環境温が持久性運動時の体温調節に及ぼす影響
——個人差に着目して——

近 藤 徳 彦* 池 上 晴 夫**

THE EFFECT OF ENVIRONMENT TEMPERATURE ON
THERMAL REGULATION DURING PROLONGED EXERCISE
——FROM THE STANDPOINT OF INDIVIDUAL VARIATION——

NARIIHIKO KONDO and HARUO IKEGAMI

Abstract

The purpose of this study was to investigate the possible individual difference in temperature regulating ability during identical relative exercise load under various temperature environments.

Seven healthy males, aged 21 to 26 years, performed bicycle ergometer exercise of 60% $\dot{V}O_2\text{max}$ for 60 minutes. All exercises were carried out in a climatic chamber under the conditions of 15°C (RH=70%), 25°C (RH=55%) or 35°C (RH=45%). Heart rate, O_2 consumption, pulmonary ventilation, rectal temperature, mean skin temperature, local sweat rate at the lower part of scapula and total sweat rate were determined intermittently through the experiments. Moreover, heat loss by evaporation, radiation, convection and effective sweat rate was calculated using the heat balance equations.

The results obtained are as follows:

1. The increase in rectal temperature at the end of exercise was almost identical in 15°C and 25°C but significantly higher in 35°C.
2. A significant positive correlation was observed between mean skin temperature ($\bar{T}_{sk}$) at the end of exercise and effective sweat rate ($r=0.468$, $p<0.05$) during exercise.
3. In spite of the equality of relative exercise intensity (60% $\dot{V}O_2\text{max}$), marked individual variations were observed in rectal temperature during exercise.
4. The subjects who showed marked increase in rectal temperature during exercise showed less marked increase in mean skin temperature in 15°C and 25°C and less marked increase in local sweat rate in 35°C than other subjects.

It would be concluded that the main cause of individual variation in rectal temperature during exercise depends on difference in evaporative heat loss in hot environment and difference in skin temperature in mild or cold environment.

(J. Physical Fitness Japan 1986, 35: 229~240)

key words: 1) temperature regulating ability, 2) rectal temperature, 3) mean skin temperature, 4) local sweat rate, 5) heat loss by evaporation, radiation, convection.

I. 緒 言

運動時の体温は、5~30°Cの環境温度範囲においては環境温度にあまり関係なく、主に運動強度に

比例して上昇するが²³⁾³⁰⁾、環境温がさらに高くなると環境温の影響を受けるようになり、体温の上昇は著しくなる¹⁷⁾⁴⁵⁾。このような場合には、皮膚血流量増大²⁶⁾や発汗量増大¹⁸⁾などの熱放散機転が

* 筑波大学体育科学研究科
茨城県新治郡桜村

** 筑波大学体育科学系
茨城県新治郡桜村

University of Tsukuba, Doctoral Program in Health and Sports Science,
Sakuramura, Niihari-gun, Ibaraki

University of Tsukuba, Institute of Health and Sports Science,
Sakuramura, Niihari-gun, Ibaraki

著しく盛んになる。皮膚血流量の増大は、結果的に静脈環流の減少、一回拍出量の減少、心拍数の増大等²⁶⁾³⁹⁾⁴¹⁾を引き起こす。また、運動が長時間に及ぶと発汗による体液の損失が多くなり⁷⁾²⁶⁾²⁷⁾,これが皮膚血流量増大によって起きた上記の変化をより増幅するようになり、循環系への負担がそれだけ大きくなるものと考えられる。このため、高温環境下では持久性運動の成績が低下する。Klausen¹⁵⁾, Michael²⁰⁾ 及び Rowell ら⁴⁰⁾ は、高温環境下で $\dot{V}O_2\text{max}$ が低下することを認めている。

ところで、高温環境下で持久的な運動の成績が低下する度合をみてみると、成績が極端に低下する者とそうでない者が出てくる。つまり、ある環境においては同程度の成績を示していた二者が高温になると成績の優劣が明確になる場合がある。このような差には、各人の $\dot{V}O_2\text{max}$ ³⁵⁾⁴³⁾⁴⁷⁾, 温度馴化の度合²⁵⁾³⁵⁾, 体型¹³⁾³⁶⁾, 体温調節能力等の差が関係していると考えられるが、 $\dot{V}O_2\text{max}$ や体型的にはほぼ等しい高度に鍛練されたマラソン選手相互の間においても同様の差が認められていることから¹¹⁾, この差は主に体温調節能力差に起因しているのではないかと考えられる。

一般に、 $\dot{V}O_2\text{max}$ が異なる被検者が $\% \dot{V}O_2\text{max}$ を等しくした運動を行うと深部体温が同じように上昇することが報告されている¹⁾⁶⁾⁴²⁾⁴⁶⁾。しかし、これらの報告を詳細に検討すると、相対強度が一定であっても深部体温の上昇は必ずしも一定では

なく、個人差が認められる。また、この個人差の生じる要因についてはほとんど検討されていない。そこで、本研究では $\% \dot{V}O_2\text{max}$ を等しくした運動を種々な環境下で行い、その時に生じる体温の個人差に着目し、運動時の体温調節能力差の原因となる要因を検討してみることにした。

II. 方 法

A. 被検者

被検者は、21～26歳の健康な男子学生7名であり、陸上競技、水泳及びサッカーのいずれかのスポーツを6～8年間にわたって継続している人たちであった。被検者の最大酸素摂取量は、あらかじめ本実験とは別の日にモナーク社製自転車エルゴメーターを用いて漸増的最大負荷によって直接測定した。被検者の身体特性ならびにスポーツ種目は表1に示したとおりである。

