

暑熱順化過程における運動時深部 体温上昇と前腕皮膚温下降の関係

山形大学 大貫 義人
(共同研究者) 同 木村 ちはる
同 丹羽 健市
同 荒木 善行

Relation Between the Fall in Forearm Skin Temperature and the Rise in Rectal Temperature During Exercise in the Process of Heat Acclimation

by

Yoshito Ohnuki, Chiharu Kimura
Ken-ichi Niwa and Yoshiyuki Araki
*Department of Health and Physical
Education, Faculty of Education,
Yamagata University*

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the relation between the fall in forearm skin temperature and the rise in rectal temperature during exercise in the process of heat acclimation. Trained 3 males served as subjects. One day experiment contains both 75W exercise intensity for 10 min control exercise under the ambient temperature (T_a) of 28°C , relative humidity (r.h.) of 40% and for 30 min acclimation exercise.

During 10 min control exercise, the environmental conditions and work intensity were set so that changes in skin temperature could be observed without the interference of sweating.

Acclimation exercise were initial neutral control (INC) 3 days under the T_a ; 28°C , r.h.; 40%, heat environment (HE) 10 days under the

Ta; 50°C, r.h.; 40%, and final neutral control (FNC) 3 days under the Ta; 28°C, r.h.; 40%.

The final rectal temperature decreased progressively in the HE 2nd to 8th days. On the other hand, the final forearm skin temperature increased progressively in the HE 5th to 10th days. In the HE 5th to 8th days, the final rectal temperature was negatively correlated to the final forearm skin temperature.

These findings suggest that the rise in core temperature during exercise results from the decreased dry heat loss due to a fall in skin temperature.

要 旨

鍛練した男子大学生3名を被験者とし、暑熱環境下 (Ta; 50°C, r.h.; 40%) に順化する10日間の過程での運動時 (75W, 30分) の深部体温上昇と、コントロール運動時の前腕皮膚温下降との関係を検討した。コントロール運動時の環境条件 (Ta; 28°C, r.h.; 40%) と運動強度 (75W; 10分) は、皮膚温が比較的高く、しかも発汗の関与しない条件であることから設定した。暑熱環境下での運動2日目の終末値直腸温は 39.0°C と最も高く、以後次第に下降した。一方、前腕皮膚温は、5日目以降の終末値が次第に上昇した。そこで5日目から8日目の直腸温と前腕皮膚温の相関関係をみると負の相関を示した ($r = -0.72$)。

以上の結果、暑熱順化形成過程における運動時深部体温上昇水準の下降と前腕皮膚温下降水準の上昇する関係がみられた。このことは、運動時深部体温上昇が皮膚温下降による熱放散の減少も一因であることが示唆された。

まえがき

スポーツの競技力は気温、湿度、風力、日照等の外部環境条件に大きく左右される。特に運動時の深部体温上昇は運動強度に比例して上昇する¹⁾が、その原因は不明である。

ところで、トレッドミルでの正と負の運動負荷時の直腸温上昇と前腕皮膚温の下降は代謝性熱産生量に比例して発現する²⁾。一方、暑熱順化過程でも、一定運動負荷時の深部体温上昇は、その程度に漸次減弱が見られるものの、依然として発現する³⁾。暑熱順化により、熱放散が容易になるから、その分だけ上昇程度はおさえられるのであろう。そこで、発汗の関与しない外部環境条件で、暑熱順化過程における運動時の深部体温上昇を前腕皮膚温下降との関係で研究を意図したものである。

研究方法

被験者は体育を専攻する健康な運動選手で男子大学生3名である。彼らの身体特性はそれぞれ、Y.S. (身長 184.0cm, 体重 81.2kg, 体表面積 2.06m²)・J.K. (172.0cm, 64.5kg, 1.78m²)・H.M. (170.2cm, 65.5kg, 1.79m²) である。実験は全て上半身裸体、下半身はランニングパンツ着用のみとした。

実験手順は図1に示した。被験者は実験開始30分前に環境温 (Ta) 28°C, 相対湿度 (r.h.) 40% の人工気象室に入室した (I) この環境条件は前腕皮膚温が比較的高く、しかも発汗の関与しない実験条件であることが判明している²⁾ ことから設定された。その間に熱電対の貼付ならびに挿入、

