

直接カロリメータによる 運動中の手からの熱放散量

—— 熱放散量の変化からみたスポーツウェアの検討 ——

金 沢 大 学 平 田 耕 造

(共同研究者) 同 永 坂 鉄 夫

金沢女子短期大学 平 井 敦 夫

金 沢 経 済 大 学 平 下 政 美

金 沢 工 業 大 学 高 畑 俊 成

はじめに

筋活動に伴い体温が上昇する。末梢皮膚などへの血流の再分配と、それによる熱放散の高進が妨げられるような場合には、最高のパフォーマンスを得ることが困難であり、熱中症のようなスポーツ傷害も起こる可能性がある。

それらの原因を体温調節的側面から把握しておくことは、実際の体育指導者にとっても必要な条件であると考えられる。

運動時には、筋活動に伴う代謝の高進と熱産生量の増加が起こるが、これに伴い、皮膚などからの熱放散量も増加し、体温調節中枢の働きにより、運動中といえども熱的平衡が保たれている¹⁾。

手は皮膚の中でも重要な熱放散部位であると考えられる。全体表面積に対し5%を占めるにすぎないが、血流量の増加度が大きく、容積に対する表面積の割合が大きいなど、極めて熱放散に適した形態と機能を備えている。

手の組織を容積比で示すと、筋：15.5%、脂肪、骨、腱：54.3%、皮膚、皮下組織：30.2%

と、皮膚、皮下組織の占める割合が前腕部の13.4%に比べて極めて大きいことがわかる。皮膚血管系では動静脈吻合が多く、大量の血液を流すに適した構造をもっている。

現在まで、深部体温（直腸温、食道温など）や皮膚温の変化と皮膚血流量との相関を求めた研究^{7~10)}は比較的多いが、熱出納の面からこれを追究した研究^{1,5)}は多くない。

そこで、本研究では、手からの熱放散量 $H_L(R+C)$ を測定できる直接カロリメータ⁶⁾を用いて安静時および運動時の手からの $H_L(R+C)$ を定量化し、

実験 1. 手からの $H_L(R+C)$ と運動強度

実験 2. 手からの $H_L(R+C)$ と季節差

実験 3. 手からの $H_L(R+C)$ と被服条件

を観察することにより、手からの熱放散の重要性を検討した。

方 法

健康な男子4名を用いて、下記のように実験を行った。

被験者の身体的特徴は表1に示した。

表1 被験者の身体的特徴

	Age (yr)	Ht (cm)	Wt (kg)	$\dot{V}O_2$ max (l/min)
AH	28.4	169.0	65.0	2.36
MH	27.6	164.0	53.0	3.01
KH	28.5	171.0	65.0	3.15
TT	24.8	161.0	62.5	3.22
\bar{x}	27.4	166.3	61.4	2.93
SE	0.9	2.3	2.9	0.20

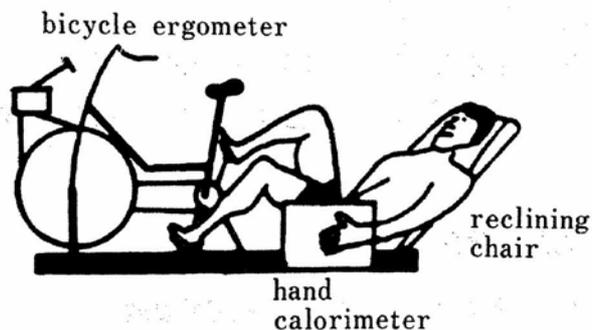


図1

被験者は、あらかじめ所定の環境条件（室温 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $50 \pm 10\%$ ）に設定された部屋に、測定開始1時間前に入室後、実験1, 2では、ランニングパンツのみ着用、実験3では、a) ランニングパンツ、b) ランニングパンツ + 手袋、c) トレーニングウェア上・下 + くつ下・ズック、d) トレーニングウェア上・下 + くつ下、ズック + 手袋を着用し、Monark社製自転車エルゴメータ後方に取り付けたリクライニングシートに座位姿勢を取り、安静を保った（図1）。

