

高齢者における運動時の発汗および皮膚血流量反応

大阪国際女子大学 井上芳光
(共同研究者) 大阪信愛女学院短大 上田博之

Regional Differences in Exercise-induced Sweating and Cutaneous Vascular Responses in Young and Older Men

by

Yoshimitsu Inoue

*Laboratory for Human Performance Research,
Osaka International University for Women*

Hiroyuki Ueda

Osaka shin-ai college

ABSTRACT

To examine the effect of work intensity on the regional distribution of sweating and cutaneous vasodilation in relation to aging, 9 young (20-25 yr) and 6 older (65-77 yr) men cycled at 35, 50, and 65 % of their maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2max}$) for 30 min in a controlled climate at 28 °C and 40 % rh. During the exercise, there was a significant increase in the heart rate (% HR) relative to the baseline value and rectal temperature (T_{re}) with increases of work intensity, regardless of group. There were no group differences in the % HR and T_{re} (except for the exercise at 35 % $\dot{V}O_{2max}$). The percentage in local sweating rate (\dot{m}_{sw}) at each site relative to the sum of \dot{m}_{sw} for all 5 sites (forehead, chest, back, forearm and thigh) increased significantly on the forehead and decreased on the thigh with increases of work intensity, regardless of the group. However, the percentage \dot{m}_{sw} on the thigh was significantly lower in the older men than in the young men for all work intensities, although the percentage

\dot{m}_{sw} on the forehead was similar in both groups (except for the exercise at 35 % $\dot{V}O_{2max}$). The lower percentage \dot{m}_{sw} on the thigh observed in the older men was due to a lower sweat output per gland and not to a lower active sweat gland density. In general, \dot{m}_{sw} was significantly lower in the older men, especially on the thigh. The percentage change in LDF (% LDF) relative to the baseline value increased significantly between the exercises at 35 and 50 % $\dot{V}O_{2max}$, but it did not change between 50 and 65 % $\dot{V}O_{2max}$, regardless of age and body site. There were no regional differences in the % LDF in the older men at any exercise intensity. On the other hand, in the young men the % LDF was significantly greater on the forearm than on the forehead and chest in the exercises at 35 and 50 % $\dot{V}O_{2max}$, and was significantly greater on the forearm and chest than on the forehead at 65 % $\dot{V}O_{2max}$. The older men had a significantly lower % LDF at every work intensity, regardless of body site. These results suggest that there are regional differences in the magnitude of the increase in sweating and cutaneous vasodilation with increasing work intensity in both young and older men. Furthermore, aging affects the magnitude.

要 旨

本研究では、運動強度の増大に伴う発汗・皮膚血流反応の身体部位差の変化に老化の影響がみられるか否か明らかにするために、9名の若年成人男性（20-25歳）と6名の高齢者男性（65-77歳）に対し、最大酸素摂取量（ $\dot{V}O_{2max}$ ）の35、50、65%に相当する自転車運動を日を変えて30分間負荷した。運動終了時の心拍数（HR）と直腸温（ T_{re} ）は、両群とも運動強度の増大に比例して増加した。50%と65% $\dot{V}O_{2max}$ 時の T_{re} およびすべての運動強度時における安静値に対するHRの増加率には、いずれも有意な年齢群差は認められなかった。前額・胸・背・前腕・大腿の局所発汗量（ \dot{m}_{sw} ）は、両群のいずれの部位でも運動強度の増大に伴い有意に増加した。5部位の \dot{m}_{sw} の合計値に対する各部位の \dot{m}_{sw} の比率は、両群とも運動強度の増大に伴って前額が有意に大きくなり、大腿が有意に小さくなった。この比率は、前額では年齢差がみられなかったが、大腿ではいずれの運動強度時も高齢者が有意に小さかった。この年齢

差は、高齢者の大腿で単一汗腺あたりの汗出力（SGO）が増加しなかったことに起因した。 \dot{m}_{sw} は、年齢群差のみられなかった部位も存在したが、いずれの運動強度の場合も高齢者が有意に低かった。 \dot{m}_{sw} に観察された年齢群差が、とくに大腿で顕著だった。高齢者でみられた低い \dot{m}_{sw} は、活動汗腺数の低下ではなく、SGOの低下に起因した。安静時に対する変化率で示された運動時の皮膚血流量（% LDF）は、前額・胸・前腕でも35% $\dot{V}O_{2max}$ 運動から50% $\dot{V}O_{2max}$ 運動で有意に増加したが、50%と65% $\dot{V}O_{2max}$ 間には有意な変化はみられなかった。% LDFは、若年成人では35%と50% $\dot{V}O_{2max}$ で前腕が前額と胸より、65% $\dot{V}O_{2max}$ で前腕と胸が前額より、有意に大きかったが、高齢者ではいずれの強度時でも有意な部位差を認めなかった。% LDFは、いずれの部位でも高齢者が若年成人より有意に低かった。これらの結果は、運動強度の増大に伴う発汗・皮膚血管拡張の変化には部位差が存在し、老化がこの部位差に影響することを示唆する。

緒言

これまで我々は、暑熱刺激に対する熱放散反応には老化に伴う身体部位特性が存在することを明らかにしてきた。すなわち、熱放散反応からみた老化特性は、皮膚血流量→汗腺出力→活動汗腺数と順次低下し、この一連の加齢的低下は下肢→躯幹後面→躯幹前面→頭部と進行することを横断的・縦断的データから想定している¹⁻⁴⁾。運動時における皮膚血流量および発汗量の調節は、非温熱性要因（温熱以外の刺激で皮膚血流量や発汗量に影響する因子）の関与により暑熱下安静時と異なることが知られている⁵⁾。もし、非温熱性要因の関与度が老化に伴い変化するならば、暑熱暴露実験で観察された高齢者の発汗や皮膚血管調節の身体部位特性が、各種運動強度時に異なることも考えられる。

ヒトの発汗量には部位差が存在し、その部位差の程度は刺激の強さで変化することが知られている。Kimura et al.⁶⁾は、異なる運動強度において身体多部位の局所発汗量を測定し、運動強度の増大に伴いその増加度は四肢部で大きくなり、その結果身体部位差が小さくなることを報告している。近年、Takano et al.⁷⁾やKondo et al.⁸⁾は、運動強度の増大に伴う発汗量の増加が前額部でとくに顕著であることを報告している。一方、皮膚血流量については、測定方法上の問題から測定部位が身体末梢部（腕など）に限られており、これまで運動強度に伴う皮膚血流反応の部位差を論じた報告は、ほとんどみあたらない⁸⁾。いずれにしても運動強度の増大に伴う部位の発汗・皮膚血流量反応の変化を老化の観点から検討した例はない。