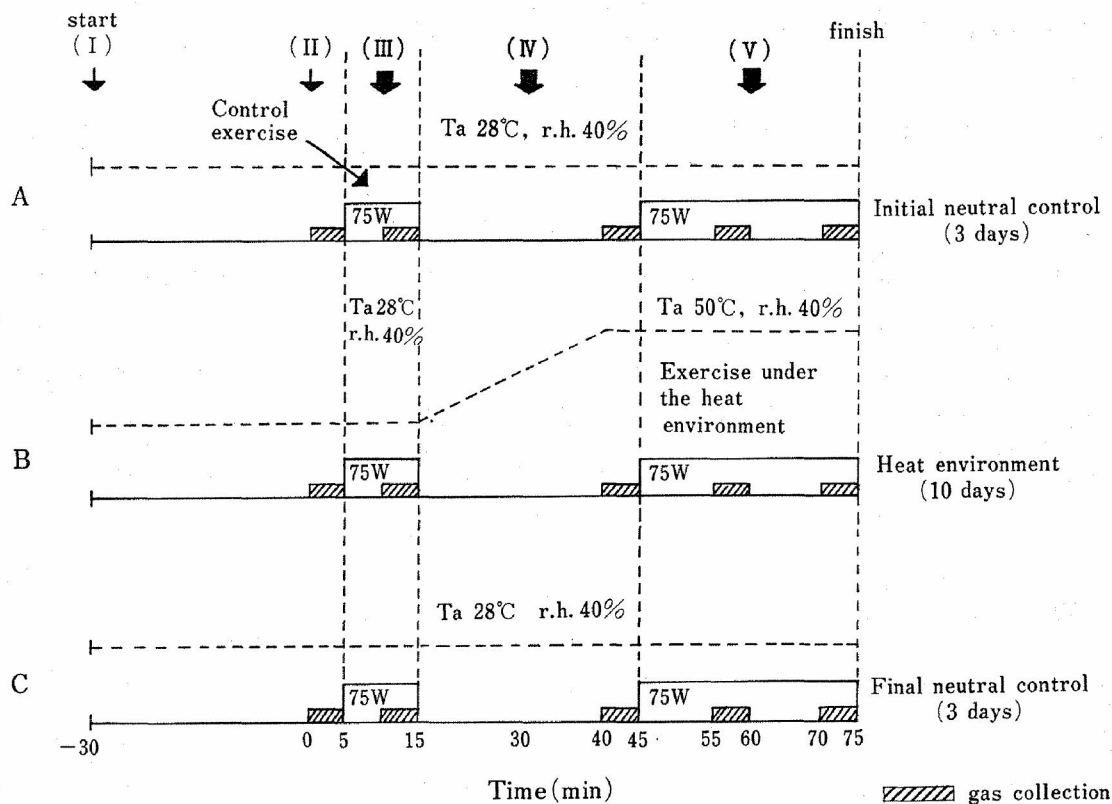


図1 本研究の実験手順

呼吸マスクの装備をした。5分間の安静後(II), 75Wの運動強度を10分間, ウェイト式自転車エルゴメータ(モナーク社製)を用いて行った(III; コントロール運動)。運動強度は, 通常運動している選手であるから, 実験期間中に運動強度そのものによるトレーニング効果が出ず, 暑熱順化効果のみをねらえる最大負荷として設定された。なお, ペダリングの速度は毎分50回転とし, ペダリングの速度を一定に保ち易くするためにメトロノームで指示した。その後, 30分間の安静を保ち(IV), 75Wの運動を30分間行った(V)。コントロール期間は3日間(Initial Neutral Control; INC 1~3)とし, その環境条件はコントロール運動時と同様である(A)。その後, 10日間, 75Wの人工的暑熱順化環境(Heat Environment; HE 1~10)における運動を負荷した(B)。環境条件はコントロール運動直後に, Ta; 50°C, r.h.; 40%に設定した。予備実験から約30分間で設定環境条件に達することを確認した(B; IV)。

これらの環境条件は Eichna ら³⁾の実験条件に近似させ比較する目的で設定した。10日の人工的暑熱順化環境における運動終了後, コントロール期間と同様の条件下(Ta; 28°C, r.h.; 40%, Final Neutral Control; FNC 1~3)で脱順化の様子を観察した(C)。

実験期間は8月下旬から10月中旬までに行ない, 実験時間は午前10時から12時, 午後2時から4時, 午後4時から6時の時間帯で行ない。同一被験者はできるだけ同一時間帯に実験できるように調整した。

測定項目と方法は以下の通りである。まず呼吸は各運動前の安静時に5分, コントロール運動は5~10分, 暑熱順化運動時は10~15分, 25~30分の5分間ずつ採取した。呼吸ガスは労研式大型ガス分析器で酸素と炭酸ガス濃度を分析し, 酸素摂取量及び炭酸ガス排泄量を求めた。さらに代謝性熱産生量は W/m² の単位に換算してもとめた。

直腸温は熱電対の先端を約15cm挿入し, 皮膚

温の測定は Hardy & Dubois⁴⁾ の身体 8ヶ所 (右半身) に熱電対をサージカルテープにて貼付し, 直腸温とともにデジタル記録計 (Procos-VII, Chino 製, 精度±0.1°C) で1分ごとに記録した, さらに出力をコンピュータに接続し, 平均皮膚温と平均体温をオンラインで算出した. なお平均皮膚温と平均体温の算出式は以下の通りである.

$$\begin{aligned} \text{平均皮膚温 } (\bar{T}_s) = & 0.07T_{\text{head}} + 0.14T_{\text{arms}} + \\ & 0.05T_{\text{hands}} + 0.17T_{\text{back}} + 0.18T_{\text{chest}} + \\ & 0.19T_{\text{thighs}} + 0.13T_{\text{legs}} + 0.07T_{\text{feet}} \end{aligned}$$