その間に被験者は、皮膚温 (T_{sk}) 測定用熱電対の貼付（全身8箇所）、食道温 (T_{es}) 測定素子の挿入、心電図用電極の貼付およびハンドカロリメータ内への左手の挿入固定を行った（図2）。

酸素消費量 ($\dot{V}O_2$) は 100l twin-type spirometer (フクダ医理化社製) による換気量 ($\dot{V}E$) と Beckman E₂ 型 O₂ 分析計による O₂ 分圧から、計算により求めた。

カロリメータで測定した手からの $H_L(R+C)$ がほぼ一定になってから、安静時の測定を行った。

その後、メトロノームに合わせ、毎分50回転で、あらかじめ負荷漸増法により求めた被験者の $\dot{V}O_2$ max の 20, 35, 45% に相当する負荷で、60分間の運動を行った。

T_{sk} は12打点式記録計（大倉電機社製）、 T_{es} 、 $H_L(R+C)$ は二素子平衡型記録計（理研電子社製）に連続記録し、心拍数は、5分ごとに心電図

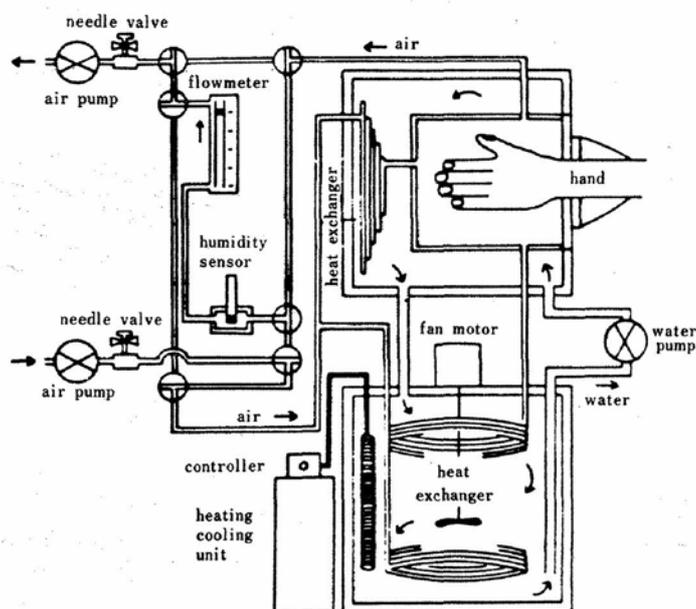


図2

を記録することにより求めた。

平均皮膚温 (\bar{T}_{sk}) は Folk (1974)²⁾ の式により, また手の平均皮膚温は平下ら (1980)⁵⁾ の式により求めた。

結果と考察

1. 手からの $H_L(R+C)$ と運動強度

図3に, 20, 35, 45% $\dot{V}O_2 \max$ に相当する負荷で, 60分間の自転車エルゴメータ運動を行ったときの $H_L(R+C)$, T_{es} の変化を示した。

運動開始後下降し, その後上昇する二相性の変化を示した。

はじめの下降度は, 運動強度が低いほど大きく, しかも長い時間下降した。その後の上昇は, 運動強度に比例して大きかった。しかし, $H_L(R+C)$ の 35% と 45% $\dot{V}O_2 \max$ には差がなかつ