そこで本研究では、若年成人と高齢者に最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) の35%、50%、65%に設定した自転車運動をそれぞれ異なる日に実施させ、各負荷強度における身体多部位の発汗・皮膚血流反応および運動強度の増大に伴うそれらの変化を両群間で比較検討した。

1. 方法

1.1 被験者の身体的特性

被験者は、表1に示す身体的特性を有する健康な9名の男子大学生（20-25歳）と6名の高齢者男性（65-77歳）であった。若年成人はいずれの被験者も高校時代まで学校体育以外のスポーツ活動に参加していた比較的活発な者であった。高齢者は退職者でジョギング、早朝登山などの運動習慣を有する活発な者であった。各被験者には事前に実験の目的、条件および測定内容等を説明し、実験参加の承諾を得た。

1.2 実験条件および手順

各被験者は、 $\dot{V}O_{2max}$ の35%、50%、65%強度に相当する30分間の自転車運動を異なる日に実施した。すなわち、被験者はショートパンツのみ着用し、28℃の環境温度、40%の相対湿度に設定した人工気象室の中で少なくとも40分間椅座安静を保持し、その間に各測定装置を装着された。その後、各被験者に上記強度の自転車運動を50rpmで負荷した。

すべての実験は、夏季（8月上旬～9月上旬）に実施した。同一被験者の実験は、同一時間帯および少なくとも隔日おきに計画した。

1.3 測定項目

本実験に先立つ別の日に自転車エルゴメーター

表1 Subject characteristics

	n	Age (yr)	Ht (cm)	Mass (kg)	$A_D/mass$ ($cm^2 \cdot kg^{-1}$)	MSF (mm)	$\dot{V}O_{2max}$ ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$)
Young	9	23 ± 1	172 ± 1	67 ± 2	279 ± 6	9 ± 1	49 ± 2
Older	6	70 ± 2*	163 ± 3*	56 ± 3*	261 ± 3*	10 ± 2	39 ± 2*

Values are means ± SEM. * $P < 0.05$ from young men. $A_D/mass$, surface area-to-mass ratio; MSF, mean values of skinfolds thickness at 7 sites (chest, abdomen, back, flank, triceps, forearm and thigh); $\dot{V}O_{2max}$, estimated maximal oxygen uptake

による漸増運動負荷で $\dot{V}O_{2max}$ を推定し、その値に基づき各被験者の運動実験における相対的運動強度(35, 50, 65% $\dot{V}O_{2max}$)を設定した。また、各被験者の7部位(胸, 肩甲骨直下, 腹, 脇腹, 上腕, 前腕, 大腿)の皮下脂肪厚を栄研式キャリパーで測定し、それらの平均値を算出した。さらに、標準的方法で、各被験者の身長および体重(5g感度)を測定し、体表面積を算出した。

運動実験において、直腸温(T_{re})、局所皮膚温、局所発汗量(\dot{m}_{sw})、皮膚血流量(LDF)、活動汗腺数(ASG)、心拍数(HR)を測定した。

T_{re} は直腸温用サーミスターセンサーを肛門より10cm挿入し、皮膚温は前額(T_1)、胸(T_2)、背(T_3)、前腕(T_4)、大腿(T_5)の5部位にセンサーを貼付し、それぞれ1分毎に測定した。平均皮膚温(\bar{T}_{sk})は、次式で算出した：

$$\bar{T}_{sk} = 0.07 T_1 + 0.18 T_2 + 0.17 T_3 + 0.20 T_4 + 0.38 T_5$$

\dot{m}_{sw} は、前額、胸、背、前腕、大腿、手掌でカプセル換気法により測定した。LDFは、前額、胸、前腕の3部位にレーザー・ドップラー血流計のプローブを各2個ずつ貼付して測定した。なお、各部位2点で測定されたLDFは、両者の平均値をその部位のLDFとした。さらに、運動時における各部位のLDFは、運動開始前の安静時LDFに対する変化率で示された(%LDF: 運動時LDF ÷ 安静時LDF × 100)。 \dot{m}_{sw} とLDFのデータは1秒毎にコンピュータで集録し、1分間の平均値で示された。

ASGはヨウ素澱粉反応を用い、各発汗カプセルに隣接する部位で運動開始後25-30分目に測定した。さらに、その間の各部位における \dot{m}_{sw} を対応する部位のASGで除し、単一汗腺あたりの汗出力(SGO)を算出した。全身の発汗調節を把握するため、5部位で測定した \dot{m}_{sw} 、ASG、SGOの平均値も算出した。HRの測定には胸部双極誘導を用いた。

1. 4 統計処理

すべてのデータは平均値±標準誤差で示された。被験者の身体的特性、運動開始直前および終了直前の T_{re} 、 \bar{T}_{sk} 、HR、運動終了直前の \dot{m}_{sw} 、ASG、SGO、%LDFは、一元の分散分析で統計処理された。有意水準は5%とした。

2. 結果

身長、体重、体表面積/質量、推定 $\dot{V}O_{2max}$ は、高齢者が若年成人より有意に低かったが、皮下脂肪厚には有意な年齢群差はみられなかった(表1)。本実験ではいずれの被験者にも3段階の同一相対的強度が用いられたが、高齢者の $\dot{V}O_{2max}$ が小さかったため、運動時の絶対的強度はいずれの場合も高齢者が有意に小さかった(35% $\dot{V}O_{2max}$: 0.88 ± 0.05 vs 1.24 ± 0.06 $W \cdot kg^{-1}$, 50% $\dot{V}O_{2max}$: 1.34 ± 0.06 vs 1.86 ± 0.07 $W \cdot kg^{-1}$, 65% $\dot{V}O_{2max}$: 1.78 ± 0.10 vs 2.47 ± 0.09 $W \cdot kg^{-1}$, $P < 0.01$)。なお、絶対的強度は、高齢者の50% $\dot{V}O_{2max}$ vs 若年成人の35% $\dot{V}O_{2max}$ 、高齢者の65% $\dot{V}O_{2max}$ vs 若年成人の50% $\dot{V}O_{2max}$ 、においてほぼ同等だった。

