

暑熱下の運動開始直後の体温調節反応

鳥井正史* 山崎昌廣* 佐々木 隆*

THERMOREGULATORY RESPONSES OF THE INITIAL STAGE OF BICYCLING IN A HEAT ENVIRONMENT

MASAFUMI TORII, MASAHIRO YAMASAKI AND TAKASHI SASAKI

Abstract

The purpose of this study is to determine the progress of whole body sweating rate (SR) in the initial stage of moderate work in two hot environments, and to relate the SR to the body temperature attained.

Four healthy males, 28 to 31 years of age, performed leg exercise of 40% $\dot{V}O_{2max}$ with a Monark bicycle ergometer set up on a platform scale (Potter bed balance). All the experiments were carried out in a climatic chamber at ambient temperature (T_a) of 30°C or 40°C (relative humidity, 45%) in winter season following body heating for 30 min at a room temperature of 30°C. Skin sweating was monitored by the bed balance with automatic weight change indicator throughout the experimental period. Rectal (T_{re}) and 7 skin temperatures were measured every minute by a thermistor and thermocouples, respectively. Oxygen consumption was determined before and during the work by the Douglas bag method. Heart rate was recorded by electrocardiography throughout the experiment.

At T_a 40°C, the SR increased as soon as the work started, whereas at T_a 30°C it took a few minutes. The mean SR during the work at T_a 40°C was significantly higher than that at T_a 30°C. The level of mean skin temperature (\bar{T}_{sk}) was higher at T_a 40°C (35°C) than T_a 30°C (33°C), and T_{re} was approximately 37.3°C at T_a 30°C and 40°C. The changes in the T_{re} and \bar{T}_{sk} were similar in two different conditions. The negative correlations were found between the SR and the \bar{T}_{sk} during the work. The regression line was significantly different at T_a 30°C and 40°C. The \bar{T}_{sk} decreased in proportion to increase of the SR. Moreover, there was a good correlation between the SR and heart rate during the work in both environments. Heat production stood at the same level in two different thermal conditions.

The present study suggests that the body core temperature in working men is maintained at least constant level, since the evaporation in the initial stage of the work is largely stimulated, and the reduction of skin temperature may be caused by other factors than the evaporation.

(J. Physical Fitness Japan 1984, 33 : 98~104)

I. 緒 言

高温下における運動時体温調節に関する1970年までの主要文献を中心に総説した Wyndham²⁾によると、運動時の発汗反応は深部体温や皮膚温とともに運動時の温熱馴化や体温調節能を検討す

るための最も重要な指標であるといわれている。環境温が35°C近傍を示すとき、体外への熱放散ルートは輻射や対流にかわって蒸発性熱放散が増大する。更に環境温が上昇し、皮膚温をうわまわると逆に輻射や対流によって外界から体内への熱移動が生じ、体熱増加をまねくおそれがある³⁾。

* 熊本大学・体質医学研究所・生理学研究室 〒862 熊本市九品寺 4-24-1

Department of Physiology, Institute of Constitutional Medicine, Kumamoto University, Kumamoto 862

このような温度環境下の体温調節では、汗の蒸発による熱放散は唯一の放熱手段であり、特に運動中には体内への熱移動に加えて筋における大量の熱産生をともなって更に多量の汗の分泌・蒸発が体温調節に寄与する⁶⁾¹⁶⁾²²⁾。

一方、高温環境における運動時の発汗速度、中でも局所発汗速度 (Local Sweating Rate) は環境温 37.5°C において作業開始と同時に著しく増大する²¹⁾。本実験は運動開始の比較的初期の全身発汗速度 (Whole Body Sweating Rate) の推移を観察し、深部体温や皮膚温との関連を通して、高温下における運動時体温調節作用の特性を検索する目的で行った。

ところで Nielsen⁹⁾ が指摘するように運動時の深部体温の上昇は $5\sim 30^{\circ}\text{C}$ の環境温範囲において、作業強度に依存する。中でも直腸温の平衡状態形成にはおおよそ1時間を要する。しかし近年 Davies²³⁾ は環境温 20°C において最大酸素摂取量 ($\dot{V}\text{O}_2\text{max}$) の85%負荷による激作業中、直腸温が平衡状態を形成しないことを報告している。いずれにおいてもこれらの研究では長時間あるいは少なくとも1時間前後の運動負荷時の体温調節反応についての検討に重点がおかれているようである。したがって運動開始直後、すなわち深部体温がいまだ平衡状態に達していない段階への言及はきわめて少ないように思われる。よって本実験では暑熱環境下の運動開始直後に視点をあてた。