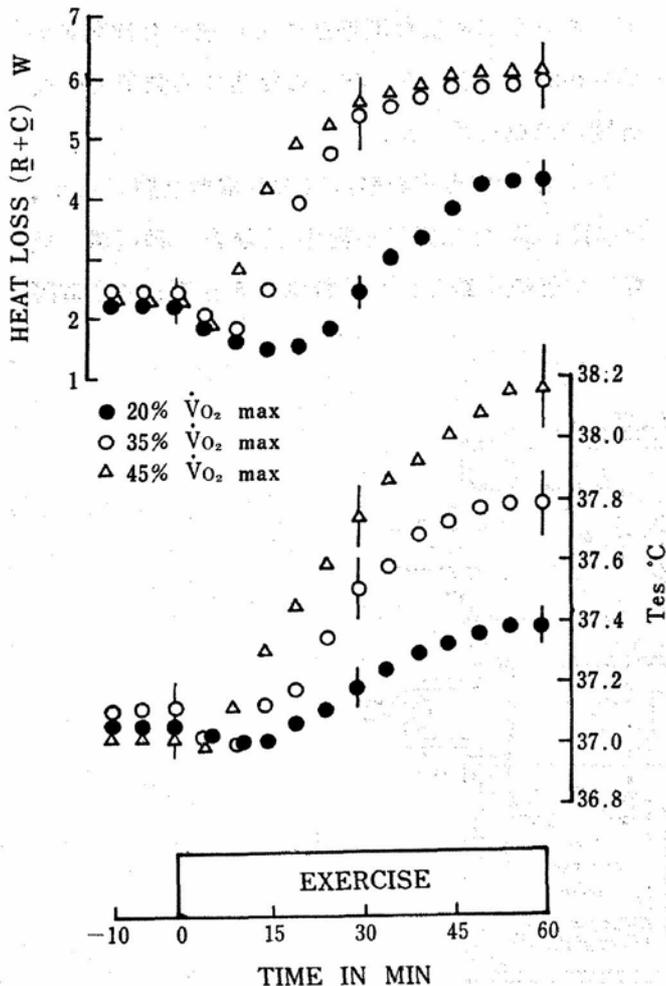


図3

た。

図4に, 35% $\dot{V}O_2 \max$ 運動時の被験者 TT, $H_L(R+C)$, HR, T_{es} , \bar{T}_{sk} , T_{sk} の変化を示した。

HR は5分目から定常状態を示し, 手掌・手背温は運動開始後急激に下降し, 手掌温は10分目から, 手背温は15分目から上昇に転じ, 30分目からはほぼ定常状態を示した。手からの $H_L(R+C)$ も運動開始後減少し, 10分目から増加に転じ, 30分目からはほぼ定常状態を示した。

図5は, 被験者 MH の20および35% $\dot{V}O_2 \max$ (実際には19.2および33.6% $\dot{V}O_2 \max$) で, 運動時の $H_L(R+C)$ と T_{es} の相関を示している。