表2は、高齢者および若年成人における安静時および運動終了時のHR、 T_{re} 、 \bar{T}_{sk} を運動強度別に示す。安静時のHR、 T_{re} 、 \bar{T}_{sk} は、いずれの運動強度時でも各群内でほぼ同等だったため、表の安静値は3回の実験時の平均値を示した。安静時のHRは高齢者が有意に低かったが、 T_{re} と \bar{T}_{sk} には有意な年齢群差はみられなかった。運動終了時のHRと T_{re} は、両群とも運動強度の増大に比例して有意に増加した。 \bar{T}_{sk} では、若年成人が運動強度の増大に伴い増加傾向を示したが、逆に高齢者では35% $\dot{V}O_{2max}$ から50% $\dot{V}O_{2max}$ で有意に低下した。終了時のHRと \bar{T}_{sk} はすべての運動強度の場合で高齢者が有意に低かったが、50%と65% $\dot{V}O_{2max}$ 時の T_{re} には有意な年齢群差はみられなかった。なお、安静値に対する各運動強度時の

表2 Valuables of young and older men at the end of 30-min exercise at 35, 50 and 65 % $\dot{V}O_{2max}$

	Rest	35 % $\dot{V}O_{2max}$	50 % $\dot{V}O_{2max}$	65 % $\dot{V}O_{2max}$
HR, $bt \cdot min^{-1}$				
Young	75 ± 1	100 ± 3	125 ± 3	155 ± 4
Older	62 ± 2 *	86 ± 4 *	102 ± 3 *	129 ± 3 *
T_{re} , °C				
Young	37.09 ± 0.07	37.43 ± 0.08	37.56 ± 0.05	37.80 ± 0.08
Older	37.14 ± 0.10	37.14 ± 0.11 *	37.40 ± 0.10	37.72 ± 0.08
\bar{T}_{sk} , °C				
Young	34.20 ± 0.14	33.91 ± 0.21	34.40 ± 0.18	34.70 ± 0.17
Older	33.77 ± 0.16	33.18 ± 0.17 *	32.75 ± 0.18 *	32.75 ± 0.19 *

Values are means ± SEM. * $P < 0.05$ from young men. HR, heart rate; T_{re} , rectal temperature; \bar{T}_{sk} , mean skin temperature

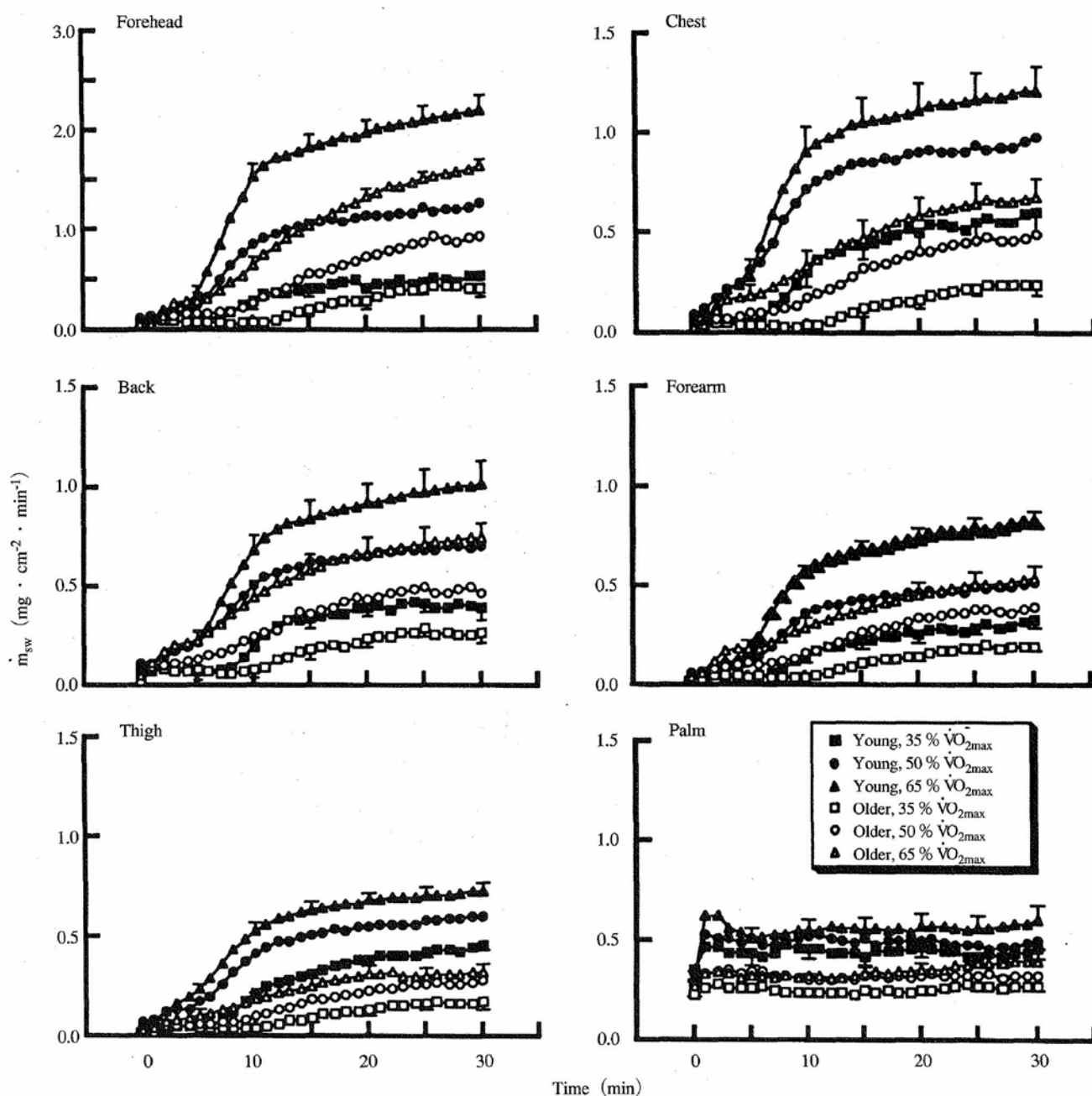


図1 Changes in the local sweating rate (\dot{m}_{sw}) on the forehead, chest, back, forearm, thigh and palm in the young and older men during exercise at 35, 50 and 65 % of the maximal O_2 uptake ($\dot{V}O_{2max}$). Values are means and SEM

