}40\%$) にて測定を行った VO_2max より算出した7名の $60\%\text{VO}_2\text{max}$ の相対運動負荷の平均は $118 \pm$

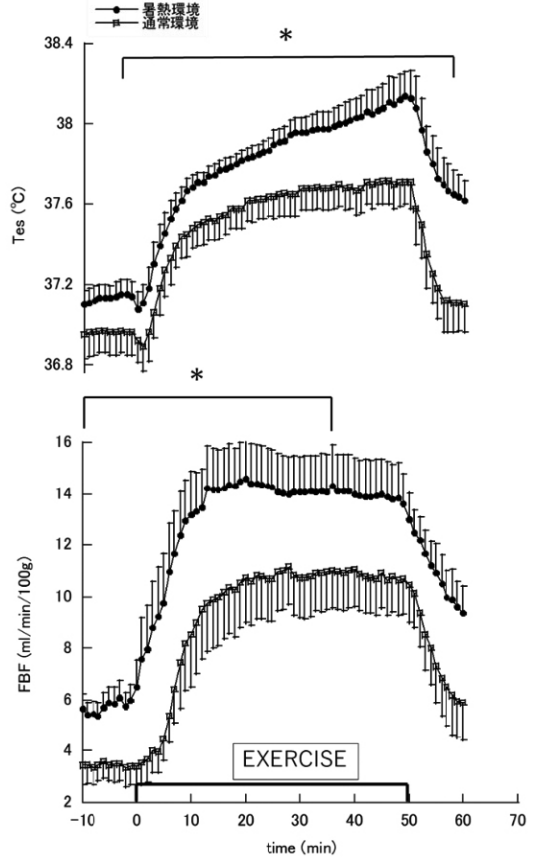


図3 Tes, FBFの安静時及び運動時の動態
* <math>< 0.05</math> vs 通常環境

11Wであった。対照である通常環境下では、運動開始 ($117 \pm 10\text{W}$) より相対負荷強度を運動終了まで定常に維持していた。暑熱環境では、運動開始から定常状態 ($115 \pm 10\text{W}$) を維持していたが21分目 ($113\text{W} \pm 10\text{W}$) より低下傾向がみられ、38分目 (通常環境: $117 \pm 11\text{W}$, 暑熱環境: $107 \pm 9\text{W}$) より以降は、通常環境と比較して有意に低い値がみられた。

暑熱環境下運動時の生理的反応：

HR, SV, COの暑熱環境と通常環境の動態を示したものが図2である。HRでは安静開始から3分までは両環境下の間に有意な差は見ら

れなかったものの、安静4分より暑熱環境 81 ± 5 bpm で通常環境 76 ± 5 bpm と比較して有意に高値を示した。その後運動開始より両環境下でHRの応答は運動に対する増加を示し、運動開始2分から通常環境 111 ± 10 bpm に対し暑熱環境では 120 ± 6 bpm と暑熱環境が通常環境と比較して有意に高い値を示した。その後は両環境下においても体温上昇 (Coyle, E. F. and González-Alonso, J., 2001; Chou, T. H., et al, 2018) とSV減少 (Nose et al., 1994) の影響によって cardiovascular drift を示し、運動終了時の通常環境 153 ± 8 bpm, 暑熱環境 163 ± 8 bpm まで暑熱環境が通常環境と比較して有意に高い値を示した。

COでは安静時において、通常環境(安静時10分間の平均値) 6.2 ± 0.4 L/min と暑熱環境(安静時10分間の平均値) 6.9 ± 0.5 L/min の間に有意な差は見られなかった。また、両環境下ともに運動開始からCOの増加がみられ定常状態を示し、運動時においても両環境の間に有意差は見られなかった。

SVでは安静時において、暑熱環境(安静時10分間の平均値)では 81 ± 5 ml, 通常環境(安静時10分間の平均値)では 81 ± 5 ml と両環境下の間に有意な差は見られなかった。しかし、運動開始33分より暑熱環境 108 ± 5 ml が通常環境 117 ± 5 ml に比較して有意に低い値を示し、運動終了時まで暑熱環境が通常環境と比較して有意に低い値を示した。運動終了後の回復期には両環境下の間に有意差は見られなかった。

図3にはTesおよびFBFの暑熱環境と通常環境の動態を示した。Tesにおいては安静時7分から暑熱環境 37.15 ± 0.07 °C が通常環境 36.97 ± 0.11 °C と比較して有意に高い値を示し、それ以降運動終了時まで暑熱環境が有意に高い値を示し続け、運動終了時では通常環境 37.71 ± 0.13 °C, 暑熱環境 38.13 ± 0.14 °C まで上昇した。さらに運動終了後の安静時(安静時10分間の平均値)まで暑熱環境が通常環境と比較して有意に高い値を示した。