II. 実験方法

A. 被験者：被験者は成人男子の教室員であり、彼等の身体的特性 (平均 \pm SE) は年齢； 28.5 ± 0.5 歳，身長； 170.0 ± 4.7 cm，体重； 71.0 ± 5.1 kg，体表面積； 1.83 ± 0.09 m² である。彼等は現在定期的なトレーニングを行っておらず、また高温下における運動を経験していない。

B. 実験条件および手順：本実験において被験者は、上半身裸体でランニングパンツのみを着用して、あらかじめ環境温 (T_a) を 30°C に設定した部屋に30分間座位安静にて滞在した。その後ひきつづき T_a 30°C あるいは 40°C (いずれも相対湿度, r.h., 45%) の人工気候室において、自転車エルゴメーター (Monark 社) による運動を17分間行い、作業終了後10分間エルゴメーター上で安

静を保った。作業負荷は各被験者の最大酸素摂取量 ($\dot{V}\text{O}_2\text{max}$) のおおよそ40%であった。また対照実験として、上記と同様の条件下においてエルゴメーター上で27分間安静維持、つまり温熱負荷のみの負荷実験を行った。

本実験は冬季の1~2月の午前中 (9:00~11:00) に行われた。被験者は実験当日には、実験開始の少なくとも2時間前に起床し、食事や飲料水を摂取せずに実験にのぞんだ。

C. 測定およびその方法：運動時あるいは安静時の発汗量は自転車エルゴメーターを bed balance (J.A. Potter, Model 33B 感度 1g) 上に設置して実験中連続して体重減少として記録した。同時に直腸温 (T_{re})、皮膚温 (T_{sk}) および心拍数 (HR) を測定した。 T_{re} はサーミスター (Shibaura Elect. Co., MGA-III) プローブを肛門より10~12 cm 挿入し経時的に測定した。皮膚温は銅-コンスタンタン熱電対精密温度測定装置 (Ohkura Elect. Co., AM-300) を用いて、全身7ヶ所 (前額、腕部、手、足、下腿、大腿および腹部) をそれぞれ1分毎に打点して記録した。平均皮膚温 (\bar{T}_{sk}) は、次の Hardy-DuBois の推定式⁴⁾ によって算出した。

$$\begin{aligned} \bar{T}_{sk} = & 0.07 T_{\text{head}} + 0.14 T_{\text{arm}} + 0.05 T_{\text{hand}} \\ & + 0.07 T_{\text{foot}} + 0.13 T_{\text{leg}} + 0.19 T_{\text{thigh}} \\ & + 0.35 T_{\text{trunk}}, \text{ } ^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

HR は胸部誘導心電図を連続記録し、1分間隔でR棘をかぞえ、その値をHR 1分値とした。

また定常状態の運動時の産熱量を算出するために、呼気ガスをダグラスバッグを用いて採集した。呼気採集は作業実験の場合、作業終了前2分間行なった。対照実験の場合も作業実験と同様の時間帯に2分間採集を行った。その一部をサンプルとして O_2 (Beckman F-3 型)、 CO_2 (堀場, MCD-1 型) アナライザーによって分析し、酸素消費量を求めた。

エネルギー代謝量 M (kcal/m²·h) は次の式によって計算した。

$$M = \dot{V}\text{O}_2 \times 5.0 \times 60 / A$$

$\dot{V}\text{O}_2$: 酸素消費量 (l/min), 5.0 (あるいは 4.8) : 運動時 (安静時) の酸素 1l 消費による発生熱量 (kcal), A : 体表面積 (m²)。またエルゴメーターによる負荷強度 E (kpm/min)