HR 増加率および年齢から推定した最高心拍数に対する HR の変化率は、いずれの場合も両群ほぼ同等だった。

図 1 は、高齢者と若年成人における身体 6 部位で測定した \dot{m}_{sw} の経時変化を運動強度別に示す。高齢者および若年成人ともに、いずれの運動強度時においても手掌の \dot{m}_{sw} は運動開始直後に急増し、その値を運動終了まで保持したのに対し、他の 5 部位の \dot{m}_{sw} はある潜時をもって急増し、その後定常もしくは緩やかな増加を示した。手掌を除く 5 部位における終了直前 \dot{m}_{sw} の 50% に達する時間は、高齢者が遅延する傾向だった。その傾向はとくに大腿で顕著だった (35% $\dot{V}O_{2max}$: 13.6 ± 0.7 vs 10.4 ± 0.5 分, 50% $\dot{V}O_{2max}$: 11.8 ± 1.0 vs 7.5 ± 0.5 分, 65% $\dot{V}O_{2max}$: 9.6 ± 1.4 vs 6.9 ± 0.2 分, $P < 0.05$)。手掌の \dot{m}_{sw} は、いずれの運動強度時でも 30 分間の平均値では高齢者が有意に低かった (35% $\dot{V}O_{2max}$: 0.267 ± 0.015 vs 0.446 ± 0.045 $mg \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$, 50% $\dot{V}O_{2max}$: 0.324 ± 0.029 vs 0.498 ± 0.059 $mg \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$, 65% $\dot{V}O_{2max}$: 0.335 ± 0.032 vs 0.564 ± 0.053 $mg \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$; $P < 0.05$)。

表 3 は、身体 5 部位から求めた \dot{m}_{sw} , ASG, SOG の平均値を示す。平均 \dot{m}_{sw} および平均 SGO は、両群とも運動強度の増大に伴い有意に増加した。しかし、平均 ASG は 35% から 50% $\dot{V}O_{2max}$ 運動時で有意に増加したものの、50% から 65%

$\dot{V}O_{2max}$ 運動時では変化しなかった。平均 ASG にはいずれの運動強度時でも有意な年齢群差はみられなかったが、平均 \dot{m}_{sw} および平均 SGO は高齢者が有意に低かった。

図 2 は、高齢者および若年成人の運動終了前 5 分間における身体 5 部位の \dot{m}_{sw} , ASG, SGO をそれぞれ運動強度別に示す。 \dot{m}_{sw} は、両群のいずれの部位でも運動強度の増大に伴い有意に増加した。しかし、その増加の程度は部位により異なったため、運動強度の増大に伴い身体部位差が異なった。すなわち若年成人の \dot{m}_{sw} は、35% $\dot{V}O_{2max}$ 運動時では胸が前腕より、50% $\dot{V}O_{2max}$ 運動時では前額が前腕と大腿より、65% $\dot{V}O_{2max}$ 運動時では前額が他のすべての部位より、さらに胸が大腿より、いずれも有意に高かった。高齢者においても、35% $\dot{V}O_{2max}$ 運動時では前額が前腕と大腿より、50% と 65% $\dot{V}O_{2max}$ 運動時では前額が他のすべての部位より、さらに 65% $\dot{V}O_{2max}$ では胸と背が大腿より、いずれも有意に高かった。5 部位の \dot{m}_{sw} の合計値に対する各部位の \dot{m}_{sw} の比率は、両群とも運動強度の増大に伴って前額が大きくなり (高齢者: 30% $\dot{V}O_{2max}$; $32.2 \pm 3.5\%$, 50% $\dot{V}O_{2max}$; $35.2 \pm 3.8\%$, 65% $\dot{V}O_{2max}$; $41.9 \pm 3.2\%$, 若年成人: $22.4 \pm 3.3\%$, $29.8 \pm 3.1\%$, $36.7 \pm 1.8\%$)、大腿が小さくなった (高齢者: 30% $\dot{V}O_{2max}$; $13.8 \pm 2.9\%$, 50% $\dot{V}O_{2max}$; $10.8 \pm 1.4\%$, 65% $\dot{V}O_{2max}$; $8.7 \pm 0.8\%$, 若年成

表 3 Mean values of local sweating rate (Mean \dot{m}_{sw}), activated sweat gland density (Mean ASG) and sweat output per gland (Mean SGO) for five body sites for 5 min before the end of each 30-min exercise

	35% $\dot{V}O_{2max}$	50% $\dot{V}O_{2max}$	65% $\dot{V}O_{2max}$
Mean, \dot{m}_{sw} , $mg \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$			
Young	0.430 ± 0.028	$0.774 \pm 0.063^*$	$1.150 \pm 0.064^{*,\&}$
Older	0.256 ± 0.030^Y	$0.489 \pm 0.033^{*,Y}$	$0.739 \pm 0.050^{*,\&,Y}$
Mean ASG, glands $\cdot cm^{-2}$			
Young	85 ± 4	$109 \pm 6^*$	$115 \pm 5^*$
Older	91 ± 8	$118 \pm 6^*$	$124 \pm 4^*$
Mean SGO, $\mu g, gland^{-1} \cdot min^{-1}$			
Young	5.80 ± 0.62	$7.97 \pm 0.60^*$	$10.48 \pm 0.62^{*,\&}$
Older	3.01 ± 0.27^Y	$4.27 \pm 0.33^{*,Y}$	$5.90 \pm 0.51^{*,\&,Y}$

人：20.4 ± 1.9 %，16.5 ± 1.5 %，12.5 ± 0.8 %）。この大腿の比率は，高齢者が有意に小さかった。 \dot{m}_{sw} は，35 % $\dot{V}O_{2max}$ 運動時の前額，50 % $\dot{V}O_{2max}$ 運動時の前額と前腕，65 % $\dot{V}O_{2max}$ 運動時の背で有意な年齢群差がみられなかったが，いずれの運動強度の場合も他の部位では高齢者が有意に低かった。高齢者の50 %と65 % $\dot{V}O_{2max}$ 運動時の \dot{m}_{sw} を絶対的運動強度がほぼ等しい若年成人の35 %と50 % $\dot{V}O_{2max}$ 運動時の \dot{m}_{sw} とそれぞれ比較すると，高齢者が大腿でのみ有意に低かった。