B. 環境条件

実験には人工気象室（精度：室温 $\pm 0.5^\circ\text{C}$, 相対湿度 $\pm 10\%$ ）を利用した。環境条件は、室温（相対湿度）が 15°C (70%), 25°C (55%) 及び 35°C (45%) の3条件とした。なお、室内の気流はいずれの実験条件とも 0.3 m/sec 以下であった。

C. 実験手順

被検者は、上半身裸体でランニング用短パンツ1枚のみを着用し、あらかじめ 25°C の気温に設定された人工気象室に入り、自転車エルゴメーターに腰かけたまま30～40分間安静を保持した。その

Table 1. Age, physical characteristics and sports of the subjects

Subject	Age (yr)	Height (cm)	Weight (kg)	Body surface area (m^2)	Wt/SA (kg/m^2)	$\dot{V}O_2\text{max}$ (ml/kg)	Sports
A	23	176.6	60.0	1.74	34.48	60.0	Track & Field
B	22	179.3	67.5	1.85	36.49	48.9	Track & Field
C	21	173.5	63.5	1.76	36.08	67.1	Track & Field
D	21	174.3	69.5	1.83	37.98	47.5	Soccer
E	26	175.3	77.5	1.93	40.16	55.3	Swimming
F	21	170.3	64.5	1.75	36.86	57.4	Soccer
G	21	176.1	65.0	1.80	36.11	49.5	Track & Field
$\bar{X}$	22	175.0	66.8	1.81	36.88	55.1	
SD	2	2.7	5.3	0.06	1.65	6.7	

間に皮膚温測定用熱電対、直腸温測定用サーミスター、呼吸マスク及び発汗量測定用カプセルの装着を行った。次いで、自転車エルゴメーター上で10分間安静状態の測定を行った後、約7～8分の時間を用いて環境条件をB.で示した3条件のいずれかに設定し、同時に最大酸素摂取量の60% (60% $\dot{V}O_{2\max}$) の自転車運動を開始し60分間継続した。自転車にはモナーク社製自転車エルゴメーターを用い、ペダルの回転は60rpmとした。

D. 測定項目及び方法

測定項目は、酸素摂取量、換気量、心拍数、直腸温、平均皮膚温、局所発汗量及び総発汗量であった。

安静時及び運動中の酸素摂取量と換気量は自動呼吸ガス分析器(Beckman社製MMC system)を用いて1分毎に測定した。心拍数(HR)は、双極胸部誘導による心電図から1分毎に求めた。

直腸温(T_{re})は、サーミスターの先端を直腸内に約8～10cm挿入し、直腸温測定器(日本光電, MGA—Ⅲ219)を介して1分毎に読みとった。皮膚温は胸部、上腕部、大腿部及び下腿部の4点に貼付した熱電対で測り、横河製ハイブリッドレコーダー3087を用いて1分毎に記録し、Ramanathanの式³⁷⁾によって平均皮膚温($\bar{T}_{sk}$)を算出した。

局所発汗量($\dot{m}_{sr}$)の測定部位は肩甲下部とした。左肩甲骨下端部に大きさ15.2cm²の発汗量測定用カプセルをあてて固定し、そのカプセルの一端から毎分1.5lの乾燥窒素を流し、他端から流出する窒素ガスの中の温度と湿度をTakara Vaisala社製のHMT 113Y 静電容量湿度計によって連続的に記録して、1分毎の発汗量(以下局所発汗量)を求めた。

総発汗量は、実験前後の体重測定(精度±20g)から体重減少量を算出し、その減少量から呼吸性の体重減少量(呼吸気道からの水分損失量及び代謝性の体重減少量)を差し引いて求めた。呼吸気道からの水分損失による体重減少量は次式によって求めた。

$$\dot{m}_e = 0.019 \dot{V}O_2 \cdot (44 - P_a)^{22)}$$

ただし $\dot{m}_e$: 気道からの水分損失量(g/min)

$\dot{V}O_2$: 酸素摂取量(l/min)

P_a : 環境の水蒸気圧(mmHg)

また、代謝性の体重減少量(排出した炭酸ガスと摂取した酸素の重量差による体重減少量)は、次式によって求めた。

$$\dot{m}_R = \dot{V}O_2 \cdot (R \cdot \rho_{CO_2} - \rho_{O_2})^{22)}$$

ただし $\dot{m}_R$: 代謝性の体重減少量(g/min)

R: 呼吸商

ρ_{O_2} : 酸素密度(1.43 g/l_{STPD})

ρ_{CO_2} : 炭酸ガス密度(1.96 g/l_{STPD})

E. 体熱バランスの式

運動時の体熱バランスの計算は、次式に基いて行った。

$M = E \pm R \pm C \pm W \pm \Delta S$ (単位: Kcal). 産熱量は、代謝量(M)から外部に対して行った仕事量(W)を差し引いて求めた。放射(R)と対流(C)による熱放散量の計算には、次式を用いた。

$$R = A_{Du} \cdot Cef \cdot \epsilon \cdot \lambda \{ (\bar{T}_{sk} + 273)^4 - (\bar{T}_w + 273)^4 \}$$

ただし A_{Du} : DuBoisの体表面積(m²)

Cef: 有効放射面積/体表面積(0.70)³²⁾

ϵ : 人体皮膚放射能(0.997)²¹⁾

λ : Stefan-Boltzmann 恒数(4.88 × 10⁻⁸ Kcal/m² · K⁴ · h)