から、外になした仕事量 W (kcal/m²·h) を次の式によって計算した⁹⁾。

$$W = E \times \frac{1}{427} \times 60 / A$$

したがって産熱量 H (kcal/m²·h) は

$$H = M - W$$

となる。

さらに蒸発した有効発汗量から蒸発性熱放散量 E (kcal/m²·h) を以下の推定式より求めた。

$$E = SL \times 0.58 / A$$

SL: 1時間当りの有効発汗量 (g/h),

0.58: 水 1 g の潜熱 (kcal), A: 体表面積 (m²)。

本実験においては汗の蒸発を容易にし、有効発汗を得るために、被験者は背部後方よりわずかながらも微風を受けた。これにより T_{sk} 40°C における作業実験においても分泌させられた汗が bed balance 上に落下することはなかった。しかしながら実験終了後パンツに附着した汗の量を測定したところ 2~6 g の水分がパンツに吸収されていた。

本実験では前述したように 30°C の環境に30分間滞在後、それぞれの環境に入室し、 T_{sk} や T_{re} 測定のための熱電対・サーミスタープローブの装着や bed balance による体重減少の測定準備などに15分を要し、その後実験を開始した。

III. 実験結果

図1は30および40°Cにおける安静(対照実験)と運動時(作業実験)の発汗量の経時的变化を個別的に示したものである。

安静時の汗の分泌パターンは、両環境において分泌速度に差異 ($p < 0.01$) が認められるが、ほぼ一定した速度で変化していった。これに対して運動時には各被験者の発汗速度に相違がみられるものの、安静時に比して発汗速度の増大が認められた。すなわち、30°C では作業開始数分後に、40°C では作業開始直後に発汗速度の著明な増加が認められた。また30°Cにおける運動時発汗速度は作業を中止すると数分後に安静時レベルの速度に回復するが、40°Cではそのような傾向はみられず、作業終了10分経過しても安静時の速度に回復しなかった。

図2は、両環境における安静と運動時の発汗速度 (sweat rate, SR), T_{re} , \bar{T}_{sk} および HR の経時的变化を示したものである。

SRは前述したように安静時には両環境において有意差がみられるが、いずれも一定した速度で変動するのに対して、運動時には作業開始とともにすみやかに増大していった。運動時の平均 SR (mean \pm SD) は30°Cにおいて 4.9 ± 0.9 g/min, 40°Cで 8.0 ± 1.0 g/minであり、両者の間には有意な差異が認められた ($p < 0.05$)。運動時のHRはいずれの環境においてもきわめて類似した上昇傾向を示した。作業終了前1分値は40°C (111 ± 3 , beats/min) は30°C (105 ± 7 , beats/min) よりいくぶん高かった。安静時のHRはそれぞれの環境温度条件において一定に保持されている。また肺換気量および $\dot{V}O_2$ はいずれも環境条件による差異がほとんど認められなかった。

T_{re} は両環境においてわずかに上昇した。安静

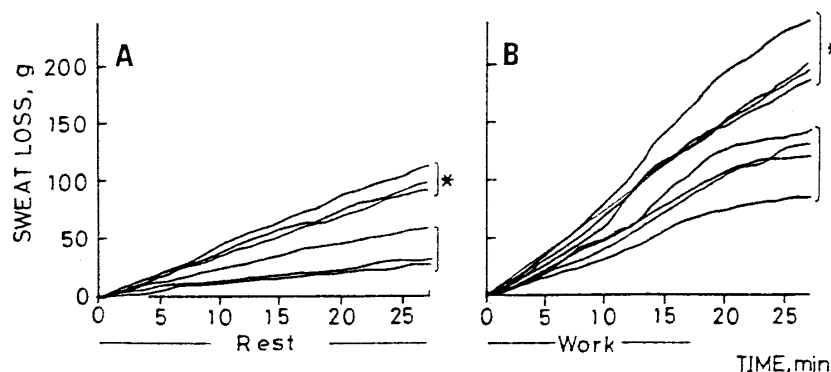


Fig. 1. Sweat loss during rest (control exp., A) and work (work exp., B) in two different ambient temperatures of 30 and 40°C (rh, 45%) for 4 subjects.

* the experiments at 40°C.