ASGは，高齢者の背が35 % $\dot{V}O_{2max}$ 時に有意に高かったものの，いずれの運動強度時のいずれの部位においても有意な年齢群差はみられなかった。またいずれの運動強度においても，両年齢群とも前額のASGが他の部位より有意に高かった。ASGは，若年成人において前額・背・前腕では35 %から50 % $\dot{V}O_{2max}$ 運動時で増加したものの，50 %から65 % $\dot{V}O_{2max}$ で有意な増加がみられなかった。同様の変化が高齢者の前額・前腕・大腿で認められた。若年成人の大腿，高齢者の胸・背のASGでは，運動強度の影響は認められなかった。

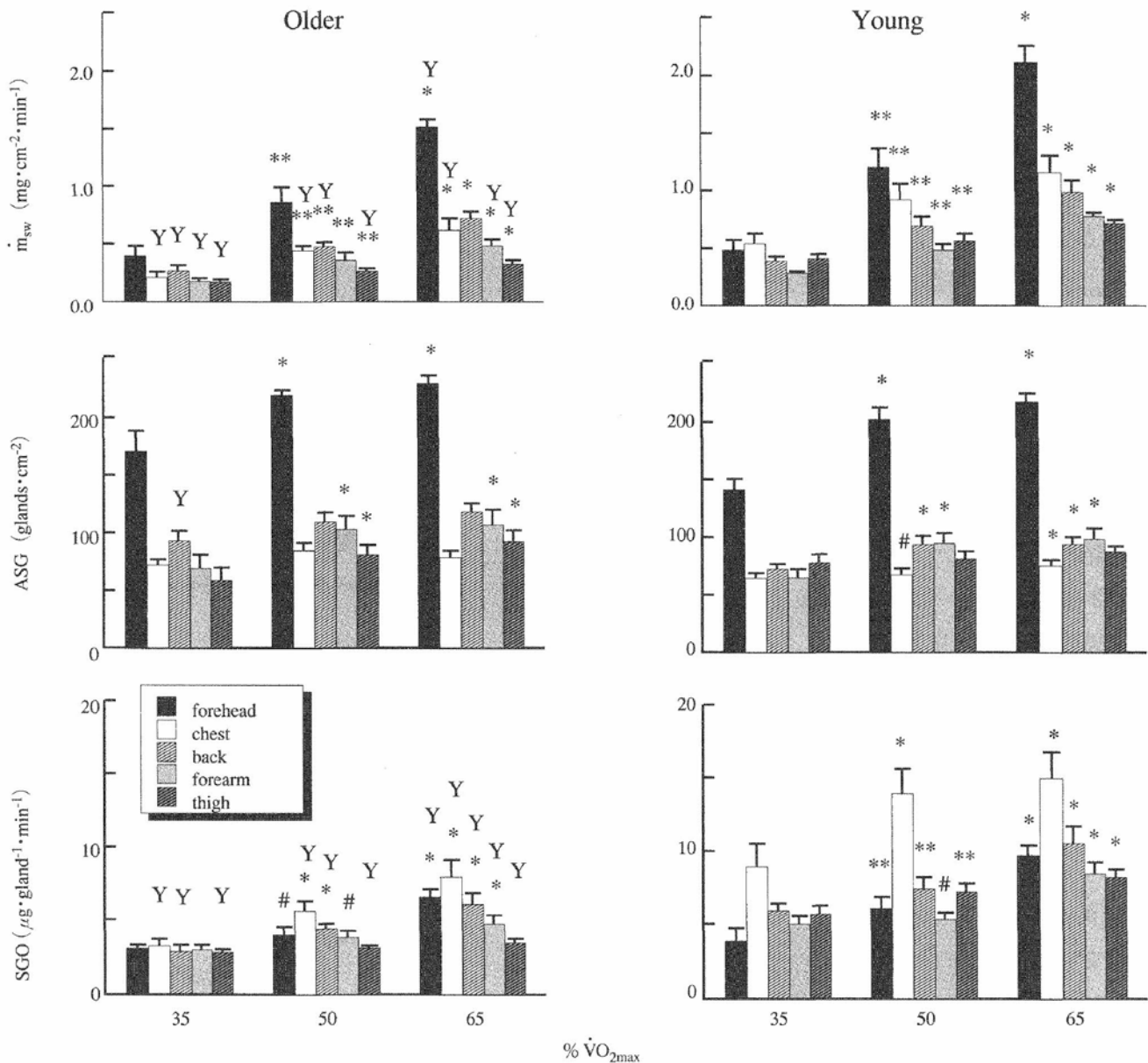


図2 Local sweating rate (\dot{m}_{sw}), the density of active sweat gland (ASG) and sweat output per gland (SGO) in the interval between 25 and 30 min after starting exercise at 35, 50 and 65 % of the maximal O_2 uptake ($\dot{V}O_{2max}$) in the young and older men. Values are means and SEM. * $P < 0.05$ from 35 % $\dot{V}O_{2max}$, ** $P < 0.05$ from 35 and 65 % $\dot{V}O_{2max}$, # $P < 0.05$ from 65 % $\dot{V}O_{2max}$, ^Y $P < 0.05$ from young men

若年成人の胸ASGでは50%から65%運動時のみ有意に増加した。

SGOは、若年成人の前額・背・大腿で運動強度の増大に伴い有意な増加がみられ、胸では35%から50% $\dot{V}O_{2max}$ 、前腕では50%から65% $\dot{V}O_{2max}$ でのみ有意に増加した。一方、高齢者は、胸・背では35%から50% $\dot{V}O_{2max}$ 、前額・前腕では50%から65% $\dot{V}O_{2max}$ でのみ有意に増加した。しかし、高齢者の大腿では運動強度の増加に伴う有意な変化はみられなかった。35% $\dot{V}O_{2max}$ の場合、SGOは、高齢者で有意な部位差がみられなかったが、若年成人では胸が前額より有意に大きかった。50%と65% $\dot{V}O_{2max}$ の場合、高齢者では胸が大腿より、若年成人では胸がすべての部位より、有意に大きかった。35%と50% $\dot{V}O_{2max}$ の前額と前腕で有意な年齢群差がみられなかったが、35%と50% $\dot{V}O_{2max}$ の他の3部位および65% $\dot{V}O_{2max}$ のすべての部位で高齢者が有意な低値を示した。絶対的運動強度がほぼ等しい高齢者の50% $\dot{V}O_{2max}$ vs 若年成人の35% $\dot{V}O_{2max}$ および高齢者の65% $\dot{V}O_{2max}$ vs 若年成人の50% $\dot{V}O_{2max}$ のSGOをそれぞれ比較すると、前者の比較の場合では大腿のみ、後者の比較の場合では胸・大腿で高齢者が有意に低かった。

