運動時体温調節反応に及ぼす Warm-up の影響

丹 羽 健 市 荒 木 善 行

INFLUENCE OF WARM-UP ON THERMOREGULATORY RESPONSES DURING EXERCISE

KEN-ICHI NIWA and YOSHIYUKI ARAKI

Abstract

To examine the influence of warm-up on thermoregulatory responses during exercise, heat balance was measured in 5 healthy male students during 1hr of exercise at 600 kpm/min work intensity in a climatic room of WBGT (Wet-Bulb Globe Temperature) at 30°C with or without pre-exercise warm-up at the minimum phase (6:00~7:00) of body temperature.

There was no significant difference in heat production between exercise with and without warm-up. Evaporative heat loss during exercise with warm-up was 4~8% higher than that without warm-up.

Warm-up did not influence dry heat loss. Body heat storage during exercise without warm-up was 36% higher than that with warm-up.

The slope of the characteristic curve between the sweating response and elevation of rectal temperature during exercise with warm-up was higher than that without warm-up. These results indicate that the increased evaporative heat loss resulting from warm-up is brought about by changes in the sensitivity of the thermoregulatory response.

(Jpn. J. Phys. Fitness Med. 1995, 44:113~118)

key words: Exercise, Warm-up, Thermoregulatory responses

I. は じ め に

体温の周期的変動のうち、古くから知られているものに1日を周期とするリズム変動がある。著者らは、数年来、運動時体温調節反応の日周変動に関する研究を行っているが、そのなかで、早朝と夕刻に3,000m走を実施し、その際の記録及び疾走前後の体重減少と口腔温について検討した。その結果、記録は11名中8名において夕刻の方が良好で、発汗量は早朝に比して夕刻に大、体温上昇は夕刻に比して早朝に大であった。これらの知見は同一個人における観察とはいえ、外部環境条件の違いや身体内部条件の不同を考慮に入れると、単に深部体温の高低によるとは結論できない。しかし体温そのものが種々の生体機能の統合的な調節の結果であると同時に生体機能遂行の基本条件設定の素地であることを考えると、特に、

体温の低い早朝時の Warm-up は(以下、W-up と記す)競技成績やトレーニングの能率を高める上で、さらに障害予防の観点からも重要な意味をもつものと考えられる。

本研究は男子大学生を対象に体温最低期(早朝・6:00)における W-up が運動時体温調節反応にどのような影響を及ぼすかを観察し、それがまた調節系の動作特性にいかなる変化をもたらすかについて検討した。

II. 実 験 方 法

被験者は21~23歳の健康な男子大学生(運動鍛練者)5名で、その身体的特徴は身長 174.8 ± 3.2 cm, 体重 68.6 ± 4.0 kg であった。

本実験に先立ち、体温日周変動の午前6時と午後6時に一定強度の運動を1時間負荷し、その際の体温調節反応を体熱平衡の側面より観察した

Fig. 1. Changes of rectal temperature during one hour exercise at 600 kpm/min work intensity in the minimum phase and the maximum phase of body temperature. *** $p < 0.001$, ** $P < 0.01$

〈図1〉。その結果、運動時の体温上昇は夕刻に比して早朝時に有意に大きく、それは、主として蒸発性熱放散の増減によって起こることを観察した。そこで、実験は同一被験者を対象に体温のほぼ最低期(6:00)にW-upを実施した場合(with W-up)、実施しなかった場合(without W-up)の2通りの実験をWBGT 30℃:NWB 28.3℃, GT (NDB)33.9℃, 室内の気流 0.6 m/secのもとで自転車エルゴメーター(Monark社製)による運動を1時間負荷し、その際の体温調節反応を測定・観察した。なお、運動強度は600 kpm/minでペダリングを一定に保ち易くするためにメトロノームで指示した。実験に際し、各被験者は環境温 $25.0 \pm 2.0^\circ\text{C}$ の室内で約30分間の安静状態を保持した後、実験開始10分前にあらかじめ所定の環境条件に設定した人工気象室に入室した(上半身裸体, 下半身は水泳パンツ着用)。その間に、熱電対の貼付並びに挿入, 呼吸マスクの装備を行った。装備終了後、被験者はベッドバランスに固定した自転車エルゴメーター上で5分間の安静を保持したのち運動を開始した。なお、ベッドバランス上の汗の蒸発を防ぐため、流動パラフィンを入れた