FBFでは安静時において、暑熱環境(安静時10分間の平均値) 5.67 ± 0.54 ml/min/100g が

通常環境(安静時10分間の平均値) 3.27 ± 0.70 ml/min/100g に比較して有意に高い値を示し、運動開始34分の暑熱環境 14.00 ± 1.38 ml/min/100g, 通常環境 11.61 ± 1.30 ml/min/100g まで暑熱環境が通常環境と比較して有意に高い値を示した。その後は暑熱環境で高い値を示す傾向が見られたものの有意な差は認められなかった。(図3)

考察

暑熱環境下での長時間運動は、心・循環系機能と体温調節反応が運動パフォーマンス維持能力低下の原因となる可能性がある。本研究の目的は、暑熱環境下での長時間運動におけるパフォーマンス維持に、心・循環系機能と体温調節反応がどのように影響するかを調べることであった。本実験ではスポーツの競技特性により、長時間、継続的に最大下運動を發揮しなければならない持久的なパフォーマンスを要求される競技を想定し、最大下一定負荷運動を用いて実験を行い、運動パフォーマンスの評価として仕事量の測定を行った。暑熱環境下では通常環境下と比較して仕事量が38分目(通常環境下: 117 ± 11 W, 暑熱環境下: 107 ± 9 W)より有意な低下を示し、運動パフォーマンスの低下がみられた。この仕事量の低下に対して心・循環器系機能および体温調節反応がどのような影響を及ぼしているのかを検討していく。

暑熱環境下での時速5.6kmの速度で7.5, 10, 12.5, および15%の傾斜をトレッドミルで走行した運動時の運動パフォーマンス低下はSVとCOの減少に起因する骨格筋血流の減少が要因であるという報告がある (Rowell et al., 1966)。また, Périard et al. (2011) も室温35°Cでの自転車運動における40kmのタイムトライアル中のSV減少と並行して仕事量が低下し、暑熱環境下での50分の運動で行われた測定値の回帰分析は仕事量の低下とSVの減少との間に強い相関関係がみられたと報告しており、本実験においても同様に仕事量の低下とSV減少との間に正の相関関係がみとめられた($r=0.94$) (図4)。

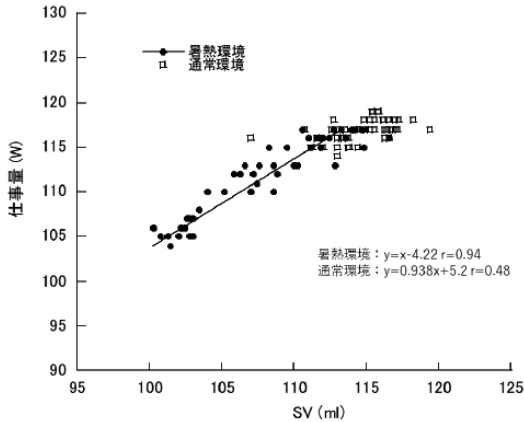


図4 暑熱・通常環境下における運動時の仕事量とSVの関係

SV減少についてNose et al. (1994)は、暑熱環境下での長時間運動 (Ta30℃, RH20%, 60% VO₂max) では、体温上昇によりFBFが増加するが、末梢では血液貯留が起これ、右心房圧が低下し、それによりSVが低下すると報告した。暑熱環境下での長時間運動は、過度な体温上昇によってFBF増加による熱放散だけでは間に合わず発汗による熱放散も行い、発汗による体液損失、FBF増加に伴う静脈血へのプーリングが静脈還流量の低下を引き起こしSVの減少につながったと報告しており、本実験においても同様の結果が得られた。(図2)

また、SV減少は体温調節反応を抑制させることが報告されている (Rowell, 1986)。運動時には体温調節反応を犠牲にして血圧維持のために皮膚血管拡張反応の抑制が引き起こされる (Nadel et al., 1979; Rowell, 1986)。そして、運動によって体内で生成される熱量と熱放散との間に異常が生じ、体温が過度に上昇し高体温になることが運動パフォーマンスや運動継続時間の低下を引き起こす (González-Alonso et al., 1999; Nybo and Nielsen, 2001)。

運動時の皮膚血管拡張の程度を示すFVCと仕事量をTesに対してプロットし動態を示したものが図5である。暑熱環境下ではFVCはTesの上昇とともに上昇したが定常状態を示す