図3は前額・胸・前腕における運動時の%LDFの経時変化を運動強度別に示す。%LDFは、いずれの部位においても運動開始後一定時間において増加するが、その増加は50%と65% $\dot{V}O_{2max}$ では発汗反応と同様に高齢者が緩慢な反応を示した。終了直前%LDFの50%に達する時間は、例えば前腕において、50% $\dot{V}O_{2max}$ では14.1 ± 1.9 vs 8.3 ± 0.4分、65% $\dot{V}O_{2max}$ では13.0 ± 2.2 vs 7.4 ± 0.4分だった ($P < 0.05$)。

図4は各部位における運動終了直前5分間の%LDFを運動強度別に示す。運動強度の増大に伴う%LDFの変化は、両群のいずれの部位でも50%、65% $\dot{V}O_{2max}$ が35% $\dot{V}O_{2max}$ より有意に高

かったが、高齢者の前額を除いて50%と65% $\dot{V}O_{2max}$ 間には有意な変化はみられなかった。高齢者の%LDFでは有意な部位差がいずれの強度でもみられなかったが、若年成人は35%と50% $\dot{V}O_{2max}$ で前腕が他の部位より、65% $\dot{V}O_{2max}$ では前腕と胸が前額よりそれぞれ有意に大きな値を示した。その%LDFは、35% $\dot{V}O_{2max}$ 時の胸と65% $\dot{V}O_{2max}$ 時の前額を除き、高齢者が若年成人より

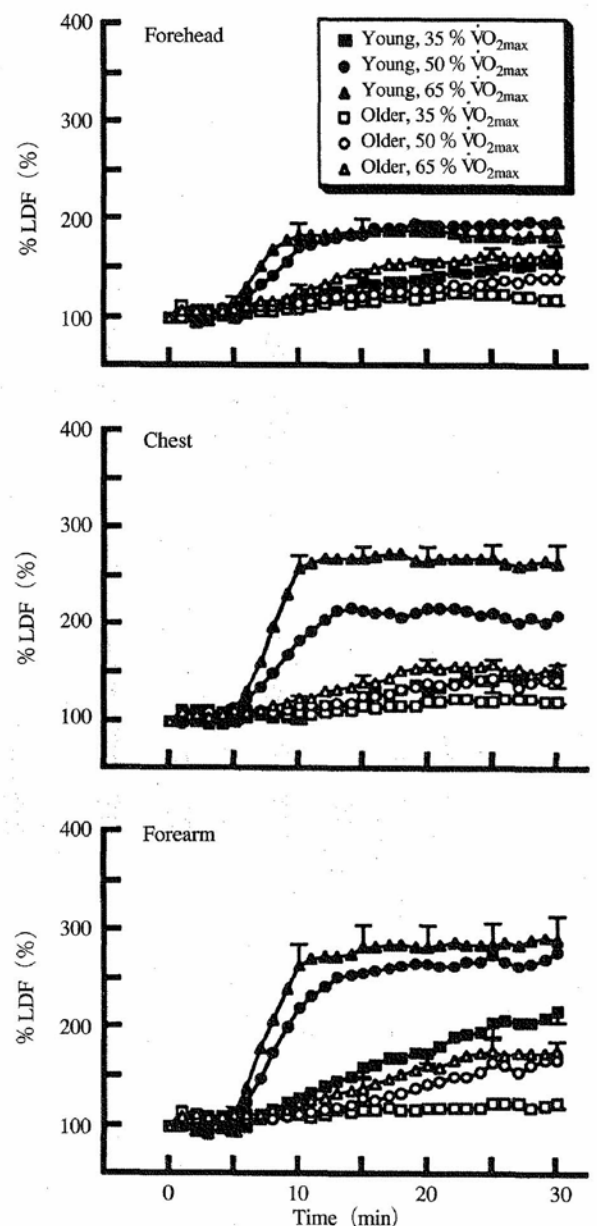


図3 Time-course of the percentage change in skin blood flow by laser Doppler flowmetry relative to the baseline value (%LDF) on the forehead, chest and forearm in the young and older men during exercise at 35, 50 and 65% of the maximal O_2 uptake ($\dot{V}O_{2max}$). Values are means and SEM

有意に低かった。高齢者の 65% $\dot{V}O_{2max}$ 時の % LDF と若年成人の 50% $\dot{V}O_{2max}$ 時の値を部位毎に比較しても、すべての部位で高齢者が有意に低かった。

3. 考 察

運動時の深部体温は、相対的運動強度に比例して直線的に増加することが知られている⁵⁾。本研究における運動終了時の T_{re} も、両群とも運動強度の増大に伴い上昇した。また、35% $\dot{V}O_{2max}$ 時では高齢者が若年成人より低い T_{re} を示したが、50% と 65% $\dot{V}O_{2max}$ では有意な年齢群差はみられなかった。HR ではいずれの運動強度の場合でも高齢者が有意に低かったが、安静値に対する HR の増加率および年齢から推定した最高心拍数に対

する HR の変化率は、両群ほぼ同等だった。これらの T_{re} と HR の結果に基づけば、今回の実験では運動時の酸素摂取量を測定しなかったものの、高齢者と若年成人にほぼ同等の相対的強度を負荷できたものと推定される。

\dot{m}_{sw} は、いずれの運動強度時も高齢者が低い値を示した。この低い \dot{m}_{sw} は、ASG ではなく低い SGO に起因した。低い SGO は大腿においてとくに顕著で、高齢者の 50% と 65% $\dot{V}O_{2max}$ 時の大腿 SGO を若年成人の 35% と 50% $\dot{V}O_{2max}$ 時の値と比較しても有意に低かった。この結果は、暑熱環境下での発汗反応は下肢から老化することを報告した結果¹⁻⁴⁾ を支持する。高い SGO を有する者は大きな汗腺サイズや高いコリン感受性を有することを報告した Sato and Sato の報告⁹⁾ に基づくと、加齢に伴う SGO の低下は汗腺それ自体（汗腺萎縮を意味する）and/or コリン感受性の加齢的变化に起因するものと推定される。