(なお, 各係数に掛ける係数は, その領域が全体表面積に占める割合である.)

$$\begin{aligned} \text{平均体温 } (\bar{T}_b) = & 0.65T_{\text{re}} + 0.35\bar{T}_s \\ & (28^\circ\text{C の時}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\bar{T}_b) = & 0.80T_{\text{re}} + 0.20\bar{T}_s \\ & (50^\circ\text{C の時}) \end{aligned}$$

体重減少量は運動前後の体重測定(精度±10g)から計測した. また呼吸気道からの水分損失及び

排出された炭酸ガスと摂取した酸素の重量差による体重減少は Mitchell らの報告⁵⁾ に準じて計算した.

研究結果

本報告の全ての結果は3名の被験者の平均値で示してある.

1) 一般的反応

3名の被験者のうち, 1名は HE 1 において 28分 20秒で疲労困憊におちいった. HE 2 では 30分 27秒が運動続行出来る最大時間であった. あとの2名は HEシリーズにおいては疲労困憊におこまれるものの一応全て可能であった.

2) 代謝性熱産生量

図2はコントロール期間 (INC 1~3) と10日の人工的暑熱順化 (HE 1~10), 及び3日の脱順化期間 (Final Neutral Control; FNC 1~3) における代謝性熱産生量の変化過程を示したもの

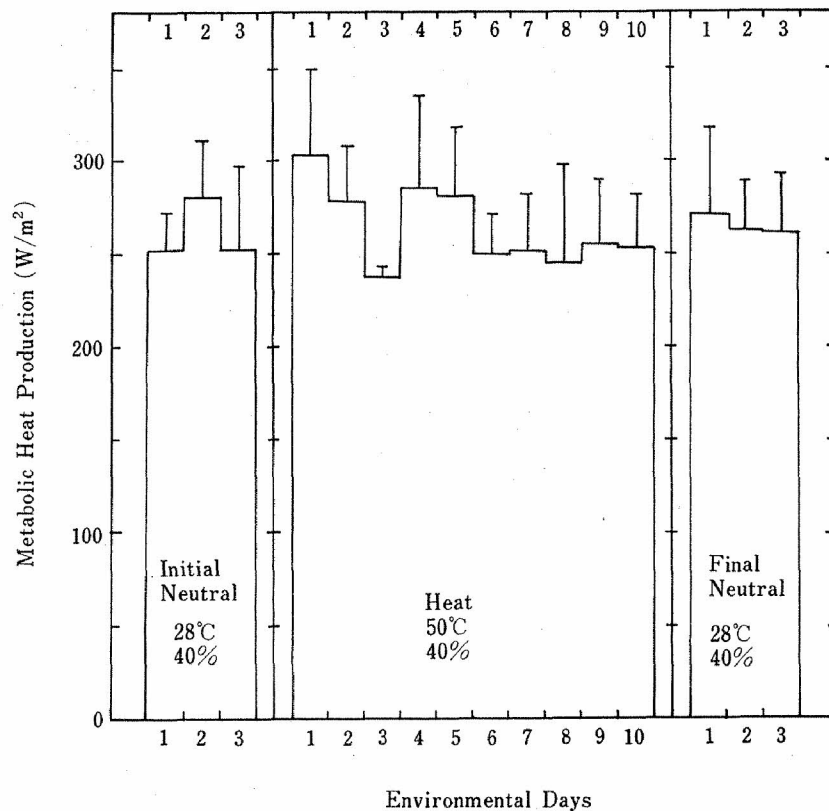


図2 コントロール期間 (3日), 暑熱暴露期間 (10日) および脱順化 (3日) における代謝性熱産生量

である。結果内容は図1の(V)における、Time (min) の55~60と70~75の2回の測定値の平均と標準偏差値を求めたものである。

INC 1~INC 3における75W運動時の代謝性熱産生量は 251.6~279.3W/m² の範囲であった。HE期間の75W運動時においてHE 1の代謝性熱産生量は、303.3±46.9W/m² で最大値、HE 3の値は238.9±4.9W/m² で最小値を示した。その後の変化ではHE 4が285.5±49.1W/m² と46.6W/m² 増加し、HE 8(244.6±53.2W/m²)まで漸減傾向を示し、HE 9とHE10は約10W/m² 程度の上昇を示した。FNCではFNC1がHE 10より18W/m² 上昇し、272.1±46.4W/m² になるが、その後減少し、FNC 3では262.0±32.8W/m² であった。しかしながら、INC 2とHE 1からHE 10及びFNC 1からFNC 3の間にはほとんど有意な増減結果は統計上得られなかった (p > 0.05)。ただし、INC 2とHE 3の間のみ危険率5%水準で有意に減少していた。同様の結果

は、INC 3とHE 1からHE10及びFNC 1からFNC 3の間でも有意な増減差は認められなかった (p > 0.05)。また、HE 1を対照とすると、HE 3のみ5%の危険率で有意な下降を示すが、その他は統計上有意な増減は認められない。