$\bar{T}_{sk}$: 平均皮膚温³⁷⁾

$\bar{T}_w$: 平均放射温(°C)

$$\bar{T}_w = T_g + 2.37 \cdot \sqrt{v} (T_g - T_a)^{21)}$$

T_g : グローブ温度(°C)

v : 室内の気流(m · s⁻¹)

T_a : 環境温(°C)

$$C = A_{Du} \cdot hc \cdot (\bar{T}_{sk} - T_a)$$

ただし hc : 対流熱伝導率(5.4Kcal/m² · h · °C)³¹⁾

体熱の変化量(ΔS)は、平均体温($\bar{T}_b$)の変化に人体の比熱(0.83 Kcal/kg · °C)と体重を乗じて求めた。なお、 $\bar{T}_b$ の算出には次式を用いた⁵⁾。

$$15^\circ\text{Cの環境} : \bar{T}_b = 0.65 \times T_{re} + 0.35 \times \bar{T}_{sk}$$

$$25^\circ\text{Cと}35^\circ\text{Cの環境} : \bar{T}_b = 0.8 \times T_{re} + 0.2 \times \bar{T}_{sk}$$

また、産熱量から放射(R)と対流(C)による熱放散量、体熱の増加量(ΔS)及び呼吸気道からの水分損失による熱放散量を差し引いて間接的に有効発汗量を求めた。

本研究は昭和60年3月から4月にかけて午後1時から5時の間に実施し、実験直前の被検者の状

態ができるだけ同一となるよう留意した。

III. 結 果

図1に各環境下で運動を行った時の直腸温(T_{re})、平均皮膚温($\bar{T}_{sk}$)及び局所発汗量($\dot{m}_{SR}$)の経時変化を7人の平均値で示した。

T_{re} は時間とともに漸増し、かつ運動開始後約45分目までは環境温による差異はみられないが、それ以後35℃の環境下での T_{re} の上昇が急になった。運動終了時の T_{re} は35℃、25℃及び15℃の環境下においてそれぞれ $39.1 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、 $38.7 \pm 0.3^\circ\text{C}$ 及び $38.5 \pm 0.2^\circ\text{C}$ であり、35℃の場合と25℃及び15℃の場合との間の差は有意であったが($P < 0.05$)、25℃と15℃の間の差は有意でなかった。

$\bar{T}_{sk}$ の変化は、運動開始後約3～4分目から環

Fig. 1. Time courses of rectal temperature (T_{re}), mean skin temperature ($\bar{T}_{sk}$) and local sweat rate at the lower part of scapula ($\dot{m}_{SR}$) during exercise. Values are expressed as means.

Table 2. Total sweat rate, maximal local sweat rate ($\dot{m}_{SRmax}$), heart rate (HR) and rectal temperature (T_{re}) at the end of exercise for each subject under the environment of 15°C, 25°C and 35°C

Subject	15°C				25°C				35°C			
	Total sweat rate (g/hr)	$\dot{m}_{SRmax}$ (mg/cm ² /min)	HR (beats/min)	T_{re} (°C)	Total sweat rate (g/hr)	$\dot{m}_{SRmax}$ (mg/cm ² /min)	HR (beats/min)	T_{re} (°C)	Total sweat rate (g/hr)	$\dot{m}_{SRmax}$ (mg/cm ² /min)	HR (beats/min)	T_{re} (°C)
A	462	0.49	144	38.5	699	1.47	159	39.0	1,085	1.26	186	39.8
B	403	0.99	152	38.9	586	1.16	160	39.2	1,143	1.43	186	40.0
C	597	1.15	150	38.3	842	1.58	173	38.8	1,174	1.73	180	38.9
D	469	1.17	141	38.5	683	1.15	154	38.6	1,063	1.46	173	39.0
E	777	1.39	129	38.4	779	1.23	142	38.4	1,509	1.72	155	38.9
F	619	1.08	138	38.4	935	1.27	168	38.3	1,459	1.61	173	39.0
G	345	0.56	141	38.2	548	0.86	150	38.5	784	1.09	162	38.6
$\bar{X}$	524	0.98	142	38.5	722	1.25	158	38.7	1,174	1.47	174	39.1
SD	137	0.31	7	0.2	125	0.23	10	0.3	229	0.22	11	0.5

境温による差異が現われ、環境温が高いほど $\bar{T}_{sk}$ も高くなった。

$\dot{m}_{SR}$ はいずれの環境下においても運動開始後約15～17分間に急上昇し、それ以後は上昇傾向が緩やかになった。しかし、その絶対値は環境温が高いほど多い傾向にあった。35℃と25℃の場合には、運動開始後約25分目まではほぼ同様な上昇傾向を示したが、29分目以後には35℃の $\dot{m}_{SR}$ の値が有意に高くなった($P<0.05$)。また、 T_{re} のほぼ等しい運動開始後約45分目までの間であっても $\bar{T}_{sk}$ の高い場合ほど $\dot{m}_{SR}$ が高い傾向が認められた。

表2に各環境下における総発汗量、局所発汗量の最高値($\dot{m}_{SRmax}$)及び運動終了時の心拍数(HR)と直腸温(T_{re})を示した。各パラメーター

間の相互関係を求めた結果、以下のパラメーター間に高い相関が認められた。すなわち、 $\dot{m}_{SRmax}$ と総発汗量との間に $r=0.769$ の有意な正の相関関係が認められ($P<0.01$)、運動終了時の T_{re} とHRの間にも $r=0.799$ と有意な正の相関関係が認められた($P<0.01$)。また、HRは環境温が高くなるほど増加し、15℃と25℃及び25℃と35℃との差はともに16拍であり、いずれも有意な差であった($P<0.05$)。

図2、3及び4に各環境下での直腸温(ΔT_{re})、平均皮膚温($\Delta \bar{T}_{sk}$)及び局所発汗量($\dot{m}_{SR}$)の経時変化を被検者別に示した。

15℃の場合(図2)には、 ΔT_{re} は6人の被検者がいずれも同程度の上昇を示し、被検者Bのみの上昇度が最も顕著であった。 $\Delta \bar{T}_{sk}$ は被検者Bの値が運動開始時より低く、運動終了時には開始時

Fig. 2. Time courses of rectal temperature (ΔT_{re}), mean skin temperature ($\Delta \bar{T}_{sk}$) and local sweat rate at the lower part of scapula ($\dot{m}_{SR}$) in each subject during exercise at 15°C.