本研究において、全身の発汗調節を平均的に検討するために求めた平均 \dot{m}_{sw} は、いずれの群も運動強度の増大に比例して増加した（表 3）。35% から 50% $\dot{V}O_{2max}$ での平均 \dot{m}_{sw} の増加は、平均 ASG と平均 SOG の増加に起因したが、50% から 65% $\dot{V}O_{2max}$ では平均 ASG の増加ではなく、平均 SOG の増加に起因した。この結果は、少なくとも 50% $\dot{V}O_{2max}$ の運動強度以上では、若者のみならず高齢者でも発汗量の増加は SGO の増加に依存することを示し、若年成人を対象とした Kondo et al. の結果⁸⁾ と一致した。

運動強度の増大に伴う \dot{m}_{sw} の増加を部位別に検討すると、若年成人・高齢者とも前額部が他の部位より増加の程度が顕著に大きかった。この結果は、若者を対象とした Takano et al.⁷⁾ や Kondo et al.⁸⁾ の結果と一致した。この前額でみられた運動強度の増大に伴う \dot{m}_{sw} の増加は、SGO の大きな増加に起因した。また、いずれの群も運動強度の増大に伴い大腿 \dot{m}_{sw} の全身に対する比率が低下し

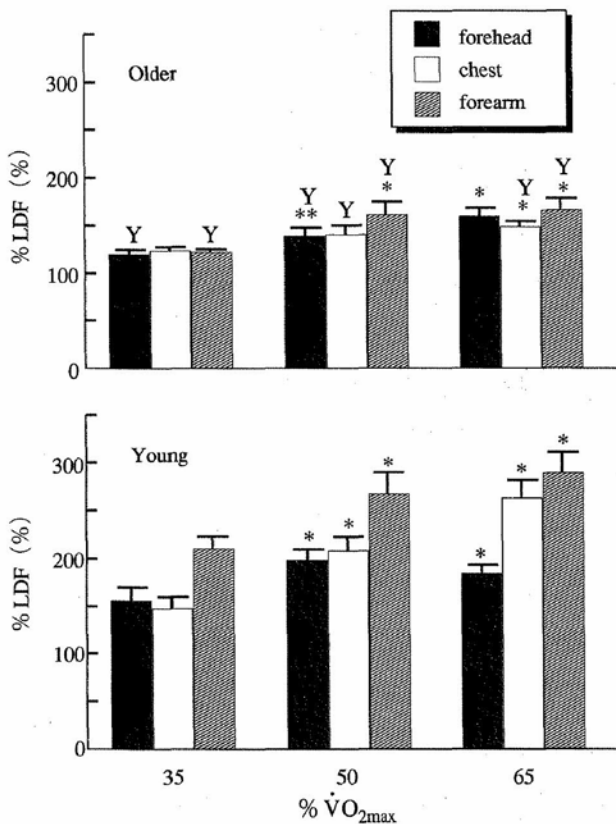


図 4 Percentage change in skin blood flow by laser Doppler flowmetry relative to the baseline value (% LDF) on the forehead, chest and forearm in the interval between 25 and 30 min after starting exercise at 35, 50 and 65% of the maximal O_2 uptake ($\dot{V}O_{2max}$) in the young and older men. Values are means and SEM. * $P < 0.05$ from 35% $\dot{V}O_{2max}$, ** $P < 0.05$ from 35 and 65% $\dot{V}O_{2max}$, Y $P < 0.05$ from young men

た。その低下は、高齢者が有意に大きかった。大腿で運動強度の増大に伴うSGOの変化が高齢者でみられなかったことに起因した。Kimura et al.⁶⁾は、異なる運動強度においてカプセル濾紙法を用いて身体14部位の局所発汗量を60分間測定し、運動強度の増大に伴いその増加度は四肢部で大きくなり、その結果身体部位差が小さくなることを報告している。彼らは重運動時において、発汗量の多い躯幹部で運動後半に発汗漸減が生じたことも付記している。本実験では、65% $\dot{V}O_{2max}$ 運動時の前額や躯幹部位でも発汗漸減は認められなかった。今回の結果とKimura et al.⁶⁾の結果の相違は、汗測定法の相違（カプセル換気法 vs カプセル濾紙法）や運動時間の相違（30分間 vs 60分間）による発汗漸減の有無に起因するように思える。

前述したように全身の平均値でみた場合、 \dot{m}_{sw} の増加は50% $\dot{V}O_{2max}$ 以上ではASGよりSGOの増加に依存することが本研究の高齢者でも認められた。この結果に基づけば、運動強度がさらに増大すると高齢者の大腿SGOが増加するのかもしれない。しかし、今回の実験で運動強度の増大に伴い顕著に増加することが認められた前額 \dot{m}_{sw} が高齢者において35%運動時ですでに他の部位より高かったこと、65%運動時に示された高齢者の大腿 \dot{m}_{sw} が多量発汗を観察した43℃下での35% $\dot{V}O_{2max}$ 運動時の高齢者大腿 \dot{m}_{sw} に匹敵したこと¹¹⁾を考え合わせると、大腿におけるSGOの大きな増加は期待できないと考えるのが妥当であろう。すなわち、高齢者の大腿は、老化による汗腺萎縮に起因し^{1, 3, 4)}、SGOを調節できないのかもしれない。

終了直前の \dot{m}_{sw} の50%に達する時間も、高齢者が遅延する傾向だった。その傾向はとくに大腿で顕著だった。Inoueら¹⁰⁾は、発汗中枢の活動を反映している発汗波頻度を用いて、暑熱暴露時に全身で観察された緩慢な反応が、発汗中枢の活動性の低下のためではなく、皮膚温度受容器の感受

性の低下 and/or コリン感受性の低下に起因することを推察している。コリン感受性の低下は大腿部においてとくに顕著であったこと¹¹⁾も考え合わせると、高齢者の緩慢な発汗反応は、主に皮膚温度受容器の感受性の低下に起因し、コリン感受性の低下がそれを修飾すると考えるのが妥当であろう。この推察は、終了直前の%LDFの50%に達する時間も高齢者が遅延した結果からも裏付けられる。

精神性発汗を示す手掌の \dot{m}_{sw} は、高齢者が若年成人より顕著に低かった。これまでの横断的研究で、温熱性発汗に関連する部位でのASGに年齢差をみとめた報告はないが、精神性発汗に関連する指先および手掌では老化の影響が認められている^{12, 13)}。我々は、温熱性発汗部位の横断的研究と高齢者の縦断的研究から、SGOの低下がまずおこり、その後にASGも低下することを報告している³⁾。これらの結果^{3, 12, 13)}に基づけば、高齢者の低い手掌 \dot{m}_{sw} は、多分SGOとASGの低下により生じたのだろう。そのメカニズムはいずれにしても、手掌における \dot{m}_{sw} の年齢差は、精神性発汗が老化に伴い低下することを示唆している。