バットをベッドバランス上に置き、その中に自転車をセットした。また、W-upの実験時では、実験開始40分前より、柔軟体操, ストレッチ, そして構内のジョギングを含むW-upを30分程度実施した。このW-upで直腸の温度はW-up非実施時に比して 0.62°C ($36.62 \pm 0.10^\circ\text{C} \rightarrow 37.24 \pm 0.08^\circ\text{C}$)上昇し、午後6時に運動を開始した時点の体温($37.28 \pm 0.19^\circ\text{C}$)とはほぼ一致した。

測定項目とその方法は以下の如くである。

運動時の呼吸採取は運動開始20分, 40分そして60分目に2分間の呼吸を採集した。採集された呼吸は直ちに1回転10Lの乾式ガスメーターによって計量し、その一部をサンプルとして労研式大型呼吸ガス分析器により分析し、酸素摂取量ならびに炭酸ガス排泄量を算出した。

直腸温の測定は熱電対の先端を直腸内に8~10 cm挿入し、皮膚温はHardyとDuBois⁸⁾の身体8ヶ所(前額部, 胸部, 背部, 上腕部, 手部, 大腿部, 下腿部, 足部)に熱電対を貼付し、直腸温とともに自動精密温度測定器(感度 0.01°C , 精度 ± 0.10)で1分ごとに打点記録した。さらに出力をデジタル信号に変換し、マイクロコンピュータにより平均皮膚温と平均体温を算出した。体重減少は運動前後の体重測定から計測(デジタル精密体重計)するとともに、ベッドバランス(感度1.0 g, 精度 ± 2.0 g, 米国(James Potter社製)を介して実験中連続記録した。発汗量はベッドバランスによって計測した体重減少から呼吸性の体重減少量を差引いて算出した⁹⁾。

運動時の熱平衡は次式に基いて行った。

$M = E \pm R \pm C \pm W \pm S$ (単位は w/m^2) 熱産生量は代謝(M)から熱に転換された仕事量(W)を差引いて算出した。蒸発(E)による熱放散は水分1 gにつき 0.585 kcal を乗じて、体表面からの幅射(R)と対流(C)による熱放散は直接測定することが望ましいが蒸発熱量(E)と貯熱量の増減(ΔS)を熱産生量から差引いて間接的に求めた。貯熱量(S)は平均体温($\bar{T}_b = 0.8 \bar{T}_{re} + 0.2 \bar{T}_s$)の変化を求め平均体温の変化量($\Delta \bar{T}_b$)×比熱(0.83)×体重の式より算出した³⁾。

なお、本実験は平成5年10月中旬~11月中旬の

比較的寒い期間に行われた。

統計量は平均値±標準誤差で示し、各群間の平均値の有意差検定には Student の paired t-test を用い、5%水準をもって有意とした。

Ⅲ. 実験成績

A. 各測定値の一般的概要

運動時の直腸温の時間経過を〈図2〉に、また〈表1〉には運動終了直前における各測定値の反応水準ならびにその変化量を非 W-up 時、W-up

Fig. 2. Changes of rectal temperature during one hour exercise at 600 kpm/min work intensity the minimum phase of body temperature.

***P<0.001

時ごとに示した。

運動終了直前の酸素摂取量は W-up の有無にかかわらず、1.554～1.577 L/min の範囲にあった。運動開始時の直腸温は非 W-up 時で $36.62 \pm 0.10^{\circ}\text{C}$ 、W-up 時で $37.24 \pm 0.08^{\circ}\text{C}$ と W-up 時の方が有意に高い ($p < 0.001$)。直腸温は運動開始とともに直線的に上昇し、その変化量は W-up 時で $1.52 \pm 0.14^{\circ}\text{C/hr}$ 、非 W-up 時で $2.08 \pm 0.13^{\circ}\text{C/hr}$ と非 W-up 時の方が有意に大であった ($p < 0.001$)。また、運動終了直前の反応水準は W-up の有無にかかわらず $38.72 \sim 38.76^{\circ}\text{C}$ の範囲にあり両者間に有意な差異は認められなかった。運動開始時の平均皮膚温は非 W-up 時、W-up 時ともに $34.53 \sim 34.74^{\circ}\text{C}$ の範囲にあった。また、運動終了直前の水準は $35.68 \sim 36.02^{\circ}\text{C}$ の範囲にあり、両者間に差異は認められなかった。運動終了時の平均体温は非 W-up 時で $38.16 \pm 0.19^{\circ}\text{C}$ 、W-up 時で $38.11 \pm 0.21^{\circ}\text{C}$ と両者間に差異は認められないが、その変化量は非 W-up 時で $1.92 \pm 0.13^{\circ}\text{C/hr}$ 、W-up 時で $1.41 \pm 0.21^{\circ}\text{C/hr}$ と非 W-up 時の方が有意に大であった ($p < 0.01$)。