Fig. 3. Time courses of rectal temperature (ΔT_{re}), mean skin temperature ($\Delta \bar{T}_{sk}$) and local sweat rate at the lower part of scapula ($\dot{m}_{SR}$) in each subject during exercise at 25°C.

より 1.2°C 低くなった. 被検者Aの $\Delta\bar{T}_{\text{sk}}$ は運動後半に極端な低下を示した. 他の被検者においてはいずれも同程度の上昇を示し, 運動終了時には開始時よりも高くなった. $\dot{m}_{\text{SR}}$ は被検者A及びGの値が他の被検者と比較して低かった.

25°C の場合(図3)には, ΔT_{re} は被検者Bの上昇が最も著しく, 次いで被検者Aであった. $\Delta\bar{T}_{\text{sk}}$ は被検者A及びBの値が他の被検者と比較して低い値を示した. $\dot{m}_{\text{SR}}$ は被検者A及びCの値が運動中も高く, 被検者Gは著しく低い値を示した. その他の被検者はその中間でいずれも同程度の値で

あった.

35°C の場合(図4)には, ΔT_{re} は被検者B, 次いでAの上昇が顕著であり, 運動終了時にはそれぞれ 3.0°C 及び 2.5°C の上昇であり, 絶対値においては 40.0°C , 39.8°C とかなり高い値を示した. その他の被検者ではいずれも約 1.5°C の上昇にとどまった. $\Delta\bar{T}_{\text{sk}}$ は被検者C及びDの上昇が大きく, 被検者Bは運動中他の被検者と比較してかなり低い値を示した. 被検者Aを含めたその他の被検者は中程度の上昇であった. $\dot{m}_{\text{SR}}$ は運動中, 被検者C, E及びFの値がやや高く, ΔT_{re} の上昇が大きかった被検者Aの場合は全体の中で中程度の値であり, Bの場合は比較的低い値を示した. また被検者Gでは ΔT_{re} の上昇は平均的であったが, $\dot{m}_{\text{SR}}$ の値は極端に低かった.

図5に, 35°C の環境下で ΔT_{re} の上昇度が最も大きかった被検者Bと, その上昇度が最も小さかった被検者Fにおける T_{re} と $\dot{m}_{\text{SR}}$ の関係を示した.

35°C の環境下において, 被検者Fの方がBよりも $\dot{m}_{\text{SR}}$ の最高値が高くかつ T_{re} の変化に対する $\dot{m}_{\text{SR}}$ の増加率においても大きく, 被検者Bの発汗能力がFのそれよりも劣っているものと考えられる. 図には示していないが, T_{re} の上昇が大きかったもう一人の被検者Aは被検者Bと同様な傾向を示し, Gを除くとその他の被検者はいずれも被検者Fに似た傾向を示した.

図6に, 運動開始10分目から終了時までの50分間の体熱バランス式より算出した蒸発による熱放散量(E , Kcal/m^2)及び放射・対流による熱放散量($R+C$, Kcal/m^2)について, それぞれ運動終了時の直腸温(ΔT_{re})との関係を環境条件別に示した.

E と ΔT_{re} の関係では, 35°C の場合負の相関が, 逆に 15°C の場合には正の相関が得られたがいずれも有意なものではなかった. ただし, 35°C の環境下で極端に E が少なかった被検者G(いずれの環境下においても発汗量が少なかった; 表2)を除くと, 35°C の環境下で E と ΔT_{re} の間に非常に高い負の相関関係が得られた($r = -0.831$, $p < 0.01$).

$R+C$ と ΔT_{re} の関係においては, 35°C の場合

Fig. 4. Time courses of rectal temperature (ΔT_{re}), mean skin temperature (ΔT_{sk}) and local sweat rate at the lower part of scapula ($\dot{m}_{\text{SR}}$) in each subject during exercise at 35°C

Fig. 5. Relationship between rectal temperature (T_{re}) and local sweat rate at the lower part of scapula ($\dot{m}_{sr}$) in subject B and F under the environment of 15°C, 25°C, 35°C.

Fig. 6. upper : Relationship between evaporative heat loss (E) and rectal temperature (ΔT_{re}) at the end of exercise in each environment. lower : Relationship between radiation, convection heat loss ($R+C$) and rectal temperature (ΔT_{re}) at the end of exercise in each environment.

ΔT_{re} の変化に対して $R+C$ はほぼ一定の値を示し、環境温が低くなるにつれて負の相関が強くなり、15°Cの環境下では両者の間に $r = -0.919$ と極めて高い負の相関関係が得られた ($p < 0.01$).

図7に計算式より求めた有効発汗量 ($Kcal/m^2$)

Fig. 7. Relationship between effective sweat rate and changes of mean skin temperature from resting values at the end of exercise ($\Delta \bar{T}_{sk}$).

と運動終了時の平均皮膚温 ($\Delta \bar{T}_{sk}$) との関係を示した。両者の間には $r = 0.468$ と有意な正の相関関係が得られた ($p < 0.05$).