回帰直線式は,

$$Y = 9.15X - 336.11 \quad (19.2\% \dot{V}O_2 \max)$$

$$Y = 4.09X - 149.15 \quad (33.6\% \dot{V}O_2 \max)$$

ただし, $Y = (R+C) ; W,$

$$X = T_{es} ; ^\circ C$$

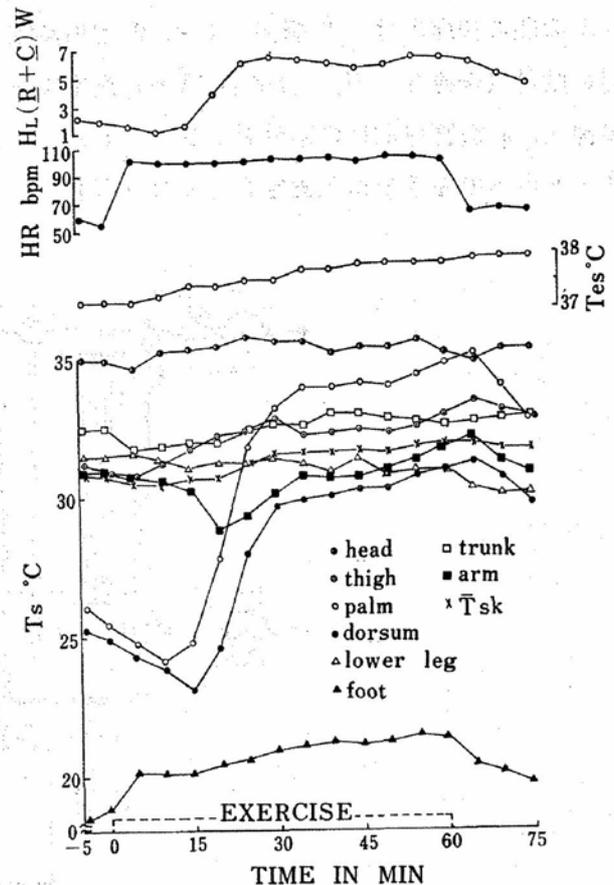


図4

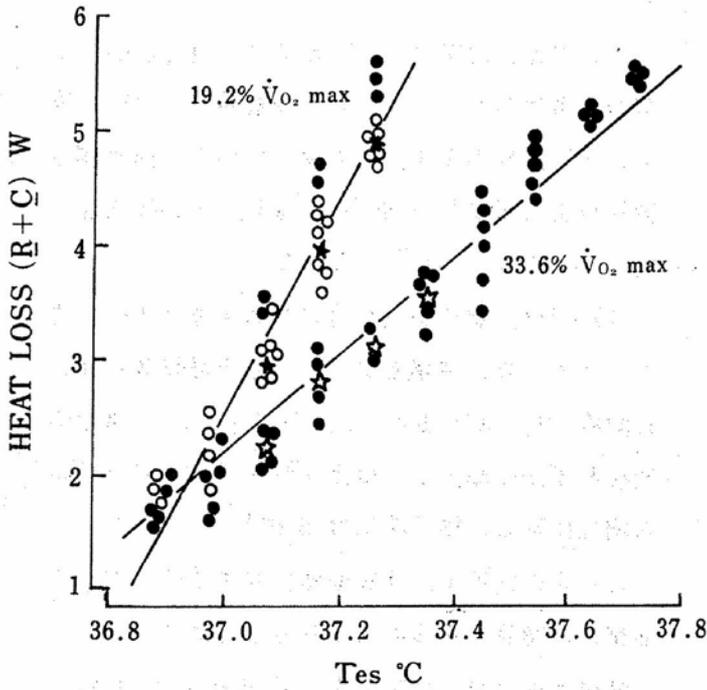


図5

で示す。

同様の方法で得た回帰式の傾斜を運動強度ごとにまとめると、表2のとおりである。

以上の結果から、 $H_L(\underline{R}+\underline{C})$ は T_{es} の上昇に比例して増加するが、運動強度が大きいほど、 $H_L(\underline{R}+\underline{C})$; T_{es} 関係の傾斜は緩くなる。つまり、同一 T_{es} の上昇に対する $H_L(\underline{R}+\underline{C})$ の増加度は、運動強度が高くなる程少ないことになる。

Forster ら³⁾によれば、手からの熱放散量は、血流量の変化との間に強い正の相関を示すことが報告されている。また、手の皮膚血管は交感神経性血管収縮線維の支配を受けており、血流量の増加は、血管収縮線維の発射頻度の減少により起こるといわれている⁴⁾。

図3、4は、運動により上昇した T_{es} に比例し

表2 運動強度と $H_L(\underline{R}+\underline{C})$: T_{es} 関係の Slope の変化

		Work load % $\dot{V}O_2$ max		
		20	35	45
Slope	\bar{x}	9.19	4.98	3.26
W/°C	SE	0.57	0.51	0.15

て手皮膚血管収縮線維の発射頻度が減少し、血管拡張により血流量の増加を起し、 $H_L(\underline{R}+\underline{C})$ の増加を示すが、運動強度に比例し非温熱性因子による血管収縮刺激が加算されるため、同一 T_{es} でも、運動強度が大きい程血流量の増加は少なくなるものと考えられる。