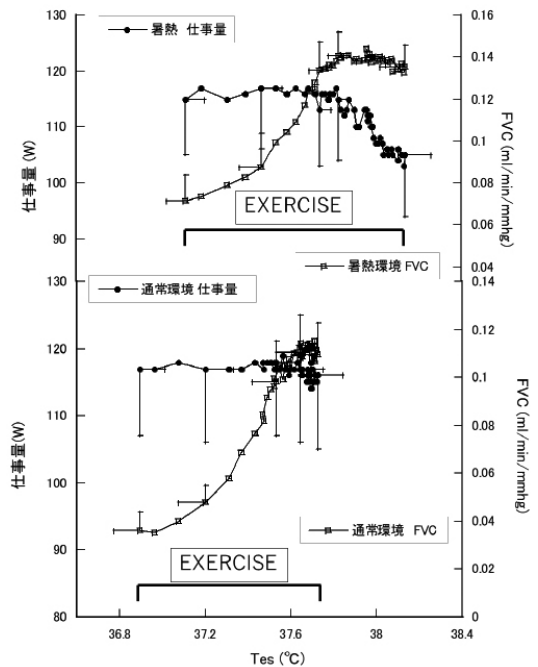


図5 両環境下における運動時のTes上昇に対する仕事量、FVCの動態 (上：暑熱環境下，下：通常環境下)

と仕事量の低下がみられた。FVCの定常状態は皮膚血管拡張を抑制しFBFの増加を抑制させ、体外への熱放散を抑制する。これまで、FVCと仕事量の関係を示した研究はみられないが、効率よく熱放散をできなくなることで体内に熱が蓄積し、高体温を防ぐためパフォーマンスが低下したのではないかと示唆される。

Tucker et al. (2006)は暑熱環境下において熱放散がうまくできず体内で蓄熱した結果、仕事量の低下に繋がったことを報告している。また、熱放散能力が低下していることを脳へ伝達し、体温が危険なレベルまで急激に上昇するのを防ぐために事前に熱の生成を抑制するため運動パフォーマンスを低下させることが報告されている (Tucker et al., 2004)。過度な体温上昇が起こる前に仕事量を早期に低下させ、活動筋の動員を減少させることで熱の生成速度を確実に低下させ、熱の産生を抑制し、相対的な熱恒常性が維持される。長時間運動により引き起こ

される過度な体温上昇による高体温は、それ自身が運動パフォーマンスの制限因子となり末梢及び中枢神経系を介して疲労感を誘発し、運動パフォーマンスの低下ひいては熱中症などを引き起こしていると考えられる (Nybo and Nielsen, 2001)。

これらのことから暑熱環境下における仕事量の低下は、SV 減少に起因するものと、それだけでなくSV 減少によって引き起こされたFVCの定常状態によるFBF増加抑制が熱放散を抑制し、体温調節機能の中枢への予測的フィードバック機能によるものと考えられる。すなわち運動による過度な体温の上昇によって引き起こされる高体温を前もって防ぎ、生命維持を優先させるために仕事量の低下を引き起こしたのではないかと示唆される。

結論

本実験では暑熱環境下での長時間運動におけるパフォーマンス維持に、心・循環系機能と体温調節反応がどのように影響するかを検討するために通常環境下と暑熱環境下の2つの環境において比較を行った。仕事量（運動パフォーマンス）では、暑熱環境下において38分目より通常環境下と比較して有意な低下がみられた。これは、体温上昇に起因するSVの減少がFVCの上昇を抑制し、やがてFVCの定常状態を引き起こしたことで、体外への熱放散能力を低下させたことが要因ではないかと考えられる。これらのことから暑熱環境下での長時間運動時の仕事量の低下はSVの減少とSV減少に起因する体温調節反応の抑制によるものではないかと示唆される。熱の発生を抑えるために出力を低下させることで、暑熱環境下での運動でも熱の恒常性を保つようにするための予測的な反応の一部であると考えられる。

参考文献

Bartels, S., Stok, W., Bezemer, R., Boksem, R., Van Goudoever, J., Cherpanath, T., Van Lieshout, J., Westerhof, B., Karemaker, J., and Ince, C. (2011). Noninvasive cardiac

output monitoring during exercise testing: Nexfin pulse contour analysis compared to an inert gas rebreathing method and respired gas analysis. *J. Clin. Monit. Comput.*, 25: 315-321.

Chou, T.H., Allen, J.R., Hahn, D., Leary, B.K. and Coyle, E.F. (2018). Cardiovascular responses to exercise when increasing skin temperature with narrowing of the core-to-skin temperature gradient. *J. Appl. Physiol.*, 125: 697-705.

Coyle, E. F., and González-Alonso, J. (2001). Cardiovascular Drift during Prolonged Exercise: New Perspectives. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, 29: 88-92.