3) INC と HE 及び FNC の各日々における体温のパラメータ

すなわち直腸温及び前腕皮膚温の変化は、表1と図3に示し、平均皮膚温の変化は図3のみに示した。

① 直腸温

INC 1~3では、安静時37.6~37.8で始まり、それぞれ38.1, 38.4, 38.2°Cまで上昇した。上昇幅はそれぞれ0.5, 0.7, 0.4°Cであった。

HE1は37.5°Cから38.4°Cまで0.9°Cの上昇度にとどまったが、HE 2では37.7°Cから39.0°Cまで上昇し、HE シリーズで最高の1.3°Cの上昇幅を示した。最大の上昇はSubj., H.M. の39.4°Cで1.6°Cの上昇であった。以後次第に最

表1 コントロール期間(3日)、暑熱暴露期間(10日)および脱順化(3日)における各日々の直腸温(30分運動)と前腕皮膚温(10分)の終末値とその変動幅、体重減少は75分間の値を示した。値は全て3名の平均値

	Day	Rectal temp.		Forearm skin temp.		B.W.L. (kg)
		final	change	final	change	
initial neutral control	1	38.1	0.5	33.7	-0.6	0.48
	2	38.4	0.7	33.7	-0.5	0.53
	3	38.2	0.4	33.7	-0.6	0.47
heat environment	1	38.4	0.9	33.4	0	1.14
	2	39.0	1.3	34.0	-0.4	1.11
	3	38.7	1.1	33.6	-0.4	1.05
	4	38.7	1.1	34.0	-0.5	1.12
	5	38.6	1.0	33.1	-0.7	1.19
	6	38.5	0.9	33.3	-0.6	1.05
	7	38.4	0.7	33.8	-0.7	0.97
	8	38.2	0.9	33.6	-0.5	0.93
	9	38.5	0.8	33.9	-0.5	1.00
	10	38.7	1.1	34.2	-0.5	1.05
final neutral control	1	38.1	0.5	33.4	-1.0	0.44
	2	38.1	0.6	33.9	-0.8	0.48
	3	38.2	0.6	34.4	-0.4	0.30