なお、今回の実験において運動時の酸素摂取量には環境条件による差異は認められなかった。

IV. 考 察

前述のように運動時の体温は、5～30°Cの環境温度の範囲であれば運動強度に比例し、環境温に左右されないことが報告されている²⁸⁾³⁰⁾。これに対して、Lind¹⁷⁾、Wyndhamら⁴⁶⁾によれば、環境温がある範囲を越えれば運動時の体温上昇は環境温に左右されることが指摘されている。本研究にお

いては、15℃と25℃の環境下では T_{re} の上昇はほぼ等しく、35℃の環境下において T_{re} の上昇が他の場合より有意に高かった。このことは上記の諸先行研究結果からも予測されることであり、35℃の環境温は運動中の体温にかなり強く影響を及ぼすことを示している。

これに対して、 $\bar{T}_{sk}$ は環境温が高くなるほど高く、皮膚温は環境温によって影響されやすいことを示している。Nielsen²⁰⁾とStolwijkら⁴⁴⁾も皮膚温は運動強度よりも環境温に強く影響されることを報告している。

定常運動中の発汗量は、Nadelら²⁴⁾によると深部体温と平均皮膚温からの温度情報入力之和に依存するとされている。本研究においても T_{re} は同じでも $\bar{T}_{sk}$ が高いほど局所発汗量も多くなるという関係が認められた。これは、皮膚に加えられた温度刺激が求心性に温度情報を送るのみならず、直接汗腺にも効果を及ぼすためと考えられ³⁾、その効果として、温度が神経-腺接合部で遊離される伝達物質に影響する¹⁸⁾とも、伝達物質に対する汗腺の感受性に影響する³³⁾とも報告されている。

ところで、発汗は身体の部位によって差があり、一般的には身体の軀幹部の発汗量が四肢よりも多いことが認められている¹⁶⁾³⁴⁾。表2に示したように、今回測定した肩甲部の局所発汗量の最高値と総発汗量との間に有意な相関関係($r=0.769$, $p<0.01$)が認められたことから、肩甲部の局所発汗量はある程度総発汗量の目安になるものと考えられる。しかし、暑熱馴化により四肢の発汗が軀幹部の発汗より著しく増大することが報告されており⁹⁾、個人差を検討する上では、軀幹部(肩甲部)の局所発汗量に加えて四肢の局所発汗量も測定する方が望ましいことも考えられ、この点は今後の課題である。

Cabanac⁴⁾は、体温は循環系の機能高進とよく相関することを指摘し、Kamonら¹²⁾は高温環境下で運動を行った場合の HR と T_{re} の間に正の相関関係を認めている。本研究において運動終了時の HR と T_{re} との間に有意な正の相関関係が得られ、同一の運動負荷にもかかわらず高温になる

ほど運動終了時の HR が増大した(表2)。これは体温の上昇に伴って皮膚血管が拡張し、皮膚に多量の血液が貯留されること³⁷⁾により、心臓への還流血流量が減り、この結果一回拍出量が減少し²⁶⁾³⁸⁾⁴¹⁾、この減少に対して代償的に HR が増大した結果であると考えられる。また、高温環境下の長時間運動の場合には、発汗量の増大により体液量が減少する⁷⁾²⁶⁾²⁷⁾ことも HR 増大に関与しているものと思われる。

Åstrand¹⁾及びSaltin & Hermansen⁴²⁾は% $\dot{V}O_{2max}$ を等しくした運動を行わせると、運動時の T_{re} は被検者の $\dot{V}O_{2max}$ の多少にかかわらずほぼ一定であることを常温下で認め、Wyndham⁴⁶⁾及びGreenleafら⁸⁾は高温環境下においてもこの事実を認めた。本研究においても運動終了時の HR と T_{re} との間にかかなり高い正の相関関係が認められたことは上記の報告と軌を一にする所見である。しかしながら、実際には相対強度を一定(60% $\dot{V}O_{2max}$)にしたにもかかわらず各環境条件で T_{re} の上昇にかなり個人差があり、15℃と25℃の環境下では被検者Bの、35℃の環境下では被検者A及びBの T_{re} 上昇が他の被検者より大きくなった。そこで、これらの被検者の T_{re} 上昇が大きくなった原因を平均皮膚温($\Delta\bar{T}_{sk}$)及び局所発汗量($\dot{m}_{SR}$)の両パラメーターを中心に検討してみることにする。

15℃の場合、被検者Bの $\dot{m}_{SR}$ は全体の中で中程度の値を示しているが、 $\Delta\bar{T}_{sk}$ は他の被検者たちと違って上昇がみられず逆に運動開始時より低下し、終了時まで低い値であった。15℃のように環境温が低い場合には発汗よりも放射・対流による熱放散の全熱放散の中で占める割合が多いとされており²³⁾、それだけに低温環境下の体温調節には放射・対流による熱放散の重要性が高いと考えられる。今回の結果においても放射・対流による熱放散量と T_{re} の上昇度の関係をみると、35℃と25℃の環境下では有意な相関がなかったのに対し15℃では高い負の相関関係が認められたことは上記のことを裏付ける所見である。この点から考えると被検者Bは $\Delta\bar{T}_{sk}$ が低く、放射・対流による熱放散が他の被検者と比較して少ないために T_{re}