総汗量は W-up 時で $1.27 \pm 0.29 \text{ L/hr}$ 、非 W-up 時で $1.15 \pm 0.29 \text{ L/hr}$ と両者間に差異は認められない。しかし蒸発に直接関与した有効汗量は運動中を通して W-up 時の方が高い水準にあり、その傾向は、特に運動開始直後10～20分までに認められた〈図3〉。運動1時間の有効汗量は、

Table 1. Values at the end of one hour exercise at 600 kpm/min work intensity and their change the period

	without W-up	with W-up
Oxygen intake (ml/min)	1577 ± 86	1554 ± 38
Rectal temperature ($^{\circ}\text{C}$)	38.76 ± 0.13	38.72 ± 0.21
Δ Rectal temperature ($^{\circ}\text{C/hr}$)	2.08 ± 0.13	$1.52 \pm 0.14^{***}$
Mean skin temperature ($^{\circ}\text{C}$)	36.02 ± 0.59	35.68 ± 0.35
Δ Mean skin temperature ($^{\circ}\text{C/hr}$)	1.20 ± 0.45	1.12 ± 0.45
Mean body temperature ($^{\circ}\text{C}$)	38.16 ± 0.19	38.11 ± 0.21
Δ Mean body temperature ($^{\circ}\text{C/hr}$)	1.92 ± 0.13	$1.41 \pm 0.21^{**}$
Total sweat rate (L/hr)	1.15 ± 0.29	1.27 ± 0.29
Effective sweat rate (ml/hr)	452 ± 18	$483 \pm 30^{*}$

***P<0.001

**P<0.01

*P<0.05

Fig. 3. Sweat rate and body heat storage during one hour exercise at 600 kpm/min work intensity.

Fig. 4. Relationship between effective sweat and rectal temperature during exercise.

W-up 時で 483 ± 30 mL/hr, 非 W-up 時で 452 ± 18 mL/hr と有意な差異が認められた ($p < 0.05$).

〈図 4〉に直腸温と有効発汗量との関係を示した。W-up の有無に応じて、発汗特性曲線の特徴を比較すると、発汗発現閾値直腸温は非 W-up 時に比して W-up 時の方が高く、その変動幅は 0.48°C であった。一方、発汗特性曲線の傾斜、すなわち感度は W-up 時に大であった。

B. 体熱平衡

熱平衡の計算は運動開始直後から終了時までの 1 時間の値を基に行った。

〈図 5〉に熱産生量ならびに呼吸気道と体表面からの蒸発及び幅射、対流による熱放散量そして

Fig. 5. Heat production and heat loss during one hour exercise at 600 kpm/min work intensity. * $P < 0.05$, E_{resp} : Respiratory evaporative heat loss (W/m^2), E : Evaporative heat loss, S : Body heat loss, S^* : Body heat storage, $R+C$: Radiative and convective heat loss

貯熱量を W-up の有無ごとに示した。

熱産生量は W-up 時で平均 249 ± 7 W/m^2 , 非 W-up 時で 247 ± 16 W/m^2 と両者間に差異は認められなかった。蒸発による熱放散は非 W-up 時 (164 ± 7 W/m^2) に比して W-up 時 (176 ± 11 W/m^2) の方が有意に大であった ($p < 0.05$)。間接的に算出した幅射および対流による熱放散は W-up の有無にかかわらず $6 \sim 10$ W/m^2 の範囲にあり、有意な差異は認められなかった。貯熱量は W-up 時で 50 ± 8 W/m^2 , 非 W-up 時で 68 ± 5 W/m^2 と非 W-up 時の方が 38% 大で、両者間に有意な差異が認められた ($p < 0.05$)。

IV. 考 察

スポーツ競技のパフォーマンスには日内変動を呈するものがあり、それは体温のリズムに位相を等しくしていると報告されている^{14,15)}。このことは体温が高い夕方の方がより良い記録が期待で