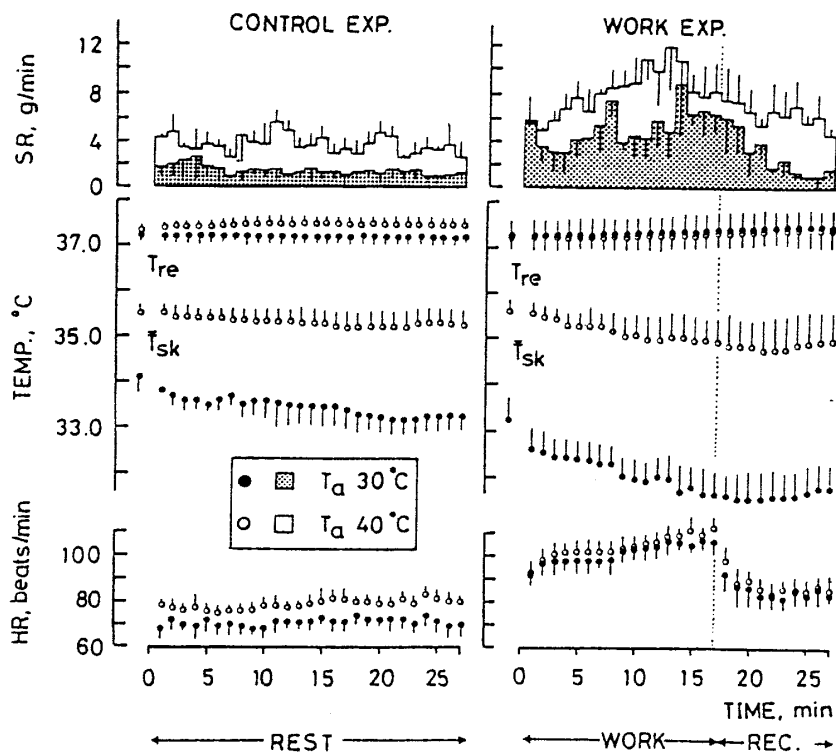


Fig. 2. Time courses of sweat rate (SR), rectal (T_{re}) and mean skin (\bar{T}_{sk}) temperatures, and heart rate (HR) during rest and work in two different ambient temperatures (T_a) of 30 and 40°C (rh, 45%). Values are indicated by mean \pm S.D.

時には 30°C では変動しなかったが、40°C において高温暴露初期にいくぶん上昇した。

これに対して \bar{T}_{sk} は 30°C における 30 分間の予熱操作終了時にはほぼ 33°C であった。40°C におけるそれぞれの実験時の \bar{T}_{sk} 初期値はおおよそ 35°C であった。各温度環境で維持された \bar{T}_{sk} は作業を継続するにしたがい漸次低下していった。作業終了時の \bar{T}_{sk} は 40°C において 30°C 環境より依然と高く、 \bar{T}_{sk} の初期値に対する低下度は、40°C より 30°C において多少大きい、両者に有意差は認められなかった。

図 3 は運動時の SR と \bar{T}_{sk} との相関関係を示したものである。2 つの温熱条件下においてそれぞれのレベルで維持された \bar{T}_{sk} は SR の増大ともなって低下して、SR と \bar{T}_{sk} との間に負の有意な相関関係が認められた。この時の T_{re} はいずれにおいても 37.3°C であった。また共分散分析の結果、30°C の回帰式と 40°C の回帰式には高さにおいて有意差が認められた。

図 4 は両環境において安静時と運動中の $H-E$ の関係を示したものである。安静時の $H-E$ と運

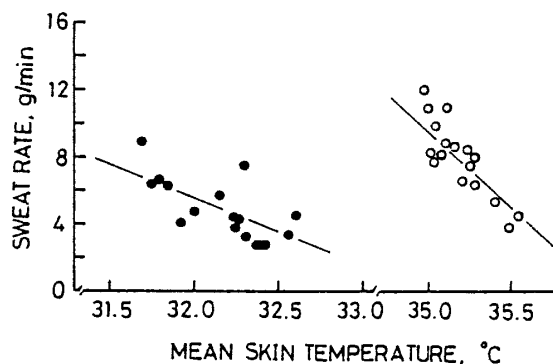


Fig. 3. Relationship between sweat rate and mean skin temperature during exercise in different ambient temperatures, 30°C (●) and 40°C (○).