の上昇が著しくなったと推定される。また、被検者Aの場合にはこの環境下で $\Delta \bar{T}_{sk}$ が運動後半から急激に低下した。これは被検者Aでは実験後半に放射・対流による熱放散が減少したことになるので Tre の上昇が大きくなったとしても不思議ではない。しかし、被検者Aの Tre は運動初期からやや高めであったものの、後半になって特に上昇傾向を強めることはなかった。Piwonkaら³⁶⁾は、体重/体表面積 (Wt/SA) の値が小さいほど熱放散に有利であることを報告している。Wt/SA の値でみると被検者Aは34.48と他の被検者と比較してかなり小さく(表1)、体型的には熱放散に有利であると考えられる。このことが被検者Aの Tre 上昇に抑制的に作用していた可能性はある。しかし、実験後半に被検者Aの $\bar{T}_{sk}$ が急激に低下した事実の説明に関しては疑問が残る。

ところで、今回運動の相対強度を 60% $\dot{V}O_2\max$ と一定にしたため、各被検者の運動時の $\dot{V}O_2$ は $\dot{V}O_2\max$ に比例していた筈である。一般に $\dot{V}O_2\max$ と発汗量の間には正の相関関係が認められている⁹⁾。すると、今回の実験で示された各被検者の発汗量の違いは $\dot{V}O_2\max$ の差によることも考えられる。この点を検討するために、今回の結果について $\dot{V}O_2\max$ との関係をみると、 $\dot{V}O_2\max$ の小さい者は被検者D、B及びGであり、大きいのはC及びAである。この二群について発汗量を比較しても一定の傾向が認められなかった。従って今回の結果においては $\dot{V}O_2\max$ の大小を考慮する余地は比較的少ないものと考えられる。

25℃の場合にも、被検者Bの Tre 上昇は最も顕著であった。そして $\dot{m}_{SR}$ は15℃の場合と同様に中程度の上昇を示したが、 $\Delta \bar{T}_{sk}$ の上昇が運動開始時より小さかった(図3)。皮膚温の上昇は放射・対流による熱放散を増大させるためにも重要であるが、発汗の有効性を高める上でも重要である¹⁴⁾。本研究においても、有効発汗量と運動終了時の平均皮膚温の上昇度 ($\Delta \bar{T}_{sk}$) の間に有意な正の相関関係が得られている。この点を考えると、被検者Bは $\dot{m}_{SR}$ が同程度の被検者と比較して放射・対流による熱放散のみならず発汗の有効性の面でも

劣っていた可能性がある。

35℃の場合、被検者Aの $\Delta \bar{T}_{sk}$ の上昇は中程度であり、 $\dot{m}_{SR}$ の値が他の被検者と比較してかなり低かった。被検者Bの $\dot{m}_{SR}$ の値は被検者Aより高いが全体的には中程度であり、 $\Delta \bar{T}_{sk}$ の上昇は他の被検者と比較すると極端に小さかった。35℃のような高温環境下では全熱放散の約85%が発汗によるものとされている²³⁾。今回の結果においても特異な反応を示した1例(被検者G)を除くと35℃の環境下において蒸発による熱放散量と Tre の上昇度との間に高い負の相関関係があり、上記のことを裏付けた。このような環境下で同一負荷の運動を行うとよくトレーニングされている者 ($\dot{V}O_2\max$ の値が大きい者)あるいは高温馴化トレーニングを行った者は、発汗能力がすぐれ体温上昇が小さいことが知られている³⁵⁾。また、発汗能力の増大について、Nadelら²⁵⁾やRobertsら³⁸⁾は持久的あるいは高温馴化トレーニングを行うことによって深部体温・発汗量の勾配が大きくなることを認めている。今回の実験においても被検者AとBはこの勾配が緩やかであり、Treに対する $\dot{m}_{SR}$ が少ないことが示された。このように、被検者A、Bとも発汗能力が劣っていたこと、それに加えて被検者Bの場合は $\Delta \bar{T}_{sk}$ の上昇が小さいことより汗を有効に蒸発される点においても劣っていたことが関係して、両被検者の Tre 上昇が大きくなったものと考えられる。また、被検者A、Bとも運動終了時のHRがともに186拍/分と高く、他の被検者と比較して循環系への負担が大きかったことが推察される。

ところで、被検者Gは35℃の環境下において他の被検者とは異なった反応を示した。すなわち $\Delta \bar{T}_{sk}$ は全体の中で中程度であり $\dot{m}_{SR}$ が極端に低かったにもかかわらず Tre の上昇は特に大きくなかった。このことは、被検者Gが発汗の有効性という点で他の被検者と異なっていた可能性を示唆する。例えば、汗の塩分濃度の差¹⁰⁾がその一つとして挙げられるが今回は測定しなかった。また、この点と関連して四肢の $\dot{m}_{SR}$ の検討も必要であったかも知れない。Wt/SA の値からみて被検者Gは他の被検者と比較して体型的に熱放散に有利

であったとは考えにくい。

今回、被検者の中に1名水泳選手が含まれていた。水泳選手は陸上選手よりも耐寒性はすぐれているが¹⁾、耐暑性では逆に陸上選手がすぐれていることが報告されている⁸⁾。この点について、各環境下で水泳選手と陸上、サッカー選手との比較を行ったが両選手間に体温調節上の違いは認められなかった。

これら各環境条件下での結果を総合してみると、従来言われてきたように運動時のTreは相対的運動強度にはほぼ依存して上昇する傾向は必ずしも一般的事実ではなくて、相対的運動強度を一定にしたときのTre上昇度にはかなり個人差が大きいことが指摘できる。そして35℃のような高温環境下においてはTre- $\dot{m}_{SR}$ の勾配が緩やかで蒸発による熱放散の少ない被検者が、運動時のTre上昇が著しいこと、それに対して、15℃のような低温環境下においては皮膚温が低くて放射・対流による熱放散の少ない被検者が運動時のTre上昇度が高くなる傾向にあるといえよう。このように、運動時の相対強度が同じであっても体温上昇あるいは上昇に伴う体温調節の機構にはかなり大きい個人差があり、しかも高温環境下と低温環境下ではその個人差の生じる機構が異なっていることが明らかとなった。