きることを示唆している。先に、著者らは、体温日周変動の各時刻における運動時の体温変動は、主として蒸発性熱放散の増減によって起こり、体温最高期において最も体温調節反応が発現しやすい状態にあることを報告した¹²⁾。このように体温調節反応は体温日周変動の各位相で異なり、それが生体機能の活動レベルに影響を及ぼしてくるのではなかろうか。

従来、W-upに伴う筋温や体温の上昇は多くの生理機能の向上に主役的な役割を果たし、競技力の向上を図ると指摘されている^{1,2,4,5,16,17)}。また、De Vries(1986)は⁷⁾、W-upの効果を引き出すためには0.6℃以上の直腸温の上昇が必要であるとしている。このような知見から考えると特に、体温の低い早朝時のW-upは重要な意味をもつものと考えられる。そこで、本研究では体温日周変動の最低期(6:00)にW-upを行った場合とW-upを行わない場合の2つの条件のもとで一定強度の運動を負荷し、その際の体温調節反応を測定・観察した。これは、体温最低期において体温調節反応が発現しにくい状況にあるとはいえ、W-upを通して体温を高めておけば、体温最高期に観察されるような調節反応が観察されるのではないかと考えたからである。これを基礎として、早朝運動時の体温調節反応に及ぼすW-upの影響を明らかにしようとした。

本実験での運動強度は600 Kpm/minでほぼ45～50% $\dot{V}O_{2max}$ に相当する強度の運動であった。代謝量(M)から熱に転換されて外になされた仕事量(W)を差引いた熱産生量はW-upの有無にかかわらず247～249 W/m²の範囲にあり、両者間に有意な差異は認められなかった。従って、熱産生量はW-upの有無によって直接的な影響を受けるとは考えられない。むしろ、W-upによって直接的な影響を受けるのは蒸発性熱放散及び貯熱量である。すなわち、体表面からの蒸発による熱放散量は非W-up時に比してW-upの方が有意に高い。また、貯熱量はW-up時に比して非W-up時の方が36%大で、両者間に有意な差異が認められた($p<0.05$)。古くから知られているように、環境温度が5～30℃の範囲であれば、運動

時の体温上昇は運動強度、すなわち代謝量に比例し、運動開始30分以降ではほぼ定常状態に達する¹⁰⁾。しかし、本実験での直腸温は運動中漸時増加し、明らかに定常状態には達しなかった。これは、一定範囲を越えた環境条件下では、運動強度のみならず温度・湿度に影響されることに起因している¹³⁾。本実験での運動終了直前の直腸温の水準はW-upの有無にかかわらず38.70～38.74℃の範囲にあり、ほぼ同一であった。にもかかわらず体温の変化量にはかなりの差異が認められた。従って、このような差異の生ずる原因は運動以外の因子に求めなければならない。Chappuis et al.⁶⁾(1976)らは運動時の貯熱量の時間的な変化を直接・間接カロリーメトリーを用いて検討し、運動開始後5分以内に貯熱量の増加は最大となり、約30分でゼロ、すなわち温熱的な定常状態となり、この間の貯熱量の増加が運動時の体温上昇となって運動中持続すると報告している。このように、運動中の体温上昇は、運動開始直後、熱産生はこれに伴って直ちに増加するのに対し、熱放散は直ちにそれについていけず一過性に両者間に不平衡が生じるためにその分だけ体内に熱が蓄積し、体温が上昇すると考えられている。本実験に於ける貯熱量の時間経過は、非W-up時では運動開始後から30分まで79～84 W/m²の高水準にあるのに対し、W-up時では運動開始後10分以内に68 W/m²と最大値を示した後、時間経過に伴って減少しW-up時の方が39～68%低い水準にあった。このような非W-up時の著しい貯熱量の増加は発汗による体熱放散の有効度が関係し、W-up時で5.23℃、非W-up時で4.90℃の体温低下に相当する有効な熱放散が行われたことに起因している。事実、運動開始時からの有効発汗量はW-up時の方が運動中を通して高い水準にあり、特に運動開始後から20分まで認められた。それではW-upは体温調節系の動作特性にどのような作用を及ぼすのであろうか。直腸温に対する蒸発水分量との関係から検討した。その結果、W-upの有無間に発汗特性曲線の移動、すなわち発汗発現閾値直腸温の上方移動が認められた。一方、発汗特性曲線の傾斜はW-up時の方が大であった。こ