The regression equations and the correlation coefficients (r) describing these relationships in the 30°C and 40°C are:

$$30^\circ\text{C } Y = -4.06X + 135.53, r = -0.655 \\ (p < 0.01)$$

$$40^\circ\text{C } Y = -11.00X + 395.59, r = -0.784 \\ (p < 0.01)$$

$$30^\circ\text{C vs. } 40^\circ\text{C}, p < 0.01.$$

動時のそれを線で結んであらわした。 H は安静および運動中とも温熱条件による差異は認められなかった。しかし E は 30°C より 40°C において

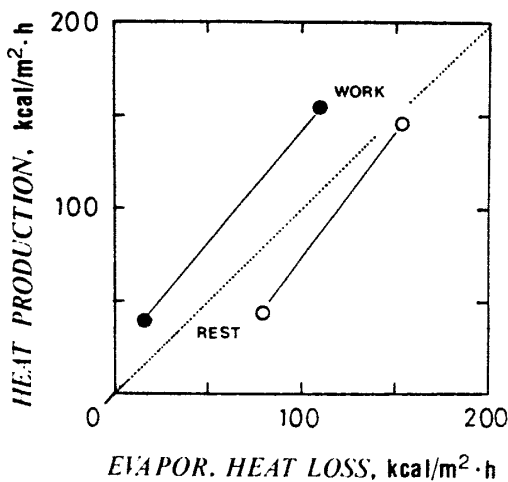


Fig. 4. Relationship between heat production and evaporative heat loss during rest and work at 30°C (●) and 40°C (○).

安静および運動のいずれにおいても著しく増大した。安静時と運動時の $H-E$ の関係は 40°C では著しく右偏した。

IV. 考 察

Saltin et al.¹⁵⁾ は、環境温 30°C (相対湿度, 40%) において各被験者の $\dot{V}O_2\max$ のおおよそ 25, 50 および 75% の作業負荷による自転車エルゴメーター運動中の発汗反応を bed balance を用いて連続測定している。彼等の観察では作業強度に比例して発汗曲線の勾配が大きくなっているようである。しかし彼等は環境温 30°C 以上の温熱条件下では測定しなかった。

本実験では作業強度は $\dot{V}O_2\max$ の約 40% の負荷であったが、実験時の環境温度条件として 30°C と 40°C (rh, 45%) を企画した。40°C における作業では 30°C に比して作業開始とともに発汗速度の増大が容易に認められる。このように高温環境における筋作業開始直後の発汗反応の促進は、深部体温が変動をきたす以前に生じることから、筋肉運動に付随する何等かの上行性情報によって引き起こされた神経性反射のあらわれであろうと推測されている¹¹⁾²¹⁾。

我々の観察した運動時発汗促進反応について、現象的には作業負荷を一定に保って環境温を 30°C から 40°C に 10°C 上昇させた場合と先の Saltin et al.¹⁵⁾ のように 30°C の環境下で、作業強度を $\dot{V}O_2\max$ の 50% から 75% へ 25% 増強し

た時の両者の発汗曲線の勾配は、きわめて類似しているようである。しかしながら、作業負荷を増強した時の反応と温熱負荷を増大させた場合の反応では、筋作業時の生体内で生じる体温調節駆動機構における作用の相違性が推察される。運動時には筋作業開始と同時に局所における代謝亢進が賦活され、熱産生が促進する。その結果、主働筋温の著明な上昇は直腸温の上昇に先行して起こる¹¹⁾¹⁴⁾。このように作業開始直後の筋温の上昇経過と発汗応答の様態とはきわめてよく相関することから、Robinson¹²⁾ は筋肉内あるいは静脈周囲神経叢に温受容器の存在を推測している。この点については入来⁵⁾ も筋内温受容器の存在の可能性を示唆している。