Davies CTM (1987) Temperature regulation in adults and young children during severe exercise. In: Hales JRS, Richard DAB, Eds., Heat stress, Physical exertion and environment. Elsevier Science, Amsterdam, pp. 251-260.

Galloway, S. D. R., and Maughan, R. J. (1997). Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 29: 1240-1249.

González-Alonso, J., Calbet, J. A. L. and Nielsen, B. (1998). Muscle blood flow is reduced with dehydration during prolonged exercise in humans. *J. Physiol.*, 513: 895-905.

González-Alonso, J., Teller, C., Andersen, S., Jensen, F., Hyldig, T., and Nielsen, B. (1999). Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *J. Appl. Physiol.*, 86: 1032-1039.

Lind, A. R. (1963). A physiological criterion for setting thermal environmental limits for everyday work. *J. Appl. Physiol.*, 18: 51-6.

Nadel, E. R., Fortney, S. M., and Wenger, C. B. (1980). Effect of hydration state on circulatory and thermal regulations. *J. Appl.*

- Physiol. Respir. Environ. Exerc. Physiol.*, 49: 715–721.
- Nadel, E. R., Cafarelli, E., Roberts, M. F., and Wenger, C. B. (1979). Circulatory regulation during exercise in different ambient temperatures. *J. Appl. Physiol.*, 46: 430–7.
- Nielsen, B., Hales, J., Strange, S., Christensen, N., Warberg, J., and Saltin, B. (1993). Human circulatory and thermoregulatory adaptations with heat acclimation and exercise in a hot, dry environment. *J. Physiol.*, 460: 467–85.
- Nose, H., Takamata, A., Mack, G., Oda, Y., Kawabata, T., Hashimoto, S., Hirose, M., Chihara, E., and Morimoto, T. (1994). Right atrial pressure and forearm blood flow during prolonged exercise in a hot environment. *Pflügers Arch. Eur. J. Physiol.*, 426: 177–182.
- Nybo, L. and Nielsen, B. (2001). Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans. *J. Appl. Physiol.*, 91: 1055–1060.
- Nybo, L. and Nielsen, B. (2001). Perceived exertion is associated with an altered brain activity during exercise with progressive hyperthermia. *J. Appl. Physiol.*, 91: 2017–2023.
- Nybo, L., Rasmussen, P., and Sawka, M. N. (2014). Performance in the heat-physiological factors of importance for hyperthermia-induced fatigue. *Compr. Physiol.*, 4: 657–689.
- Panzarino, M., Gravina, A., Carosi, V., Crobeddu, P., Tiroli, A., Lombardi, R., D’Ottavio, S., Galante, A., and Legramante, J. (2017). Cardiovascular and hemodynamic responses to adapted physical exercises in very old adults. *Ageing Clin. Exp. Res.*, 29: 419–426.
- Parkin, J. M., Carey, M. F., Zhao, S., and Febbraio, M. A. (1999). Effect of ambient temperature on human skeletal muscle metabolism during fatiguing submaximal exercise. *J. Appl. Physiol.*, 86: 902–908.
- Périard, J. D., Cramer, M. N., Chapman, P. G., Caillaud, C. and Thompson, M. W. (2011). Cardiovascular strain impairs prolonged self-paced exercise in the heat. *Exp. Physiol.*, 96: 134–144.
- Périard, J. D., and Racinais, S. (2016). Performance and pacing during cycle exercise in hyperthermic and hypoxic conditions. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 48: 845–853.
- Rowell, L. B. (1986). HUMAN CIRCULATION. in *Circulatory adjustments to Dynamic Exercise and Heat Stress: Competing Controls* 363–406 (Oxford University Press, 1986).
- Rowell, L. B., Marx, H. J., Bruce, R. A., Conn, R. D., and Kusumi, F. (1966). Reductions in cardiac output, central blood volume, and stroke volume with thermal stress in normal men during exercise. *J. Clin. Invest.*, 45: 1801–1816.
- Schlader, Z. J., Stannard, S. R., and Mündel, T. (2011). Is peak oxygen uptake a determinant of moderate duration self-paced exercise performance in the heat? *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, 36: 863–872.
- Tucker, R., Marle, T., Lambert, E. V., and Noakes, T. D. (2006). The rate of heat storage mediates an anticipatory reduction in exercise intensity during cycling at a fixed rating of perceived exertion. *J. Physiol.*, 574: 905–915.
- Tucker, R., Rauch, L., Harley, Y. X. R., and Noakes, T. D. (2004). Impaired exercise performance in the heat is associated with an anticipatory reduction in skeletal muscle recruitment. *Pflügers Arch. Eur. J. Physiol.*, 448: 422–430.

(受付日 2022/01/11 受理日 2022/06/01)