V. 要 約

健康な男子学生7名について、気温15℃（相対湿度70%）、25℃（55%）及び35℃（45%）の3種の環境下で60% $\dot{V}O_2\max$ の自転車運動を60分間行わせ、その時の直腸温の変化をもとに運動時の体温調節能力差を検討した。測定項目は、HR、 $\dot{V}O_2$ 、換気量、直腸温(Tre)、平均皮膚温($\bar{T}_{sk}$)、肩甲部の局所発汗量($\dot{m}_{SR}$)及び総発汗量であり、またこれらの結果から体熱バランス式を用いて蒸発による熱放散量、放射・対流による熱放散量及び有効発汗量を算出した。得られた結果は以下の通りであった。

1. 運動終了時のTre(平均値)は、15℃と25℃の環境下ではほぼ等しく、35℃の環境下で他の場合より有意に高かった。

2. 運動終了時の平均皮膚温の上昇度($\Delta\bar{T}_{sk}$)と有効発汗量(Kcal/m²)の間に有意な正の相関関係が得られた。

3. 60% $\dot{V}O_2\max$ と相対強度を等しくしたにもかかわらず、各環境下で直腸温の上昇度(ΔTre)にかなり大きい個人差が認められた。

4. これらの個人差をもたらす原因について局所発汗量($\dot{m}_{SR}$)と平均皮膚温($\bar{T}_{sk}$)を中心に検討した結果、15℃と25℃の環境下でTre上昇が著しい者は、 $\Delta\bar{T}_{sk}$ の上昇が軽度であるかあるいは逆に低下していること、また、35℃の環境下でTreの上昇が著しい者は、 $\Delta\bar{T}_{sk}$ の上昇及び $\dot{m}_{SR}$ の値も小さく、Tre- $\dot{m}_{SR}$ よりみた発汗性の体温調節能が劣っているものと推察された。

(受付 昭和60年12月27日)

References

- 1) Åstrand, I.(1960) : Aerobic work capacity in men and women with special reference to age, Acta Physiol. Scand, Suppl., 169.
- 2) Bedford, T., and Warner, C. G.(1935) : The globe thermometer in studies of heating and ventilation, J. Hygiene. London., 35, 458-473.
- 3) Bullard, R. W., Banerjee, M. R., and MacIntyre, B. A.(1967) : The role of the skin in negative feedback regulation of eccrine sweating, Int. J. Biometeor., 11, 93-104.
- 4) Cabanac, M.(1975) : Temperature regulation, Ann. Rev. Physiol., 37, 415-439.
- 5) Gagge, A. P. and Nishi, Y.(1977) : Heat exchange between human skin surface and thermal environment. In, Lee, D. H. K., Handbook of physiology, Reactions to environmental agents, sect 9, chapt 5, Am. physiol. Soc, Bethesda, Maryland, 69-72.
- 6) Greenleaf, J. E., Castle, B. L. and Ruff, W. K. (1972) : Maximal oxygen uptake, sweating and tolerance to exercise in the heat, Int. J. Biometeor., 16, 375-387.
- 7) Harrison, M. H., Edwards, R. J. and Leitch, D. R. (1975) : Effect of exercise and thermal stress on plasma volume, J. Appl. Physiol., 39, 925-931.