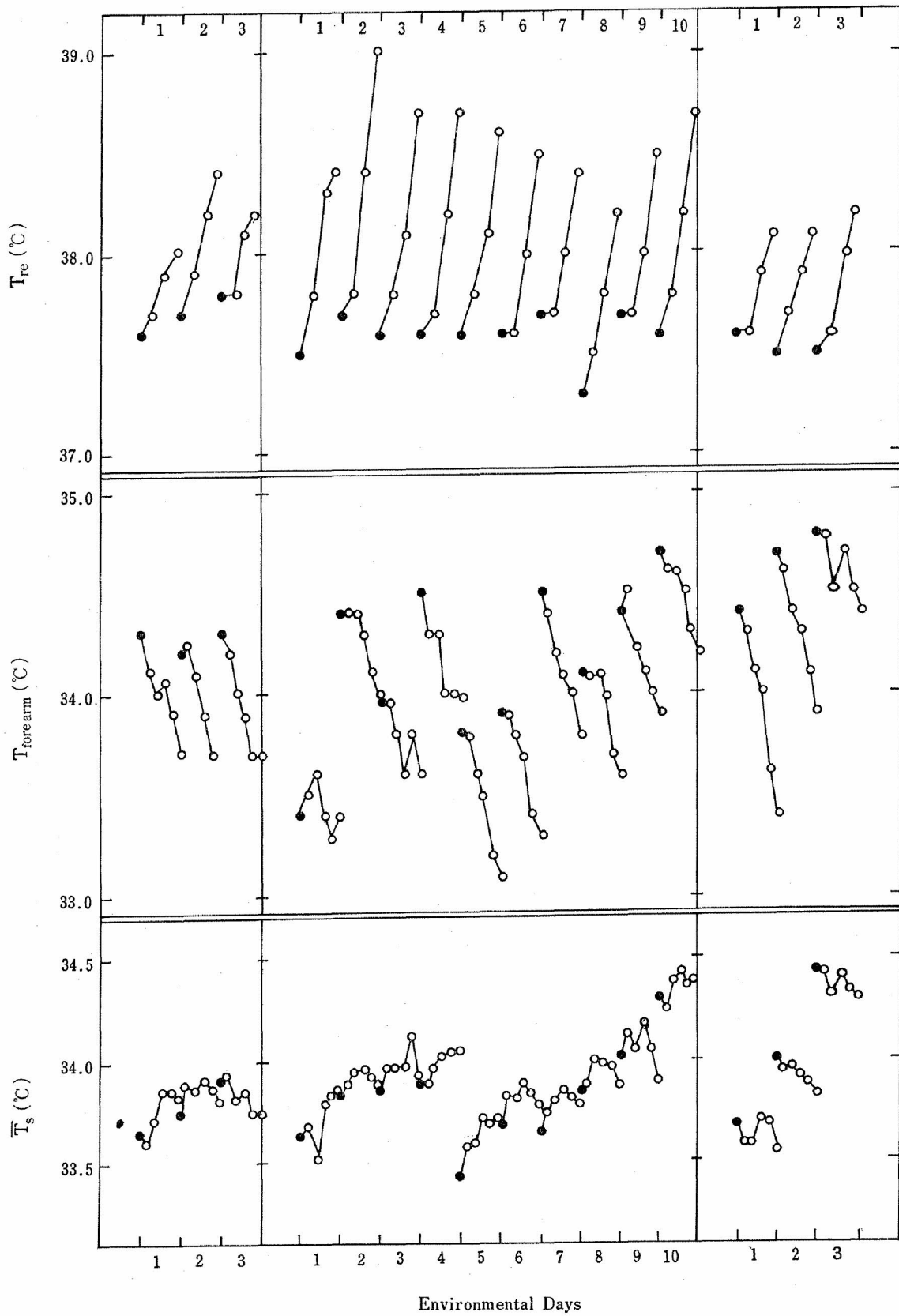


図 3 上段：30分運動時の直腸温変化，●印各日々の初期値，○印は10分ごとの値を実験期間中示す
 中段：10分運動時の前腕皮膚温の変化，●印初期値，○印は2分ごとの値を示した
 下段：10分運動時の平均皮膚温の変化，●印は初期値，○印は2分ごとの値を示した

終値と上昇幅が下降する。すなわち、最終値が HE 3 と HE 4 で 38.7°C, HE 5 で 38.6°C, HE 6 で 38.5°C, HE 7 で 38.4°C, HE 8 で 38.2°C までしか上昇しなくなった。当然のことながら上昇幅は 1.1°C から 0.7°C まで短縮した。しかしながら、HE 9 と HE 10 では若干上昇し、最終値が 38.5°C と 38.7°C, 上昇幅も 0.8~1.1°C と拡大した。FNC では、終末値が 38.1~38.2°C, 上昇幅も 0.5~0.6°C と、比較的安定していた。

② 前腕皮膚温

INC では終末値が偶然にも 33.7°C となり、下降幅も 0.5~0.6°C と非常に安定していた。HE シリーズでは、HE 1 から HE 4 までは、初期値と終末値及び下降変化幅に一定の傾向はみられない。しかし、HE 5 以降、特に初期値と終末値に上昇傾向がみられた。すなわち、初期値は 33.8°C (HE 5), 33.9°C (HE 6), 34.1°C (HE 8), 34.4°C (HE 9) 及び 34.7°C (HE 10) であった。

一方、終末値はそれぞれ、33.1, 33.3, 33.6, 33.9, 34.2°C であった。しかしながら下降幅は 0.5~0.7°C とほぼ一定であった。また、FNC 1 では HE 10 より初期値が 0.3°C 下降し、33.4°C であった。以後 FNC 2 と FNC 3 では初期値が 34.7°C 及び 34.8°C と上昇し、終末値も 33.9°C 及び 33.4°C とそれぞれ上昇した。なお、下降幅は FNC 2 で 0.8°C, FNC 3 で 0.4°C となり、脱順化の過程で下降幅が短縮する傾向がみられた。

③ 平均皮膚温

INC では、初期値が 33.7~33.9°C で終末値が 33.8°C と非常に安定していた。HE では HE 1 ~ 4 と HE 5 ~ 10 の様相は異なる。すなわち、前半部 HE 1 ~ 4 では、初期値が 33.7~33.9°C, 終末値が 33.9~34.1°C とほぼ一定であった。一方、HE 5 ~ 10 では、初期値が一端 0.5°C 下降し 33.4°C となる。その後 33.7°C (HE 6.7), 33.9°C (HE 8), 34.0°C (HE 9), 34.3°C (HE 10) と上昇し続けた。

終末値も各日々に 0~0.3°C 上昇するが、全体として次第に漸次上昇する傾向がみられた。しかしながら、FNC の反応は特異的である。すなわち、初期値はステップ状に上昇し (FNC 1 ; 33.7°C, FNC 2 ; 34.0°C, FNC 3 ; 34.4°C), 終末値は逆に、0.1~0.2°C の下降 (FNC 1 ; 33.6°C, FNC 2 ; 33.8°C, FNC 3 ; 34.3°C) 反応を示す。しかし、全体として初期値に誘導され、ほぼ段階状の変化を示した。

④ 体温パラメータ間の関係

INC 1 ~ 3, HE 1 ~ 10, 及び FNC 1 ~ 3 の各日々において、Control Exercise(Ⅲ) の 10 分間運動時の平均皮膚温と前腕皮膚温の終末値の関係を示したのが図 4 左である。両者にはかなり高い相関 ($r = 0.77$) がみられ、前腕皮膚温が、平均皮膚温の変動を約 6 割型説明出来ることを示している。図 4 右は図 3 における、HE 5 ~ 8 の直腸温と前腕皮膚温及び平均皮膚温の関係を示した。おのおの値は各日々における終末値である。直腸温と前腕皮膚温の相関は -0.72 , 平均皮膚温とは $r = -0.97$ であった。