安静時に対する変化率で示された運動時の%LDFにおいて、若年成人では35%と50% $\dot{V}O_{2max}$ で前腕が前額と胸より、65% $\dot{V}O_{2max}$ で前腕と胸が前額より有意に大きかったが、高齢者ではいずれの強度時でも有意な部位差を認めなかった。この相違は、若年成人において拡張度の大きかった前腕や胸で、老化に伴いその拡張度が低下したために生じた。この結果は、熱放散能の低下が下肢→躯幹後面→躯幹前面→頭部と進行することを報告した先行研究^{3, 4)}を支持する。皮膚血管拡張能の老化に伴う低下は、1) 皮膚血管が組織解剖学的に変化すること¹⁷⁾、2) 収縮神経のtoneの低下が小さいこと¹⁸⁾、3) 発汗神経由来の血管拡張物質に対する感受性が低いこと（または血管拡張物質量の低下）¹⁸⁾、に起因することが報告されてい

る。多分これらの要因が前腕や胸での高齢者運動時の% LDFを低下させたのだろう。

% LDFは、両群とも前額・胸・前腕でも35% $\dot{V}O_{2max}$ 運動から50% $\dot{V}O_{2max}$ 運動で有意に増加したが、50%と65% $\dot{V}O_{2max}$ 間では T_{re} の有意な上昇が認められたにも関わらず% LDFの有意な変化はみられなかった。これまで深部体温と皮膚血流量の関係における勾配は、深部体温が38℃以上になると緩やかになるbreaking pointが存在することが報告されている¹⁴⁾。今回の65% $\dot{V}O_{2max}$ 時でも T_{re} が若年成人で37.8℃、高齢者で37.7℃付近で、いずれの部位でもbreaking pointがみられた。このbreaking pointは、血管収縮神経の活動性が強くなるからではなく、血管拡張系の活動性の制限によることが報告されている^{15, 16)}。両群ほぼ同等の深部体温でbreaking pointがみられたことは、多分皮膚血管拡張性の制限の始まる深部体温には、老化の影響がみられないことを示唆しているのだろう。

以上の結果、運動強度の増大に伴う発汗・皮膚血管拡張の変化には部位差が存在し、この部位差が老化に影響されることが示唆された。

謝 辞

稿を終えるにあたり、本研究に対し助成いただいた(財)石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。実験に参加いただいた被験者のみなさん、データの収集・解析に協力いただいた高野聖司君(元神戸大学教育学部修士課程)、有効な論議に参加いただいた近藤徳彦先生(神戸大学)に深謝いたします。

文 献

1) Inoue Y, Nakao M, Araki T, Murakami H ; Regional differences in the sweating responses of older and younger men, *J. Appl. Physiol.*, 71, 2453-2459

(1991)

2) Inoue Y, Nakao M, Okudaira S, Ueda H, Araki T ; Seasonal variation in sweating responses of older and younger men, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 70, 6-12 (1995)

3) Inoue Y ; Longitudinal effects of age on heat-activated sweat gland density and output in healthy active older men, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 74, 72-77 (1996)

4) Inoue Y, Shibasaki M ; Regional differences in age-related decrements of the cutaneous vascular and sweating responses to passive heating, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 74, 78-84 (1996)

5) 平田耕造, 井上芳光 ; 運動と体温, 最新運動生理学(宮村実晴編) PP249-272, 真興交易医書出版部 (1996)

6) Kimura M, Araki T, Tohori J, Tsujita J, Hori S ; Correlation between intensity of work and sweating rate with special reference to patterns of local sweating distribution, *Proc. Int. Union. Physiol. Sci.*, 15, 497 (1983)

7) Takano S, Kondo N, Shibasaki M, Aoki K, Inoue Y, Iwata A ; The influence of work loads on regional differences in sweating rates, *Jpn. J. Physiol.*, 46, 183-186 (1996)

8) Kondo N, Takano S, Aoki K, Shibasaki M, Tominaga H, Inoue Y ; Regional differences in the effect of exercise intensity on thermoregulatory sweating and cutaneous vasodilation, *Acta. Physiol. Scand.*, 164, 71-78 (1998)

9) Sato K, Sato F ; Individual variations in structure and function of human eccrine sweat gland, *Am. J. Physiol.*, 245, R203-208 (1983)

10) Inoue Y, Shibasaki M, Ueda H, Ishizashi H ; Mechanisms underlying the age-related decrement in human sweating response, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 79, 121-126 (1999)

11) Inoue Y, Havenith G, Kenney WL, Loomis JL, Buskirk ER ; Exercise- and methylcholine-induced sweating responses in older and younger men: effect of heat acclimation and aerobic fitness, *Int. J. Biometeorol.*, 42, 210-216 (1999)

12) Catania JJ, Thompson LW, Michalewski HA, Bowman TE ; Comparisons of sweat gland counts, electrodermal activity, and habituation behavior in young and old groups of subjects, *Psychophysiology*, 17, 146-152 (1980)

- 13) Silver AF, Montagna W, Karacan I ; The effect of age on human eccrine sweating, In : *Advances in Biology of skin*. Vol. 6, Aging, PP129-150 (Montagna, W., ed) Pergamon, Oxford (1965)
- 14) Brengelmann GL, Johnson JM, Hermansen L, Rowell ; Altered control of skin blood flow during exercise at high internal temperature, *J. Appl. Physiol.*, **43**, 790-794 (1977)
- 15) Kenney WL, Tankersley CG, Newswanger DL, Puhl S ; α 1-adrenergic blockage does not alter control of skin blood flow during exercise, *Am. J. Physiol.*, **260**, H855-861 (1991)
- 16) Kellogg DL, Johnson JM, Kenney WL, Pergola PE, Koshiba WA ; Mechanisms of control of skin blood flow during prolonged exercise in humans, *Am. J. Physiol.*, **265**, H562-568 (1993)
- 17) 井上芳光 ; 最大皮膚血管コンダクタンスの発育・老化特性, *デサントスポーツ科学*, **19**, 254-260 (1998)
- 18) Inoue Y, Shibasaki M, Hirata K, Araki T ; Relationships between skin blood flow and sweating rate, and age related regional differences, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **79**, 17-23 (1998)