一方、発汗速度と皮膚温あるいは深部体温との関連についてはこれまで多数の成績が報告されている。Robinson et al.¹¹⁾ の研究では、15, 25, 35 および 40°C におけるトレッドミル作業中に 35°C の環境下では発汗速度の増大にしたがって皮膚温は漸次的に低下しているが、他の温度条件下では、作業開始直後に急速に低下をきたし、作業中そのまま各環境に応じたレベルに維持されている。Saltin et al.¹⁴⁾ は 20°C の環境で 50% $\dot{V}O_2\max$ の自転車エルゴメーター運動中おおよそ 2°C の皮膚温低下を認めている。しかし Saltin & Hermansen¹³⁾ によれば 20°C において 60 分間の自転車エルゴメーター運動時にはほとんど皮膚温が変化しなかった。いずれにおいても深部体温の上昇は発汗速度に相関していた。筋作業に伴う産熱量の増大によって皮膚温がどのように影響されるかという問題は興味深い課題である¹⁷⁾。しかし運動時の皮膚温はかならずしも一定した変化を示したとはいいがたい。このことは、運動による筋および皮膚血流量の変化と外気温、湿度および気流などの環境因子が密接に関連しあっているためであろう。

本研究では無効発汗をできるだけ除去するために実験中被験者は背部後方より微風を受けた。このことも関連して T_a 40°C における作業中も被験者の体表面から汗滴が落下することなく大部分有効発汗量を得ることができた。このために皮膚温は漸次的に低下していったものと思われる。いずれの環境においても負の有意な相関関係が認め

られる(図3)。しかしながら皮膚温の絶対値は $T_a 40^\circ\text{C}$ において $T_a 30^\circ\text{C}$ より著明に高いが、皮膚温の低下度をみると両環境においてほぼ同程度であった(図2, 3)。また発汗速度とこの皮膚温の低下度の相関関係については別の機会に報告した²⁰⁾。 $T_a 30^\circ\text{C}$ と 40°C の回帰式から皮膚温 1°C の低下に対応する有効発汗量はそれぞれ 417 g/h と 744 g/h と推定される。これに対して運動時に分泌された汗の蒸発により算出した放熱量も 30°C より 40°C において著明に大であった(図4)。

更に著者らの運動時体温調節反応の季節的特性を追求する実験成績¹⁸⁾¹⁹⁾においても発汗量が各季節によって大小異なるにもかかわらず、皮膚温の低下は四季を通じてほぼ 1°C であった。これらのことは運動時の皮膚温低下は蒸発による熱放散によってのみ規定されないことを示唆している。この点について Nakayama et al.⁷⁾ や Ohnuki & Nakayama¹⁰⁾ は、運動時の皮膚温の動態を観察し、その時の皮膚温の変動は、従来の運動時皮膚温の変化と趣を異にして、作業強度に比例してその低下度が大きかったことを報告している。皮膚温の低下について彼等は、筋作業に伴なって持続的皮膚血管の収縮によって皮膚血流の低下をきたし熱放散を抑制するであろうと推測し、その結果、運動時の深部体温が上昇すると予測している。

また Nielsen, M.⁸⁾ は、筋作業時の深部体温の上昇について、作業に伴なって産熱量が放熱量をうわまわることによって体温が上昇することを示唆している。これらのことは、運動時の体温調節機構も産熱系—放熱系の両機能の平衡関係によって規定されることを意味している。

我々の企画した実験では、運動開始初期にはほとんど深部体温を上昇させるにいたらなかった。このことは熱産生の増大や暑熱負荷もともなって放熱機構が促進的に作動したものと思われる。

Cabanac¹⁾ は運動時の体温調節機能と循環機能とはよく相関すると指摘している。また Saltin & Hermansen¹³⁾ は $\dot{V}O_2\text{max}$ が非常に異なる被験者に3種類の作業強度を負荷した時の深部体温の上昇を $\dot{V}O_2\text{max}$ の%に対してプロットすると、各被験者の $\dot{V}O_2\text{max}$ が大小異なるにもかかわらず、同様の上昇勾配を呈することを報告している。本実

験においても発汗速度の推移は心拍数の応答とよく一致している(図2)。

[本研究の一部は第37回日本体力医学会において発表した。]

(稿を終るにあたり、実験の企画、遂行にご協力下さった続修二氏、大村守也氏に、またデータ整理にご協力いただいた立山順一君に感謝いたします。)

(受付 昭和58年11月15日)