4) 体重減少量

体重減少量の変化は表 1 と図 5 に示した。INC では 0.47~0.48kg, FNC では 0.30~0.48kg の減少であったが、INC 2 及び INC 3 と FNC の各値と比較検定したが有意な下降ではなかった。また、HE 1 の体重減少量 ($1.14\text{kg} \pm 0.03$) と HE 2 ~ 10 の各値を比較したところ、HE 3 (1.05 ± 0.02) と HE 7 ($0.97\text{kg} \pm 0.03$) でそれぞれ 5% と 1% の危険率水準で有意な下降を示した。他の HE とは有意な増減ではなかった。しかしながら、全体として、HE 5 を除き HE 1 から HE 8 まで平均値に漸減する傾向がみられ、HE 9 と HE 10 で若干増加した。

考 察

運動時の体温上昇は熱放散能力の不全によるも

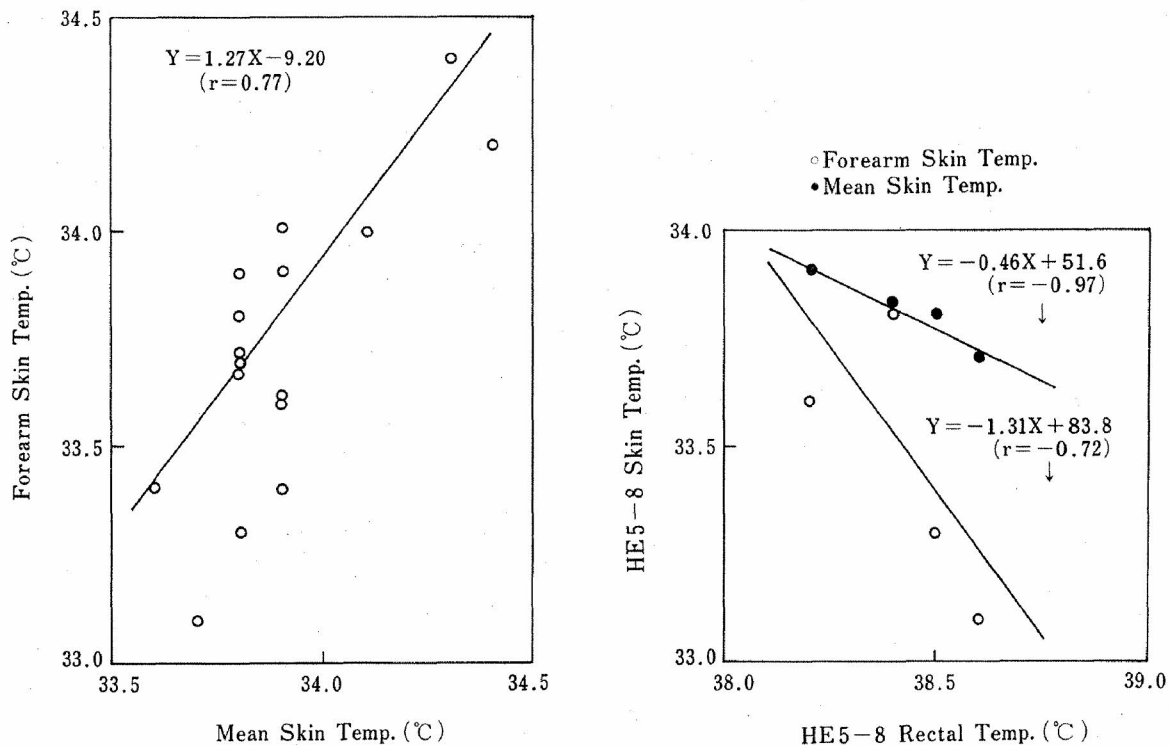


図4 左：各日々における10分間運動時の平均皮膚温と前腕皮膚温の終末値の関係
 右：HE5～8の直腸温と前腕皮膚温および平均皮膚温の関係，値は終末値

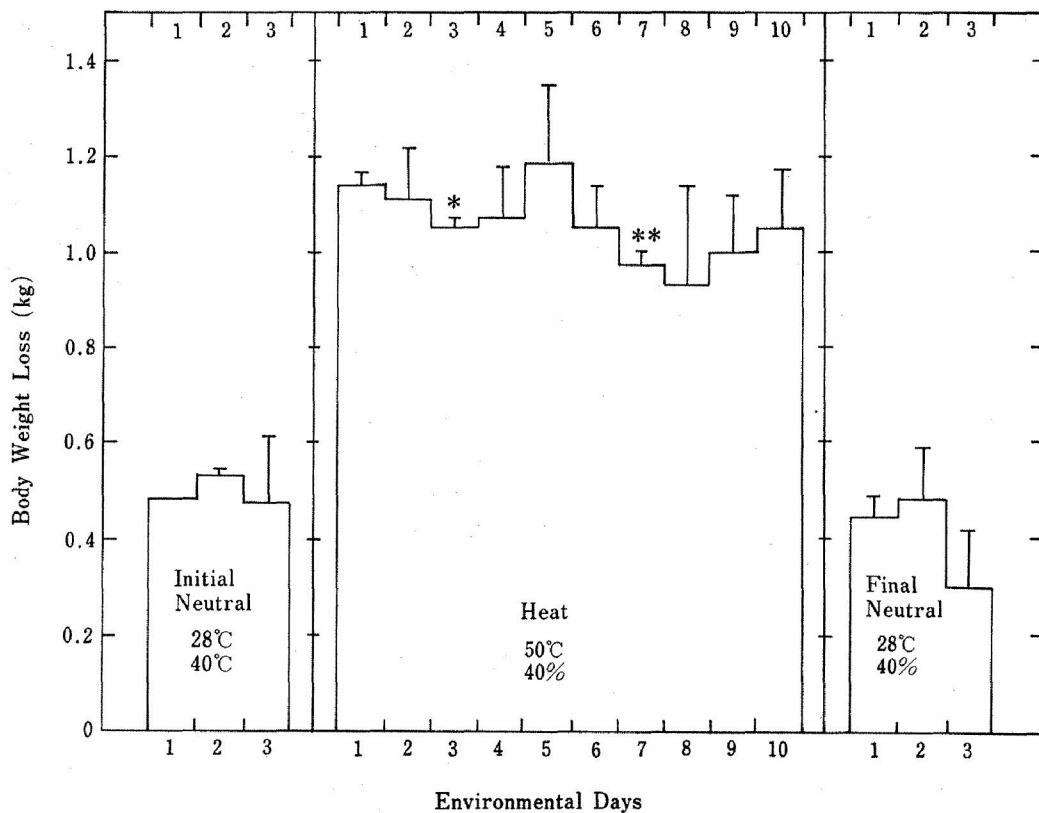


図5 コントロール期間（3日），暑熱暴露期間（10日）および脱順化（3日）
 における各日々の実験手順75分間の体重減少量

のではなく、運動強度に比例した能動的な上昇であり、5～30°C内では環境温に関係なく同じである¹⁾。30°C以上の気温では、運動強度がある程度をこえると、熱放散能力が熱産生量を下まわる結果、体温は上昇する⁶⁾。すなわち、運動強度が大である程、直腸温の急激な上昇が起こる閾値気温が低いことを示している。

また気温以外の環境因子、例えば湿度を横軸にとって運動強度と直腸温の関係を調べても同様である⁷⁾。さらに、運動時の体温上昇は運動強度の絶対値よりも個人の最大酸素摂取量の相対値に強く関係する⁸⁾ことや、運動の種類が異なっても酸素摂取量が同じであれば同程度の直腸温上昇がみられる⁹⁾ことなどがすでに明らかにされている。その上、暑熱順化によって汗の熱放散能力が増大しても運動による体温上昇は同様に起こる³⁾。