- 8) Henane, R., Flandrois, R. and Charbonnier, J. P. (1977) : Increase in sweating sensitivity by endurance conditioning in man, *J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, **43**, 822-828.
- 9) Höfler, W.(1968) : Changes in regional distribution of sweating during acclimatization to heat, *J. Appl. Physiol.*, **25**, 503-506.
- 10) Hori, S., Inouye, A., Ihzuka, H. and Yamada, T. (1974) : Study on seasonal variations of heat tolerance in young Japanese males and effects of physical training thereon, *Jap. J. Physiol.*, **24**, 463-474.
- 11) 加賀谷熙彦(1973) : 猪飼道夫編身体運動の生理学, 温度と運動, 杏林書院, 410-420.
- 12) Kamon, E. and Harwood, S. B.(1971) : Heart rate and rectal temperature relationships during work in hot humid environments, *J. Appl. Physiol.*, **31**, 472-477.
- 13) 勝浦哲夫, 菊地安行(1984) : 運動時の体温上昇と体型・体格の関連, 病態生理, **3**, 339-341.
- 14) Kerslake, D. McK.(1972) : The heat balance of sweating skin. In., *The stress of hot environments*, Cambridge University Press, 75-94.
- 15) Klausen, K., Dill, D. B., Phillips, J. E. E. and McGregor, D.(1967) : Metabolic reactions to work in the desert, *J. Appl. Physiol.*, **22**, 292-296.
- 16) 久野 寧(1981) : 汗の話, 10版 光生館, 119-141.
- 17) Lind, A. R.(1963) : A physiological criterion for setting thermal environmental limits for everyday work, *J. Appl. Physiol.*, **18**, 61-66.
- 18) MacIntyre, B. A., Bullard, R. W., Banerjee, M. and Elizondo, R.(1968) : Mechanism of enhancement of eccrine sweating by localized heating, *J. Appl. Physiol.*, **25**, 255-260.
- 19) McMurray, R. G. and Horvath, S. M. (1979) : Thermoregulation in swimmers and runners, *J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, **46**, 1086-1092.
- 20) Michael, N. S., Young, A. J., Cadarette, B. S., Levine, L. and Pandolf, K B.(1985) : Influence of heat stress and acclimation on maximal aerobic power, *Eur J. Appl. Physiol.*, **53**, 294-298.
- 21) Mitchell, D., Wyndham, C. H. and Hodgson, T. (1967) : Emissivity and transmittance of excised human skin in its thermal emission wave band, *J. Appl. Physiol.*, **23**, 390-394.
- 22) Mitchell, J. W. Nadel, E. R. and Stolwijk, J. A. J.(1972) : Respiratory weight losses during exercise, *J. Appl. Physiol.*, **32**, 474-476.
- 23) Mitchell, J. W.(1977) : Energy exchanges during exercise. In., Nadel, E. R., *Problems with temperature regulation during exercise*, Academic Press, New York, 11-16.
- 24) Nadel, E. R., Bullard, R. W. and Stolwijk, J. A. J. (1971) : Importance of skin temperature in the regulation of sweating, *J. Appl. Physiol.*, **31**, 80-87.
- 25) Nadel, E. R., Pandolf, K.B., Roberts, M. F. and Stolwijk, J. A. J.(1974) : Mechanisms of thermal acclimation to exercise and heat, *J. Appl. Physiol.*, **37**, 515-520.
- 26) Nadel, E. R.(1980) : Circulatory and thermal regulations during exercise, *Federation Proc.*, **39**, 1491-1497.
- 27) Nadel, E. R.(1985) : Recent advances in temperature regulation during exercise in humans, *Federation Proc.*, **44**, 2286-2292.
- 28) Nielsen, B. and Nielsen, M.(1962) : Body temperature during work at different environmental temperatures, *Acta. Physiol. Scand.*, **56**, 127-129.
- 29) Nielsen, B. and Nielsen. M.(1965) : On the regulation of sweat secretion in exercise, *Acta. Physiol. Scand.*, **61**, 314-322.
- 30) Nielsen, M.(1938) : Die Regulation der Körpertemperatur bei Muskelarbeit, *Scand. Arch. Physiol.*, **79**, 193-230.
- 31) Nishi, Y. and Gagge, A. P.(1970) : Direct evaluation of convective heat transfer coefficient by naphthalene sublimation, *J. Appl. Physiol.*, **29**, 830-838.
- 32) 西 安信(1981) : 中山昭雄編温熱生理学, 初版, 人体と環境との熱交換, 理工学社, 33-72.
- 33) Ogawa, T.(1970) : Local effect of skin temperature on threshold concentration of sudorific agents., **28**, 18-22.
- 34) Ohara, K.(1966) : Chloride concentration in sweat; its individual, regional, seasonal and some other variations, and interrelations between them, *Jap.*

- J. *physiol.*, **16**, 274-290.
- 35) Pandolf, K. B.(1979) : Effects of physical training and cardiorespiratory physical fitness on exercise-heat tolerance : recent observations, *Med. Sci. Sports.*, **11**, 60-65.
 - 36) Piwonka, R. W., Robinson, S., Gay, V. L. and Manalis, R. S.(1965) : Preacclimatization of men to heat by training, *J. Appl. Physiol.*, **20**, 379-384.
 - 37) Ramanathan, N. L.(1964) : A new weighting system for mean surface temperature of the human body, *J. Appl. Physiol.*, **19**, 531-533.
 - 38) Roberts, M. F., Wenger, C. B., Stolwijk, J. A. J. and Nadel, E. R.(1977) : Skin blood flow and sweating changes following exercise training and heat acclimation, *J. Appl. Physiol. : Respirat Environ. Exercise Physiol.*, **43**, 133-137.
 - 39) 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**, 1871-1816.
 - 40) Rowell, L. B., Brengelmann, G. L., Murray, J. A., Kraning, K. K. and Kusumi, F.(1969) : Human metabolic responses to hyperthermia during mild to maximal exercise, *J. Appl. Physiol.*, **26**, 395-402.
 - 41) Rowell, L. B.(1983) : Cardiovascular aspects of human thermoregulation, *Circ Res.*, **52**, 367-379.
 - 42) Saltin, B. and Hermansen, L.(1966) : Esophageal, rectal, and muscle temperature during exercise, *J. Appl. Physiol.*, **21**, 1757-1762.
 - 43) Shvartz, E., Shapiro, Y., Magazanik, A., Meroz, A., Birnfeld, H., Mechtinger, A. and Shibolet, S. (1977) : Heat acclimation, physical fitness, and responses to exercise in temperature and hot environments, *J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ Exercise Physiol.*, **43**, 678-673.
 - 44) Stolwijk, J. A. J., Saltin, B. and Gagge, A. P. (1968) : Physiological factors associated with sweating during exercise, *Aerosp. Med.*, **39**, 1101-1105.
 - 45) Wyndham, C. H., Strydom, N. B., Morrison, J. F., Toit, F. D. D. and Kraan, J. G.(1954) : Responses of unacclimatized men under stress of heat and work, *J. Appl. Physiol.*, **6**, 681-686.
 - 46) Wyndham, C. H., Strydom, N. B., Van Rensburg, A. J., Benade, A. J. S., and Heyns, A. J.(1970) : Relation between $\dot{V}O_2\text{max}$ and body tempearture in hot humid air coditions, *J. Appl. Physiol.*, **29**, 45-50.
 - 47) 山田敏男, 芦田輝子, 田中信夫, 堀 清記(1978) : 高温環境下の運動訓練の耐熱性に及ぼす影響について, *体力科学*, **27**, 100-108.