のことは、W-up 時では W-up による体温上昇が発汗特性曲線の傾斜に作用し、調節反応の感度に影響を及ぼすものと考えられる。

結局、早朝、W-up の有無の条件で一定強度の運動を行った場合の体温変動は、主として蒸発性熱放散の増減によって起こり、W-up を実施した方が体温調節反応が発現しやすい状態にあるといえる。

V. 要 約

運動時の体温調節反応に及ぼす W-up の有無の影響を明らかにするために、男子大学生を対象に体温の最も低い早朝に一定強度の運動を負荷し、その際の体温調節反応を測定し、体熱平衡の側面から W-up の効果について検討した。得られた結果は以下の如くである。

1. 熱生産量は W-up の有無にかかわらずほぼ一定値を示した。

2. 蒸発による熱放散は非 W-up 時に比して W-up 時に大で、両者間に有意差が認められた ($p < 0.05$)。

3. 幅射・対流による熱放散は W-up の有無にかかわらず $6 \sim 10 \text{ W/m}^2$ の範囲にあった。

4. 貯熱量は W-up 時に比して非 W-up 時の方が 36% 大で、両者間に有意な差異が認められた ($p < 0.05$)。

5. 直腸温上昇に対する有効発汗量との関係では、W-up 時、非 W-up の場合に発汗発現閾値直腸温の上方移動が認められた。また、発汗特性曲線の傾斜は W-up の方が大であった。

稿を終えるにあたり、献身的な協力を惜しまなかった被験者の諸兄に深謝致します。

文 献

- 1) Asmussen, E and Bøje, O. (1945) : Body temperature and capacity for work. *Acta Physiol. Scand.*, **10**, 1-22.
- 2) Åstrand, P-O. and Rodahl, K. (1977) : Textbook of work physiology : Physiological bases of exercise. 2nd ed., McGraw-Hill. pp.562-564.
- 3) Burton, A. C. (1935) : The average temperature of the body tissues. *J. Nutr.*, **9**, 261-180.
- 4) Bergh, U. and Ekblom, B. (1979) : Influence of muscle temperature on maximal muscle strength and power output in human skeletal muscles. *Acta Physiol. Scand.*, **107**, 33-37.
- 5) Busuttil, C. P. and Ruhling, R. O. (1977) : Warm-up and circulo-respiratory adaptations. *J. Sport. Med.*, **17**, 69-74.
- 6) Chappuis, P., Pittet, P. and Jequier, E. (1976) : Heat storage regulation in exercise during thermal transients. *J. Appl. Physiol.*, **40**, 384-392.
- 7) De Vries, H. A. (1986) : Physiology of exercise for physical education and athletics. 4th ed. W. C. Brown, Iowa., pp.490-501.
- 8) Hardy, J. D. and DuBois, E. F. (1938) : The technic of measuring radiation and convection. *J. Nutr.*, **15**, 461-475.
- 9) Mitchell, J. W., Nadel, E. R. and Stolwijk, J. A. J. (1972) : Respiratory weight losses during exercise. *J. Appl. Physiol.*, **32**, 474-476.
- 10) Nielsen, M. (1938) : Die Regulation der Körpertemperatur bei Muskelarbeit. *Skand. Arch. Physiol.*, **79**, 193-230.
- 11) 中山昭雄, 丹羽健市 (1982) : 体温リズムの調節機構. 蛋白質, 核酸, 酵素, **27**, 307-316.
- 12) 丹羽健市, 中山昭雄, 大貫義人, 緑川知子 (1982) : 運動時の体温調節反応の日周変動. 体力科学, **31**, 258-265.
- 13) 丹羽健市 (1978) : 運動時の熱平衡におよぼす湿度の影響. 大阪大学医学雑誌, **30**, 1-13.
- 14) Reilly, T. (1987) : Circadian rhythms and exercise. In : Exercise-benefits, limits, and adaptations. Mscleod, D., Maughan, R., Nimmo, M., Reilly, T. and Williams, C. (Eds.), E & F.N.Spon, London, PP. 346-366.
- 15) Rodahl, A., O'Brien, M. and Firth, R. G. R. (1976) : Diurnal variation in performance of competitive swimmers. *J. Sports Med.*, **16**, 72-76.
- 16) Shellock, F. G. and Prentice, W. E. (1985) : Warming-up and stretching for improved performance and prevention of sports-related injuries. *Sports Med.*, **2**, 267-278.
- 17) Sargeant, A. J. (1987) : Effect of muscle temperature on leg extension force and short-term power output in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **56**, 693-698.