一方、運動時の皮膚温は運動強度に比例して下降し、この皮膚温下降は発汗を伴わない軽度の静的運動においても認められることから、蒸発や対流増加の結果ではなく、運動に伴う皮膚血管収縮が皮膚温下降の主因である¹⁰⁾。

また筆者は、すでに発汗を伴わない環境 (T_a ; 26°C, r.h.; 40%) 下で0から100W程度の運動を10分間負荷し、その際の皮膚温を観察した。その結果、手掌部皮膚温は運動開始と共に低下し始める。運動強度が大であるほど急激な低下を示すが、運動中上昇に転ずる。胸部では、運動負荷が大となってようやく皮膚温低下が、かなりの潜時を経て認められた。前腕部では手掌と胸部の中間の反応を示した。これらの反応の差異はそれぞれの部位の血管反応の特徴を反映するのであろうが、運動強度が大となるにつれ、皮膚血管収縮域が末梢部から幹部へ拡大することを示した¹¹⁾。

さらに、トレッドミル運動により uphill と downhill, すなわち、正と負の運動を、発汗の関与しない条件下 (T_a ; 28°C, r.h. 40%) で、代謝性熱産生量 150～350W/m² の運動を10分間行

うと、前腕皮膚温の下降は、温熱負荷よりも代謝性熱産生量に比例して下降した²⁾。

以上のことから、暑熱順化過程において、深部体温上昇程度が減弱する過程で、前腕皮膚温が、いかなる様相を呈するのかを今回調べた。直腸温は2日目最大上昇幅を示し、漸次低下した(図3)。前腕皮膚温は前半4日間は一定の傾向を示さないが、HE5で最大下降し、その後、漸次上昇する傾向を示した(図3)。

そもそも、皮膚温は同一環境下や同一運動強度条件下では、皮膚血流の動態を反映したものであろう。運動時の皮膚血流について、Christensen と Nielsen は運動初期に減少することを観察し¹²⁾、寒冷環境下では運動の初期における減少はみられず、運動の後半に増加すると報告した¹³⁾。Bishop らは下肢の運動時に前腕皮膚温血流は、運動を開始すると同時に減少すると報告している¹⁴⁾。