文 献

- 1) Cabanac, M. (1975) : Temperature regulation. *Ann. Rev. Physiol.*, **37**, 415-439.
- 2) Davies, C.T.M. (1979) : Influence of skin temperature on sweating and aerobic performance during severe work. *J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, **47**, 770-777.
- 3) Gagge, A. P., Winslow, C.-E. A. and Herrington, L.P. (1938) : The influence of clothing on the physiological reactions of the human body to various environmental temperatures. *Am. J. Physiol.*, **124**, 30-50.
- 4) Hardy, J. D. and DuBios, E. F. (1938) : The technic of measuring radiation and convection. *J. Nutr.*, **15**, 461-475.
- 5) 入来正躬 (1967) : 受容器, *臨床科学*, **3**, 1405-1416.
- 6) Nadel, E.R. (1979) : Control of sweating rate while exercising in the heat. *Med. Sci. Sports*, **11**, 31-35.
- 7) Nakayama, T., Ohnuki, Y. and Niwa, K. (1977) : Fall in skin temperature during exercise. *Jpn. J. Physiol.* **27**, 423-437.
- 8) Nielsen, M. (1938) : Die Regulation der Körpertemperatur bei Muskelarbeit. *Skand. Arch. Physiol.*, **79**, 193-230. [Nielsen, M. (1970) Heat production and body temperature during rest and work. In : J.D. Hardy et al., *Physiological and Behavioral Temperature Regulation*. 1st Ed., Chap. 14, C. C. Thomas, Springfield, 205-214. より引用]
- 9) Nielsen, B. (1969) : Thermoregulation in rest and exercise. *Acta Physiol. Scand.*, *Suppl.*, **323**, 1-74.
- 10) Ohnuki, Y. and Nakayama, T. (1982) : Fall

- in forearm skin temperature during grade walking on a treadmill. *Jpn. J. Physiol.*, **32**, 93-101.
- 11) Robinson, S., Meyer, F.R., Newton, J.L., Ts'ao, C.H. and Holgersen, L.O. (1965) : Relations between sweating, cutaneous blood flow, and body temperature in work. *J. Appl. Physiol.*, **20**, 575-582.
 - 12) Robinson, S. (1974) : Physiology of muscular exercise. In : Mountcastle, V., *Medical Physiology*, Vol. 2. 13th Ed., Chap. 55, Mosby, Saint Louis. 1273-1304.
 - 13) Saltin, B. and Hermansen, L. (1966) : Esophageal, rectal, and muscle temperature during exercise. *J. Appl. Physiol.*, **21**, 1757-1762.
 - 14) Saltin, B., Gagge, A.P. and Stolwijk, J.A.J. (1968) : Muscle temperature during sub-maximal exercise in man, *J. Appl. Physiol.*, **25**, 679-688.
 - 15) Saltin, B., Gagge, A.P. and Stolwijk, J.A.J. (1970) : Body temperatures and sweating during thermal transients caused by exercise. *J. Appl. Physiol.*, **28**, 318-327.
 - 16) 佐々木隆, 堀 哲郎 (1978) : スポーツと環境. 石河利寛, 松井秀治編 *スポーツ医学*, 杏林書院 pp. 111-129.
 - 17) 佐藤方彦, 勝浦哲夫 (1974) : 平均皮膚温. その算出式と産熱による影響, および, 心拍数と酸素摂取量よりの推定ノモグラムについて. *人類誌*, **83**, 1-17.
 - 18) 鳥井正史, 山崎昌廣, 続 修二, 佐々木隆 (1983) : 運動時の体温調節能の季節変動, 特に冬季の身体加温の影響について. *体質医研報*, **34**, 52-54.
 - 19) Torii, M., Yamasaki, M. and Sasaki, T. (1982) : Seasonal variation in thermal responses during exercise. *J. Physical Fitness Japan*, **31**, 454-455.
 - 20) Torii, M., Yamasaki, M., Tsuzuki, S. and Sasaki, T. (1983) : Whole body sweat rate during exercise in the heat environment. *J. Human Ergol.*, **12**, 99-102.
 - 21) Van Beaumont, W. and Bullard, R.W. (1963) : Sweating : its rapid response to muscular work. *Science*, **141**, 643-646.
 - 22) Wyndham, C.H. (1973) : The physiology of exercise under heat stress. *Ann. Rev. Physiol.*, **35**, 193-220.