このようなことから、皮膚血流を反映するであろう皮膚温は、今回特に、暑熱暴露前半期の暑熱順化形成過程において、皮膚血管運動の不適応がおこったものと解される。そこで直腸温上昇分に見合う分だけの前腕皮膚温下降を誘発しえなかったのであろう。

しかしながら、HE5～8では、直腸温上昇水準の下降と、前腕皮膚温下降水準の上昇する関係がみられた(図5右)。今回の実験目的に適う現象が一部観察された。直腸温と前腕皮膚温の値が、10日間全てに観察しようとするれば、暑熱順化過程の環境条件と運動強度について、もっと詳細な検討が必要と思われる。

以上のことから、暑熱順化過程においても運動時の深部体温上昇と、前腕皮膚温の下降は、一部負の対称性をもって観察された。この様な運動時の皮膚温下降は、静的な運動においても認められるので、対流熱放散の増加とは考えられない¹⁰⁾。むしろ、非温熱性要因の作用による血管収縮の結

果であると考えられる。すなわち、体性神経系の末梢受容器からの求心性インパルスが、脊髄において自律神経系の遠心路に影響を及ぼし、皮膚へ向かう血管運動神経線維の活動並びに発汗運動が修飾を受け皮膚温の低下を招くものと思われる。もう1つの可能性は、運動時に錘体路系あるいは錘体外路系の興奮が、中枢神経内において拡延し、おそらく脊髄レベルで皮膚血管運動神経の活動に何らかの影響を及ぼすので、皮膚血流が減少し、皮膚温は低下するものと思われる。

結局、運動時の深部体温上昇は、皮膚温が下降し、熱放散が妨げられることがその一因として考えられる。

結 論

暑熱順化過程においても、運動時の深部体温上昇は、その上昇幅に若干の減弱がみられるものの、依然として継続した。発汗が関与せず、しかも比較的高い皮膚温を保持したところで運動負荷が加わると、特に前腕皮膚温は下降した。今回、暑熱順化の後半期において、運動時の直腸温終末値と前腕皮膚温及び平均皮膚温の終末値は逆相関した。

以上の見解は皮膚温下降による熱放散の減少が、運動時深部体温上昇の一因であろうことを示唆した。

文 献

- 1) Nielsen, M.; Die Regulation der Körpertemperatur bei Muskelarbeit. *Skand. Arch. Physiol.*, **79**: 193—230 (1938)
- 2) Ohnuki, Y. and T. Nakayama; Fall in forearm skin temperature during grade walking on a treadmill. *Jpn. J. Physiol.*, **32**: 93—101 (1982)
- 3) Eichna, L.W., C.R. Park, N. Nelson, S.M. Horvath, and E.D. Palmes; Thermal regulation during acclimatization in a hot (desert type) environment. *Am. J. Physiol.*, **163**: 585—597 (1950)

- 4) Hardy, J.D. and E.F. Dubois; The technic of measuring radiation and convection. *J. Nutr.*, **15**: 461—475 (1938)
- 5) Mitchell, J.W., Nadel, E.R. and Stolwijk, J.A.J.; Respiratory weight losses during exercise. *J. Appl. Physiol.*, **32**(4): 474—476 (1972)
- 6) Lind, A.R.; A physiological criterion for setting thermal environmental limits for everyday work. *J. Appl. Physiol.*, **18**: 61—56 (1963)
- 7) 丹羽健市, 中山昭雄, 大貫義人; 運動時の体温上昇と環境湿度, 山形大学紀要(教育科学)第9巻, 第2号, 265—273 (1987)
- 8) Saltin, B. and L. Hermansen; Esophageal, rectal and muscle temperature during exercise. *J. Appl. Physiol.*, **21**: 1757—1762 (1966)
- 9) Nielsen, B.; Thermoregulatory responses to arm work, leg work and intermittent leg work. *Acta Physiol. Scand.*, **72**: 25—32 (1968)
- 10) Nakayama, T., Y. Ohnuki, and K. Niwa; Fall in skin temperature during exercise. *Jpn. J. Physiol.*, **27**: 423—437 (1977)
- 11) 大貫義人, 丹羽健市, 中山昭雄, 平原豊弘; 発汗を伴わない運動時の皮膚温について, 日本生気象学会誌, **16**: 36—41 (1979)
- 12) Christensen, E.H. and M. Nielsen; Investigations of the circulation in the skin at the beginning of muscular work. *Acta Physiol. Scand.*, **4**: 162—170 (1942)
- 13) Christensen, E.H. and M. Nielsen; Measurements of blood flow in the skin at rest and during work at varied external temperature. *Acta Physiol. Scand.*, **4**: 171—174 (1942)
- 14) Bishop, J.M., K.W. Donald, S.H. Taylor and P.N. Wormald; The blood flow in human arm during supine leg exercise. *J. Physiol.*, **137**: 294—308 (1959)