$H_L(\underline{R}+\underline{C})$: T_{es} の Slope (図5, 表2) は、非温熱性因子としての運動の影響を示すよい指標となり得るものと考えられる。

2. 手からの $H_L(\underline{R}+\underline{C})$ の季節差

図6は、夏期(6~8月)と冬期(1~2月)に、同一環境条件で20% $\dot{V}O_2$ max の運動を行ったときの $H_L(\underline{R}+\underline{C})$ の変化を示したものである。

夏期には運動開始後漸減し、30分目から増加に転じ、60分目には4.5Wに達したが、冬期には、運動中60分間、増加することなく減少を示した。

これは、体温調節中枢あるいは末梢血管の反応性の変化、もしくは内分泌系の変化によるものかも知れない。また、身体熱容量が異なるために起きたことなのか、今後さらに検討されなければならぬだろう。同一条件であっても、運動中身体からの熱放散量に季節差が認められるということは、被服条件を考慮するうえで重要な因子と考え

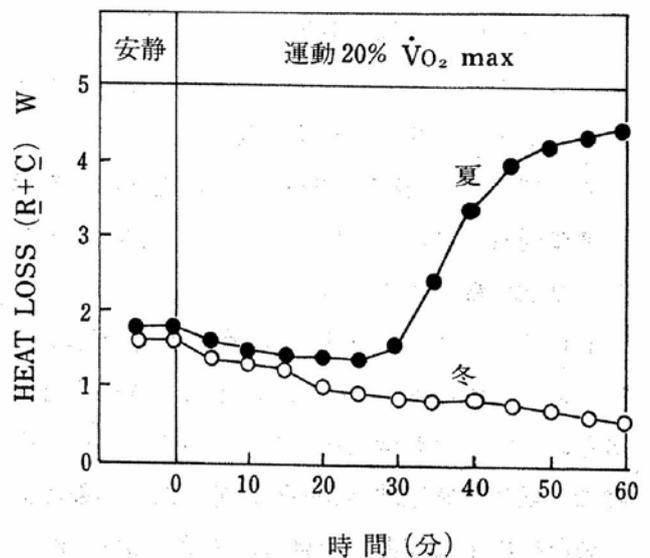


図6

られる。

3. 手からの $H_L(\underline{R}+\underline{C})$ と被服条件

身体からの熱放散量を規定する因子としての被服条件を変えて、20% $\dot{V}O_2 \text{ max}$ 運動時の手からの $H_L(\underline{R}+\underline{C})$ の変化を図7に示した。

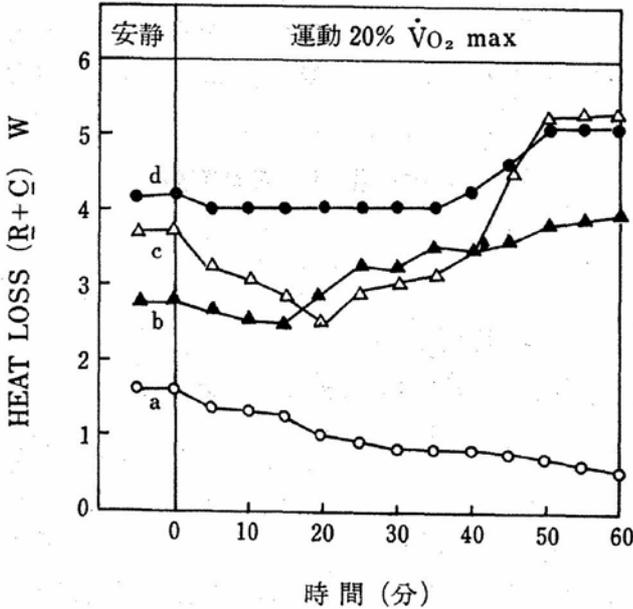


図7

<被服条件>

- a) ランニングパンツのみ着用……体表面積の約88%露出
- b) ランニングパンツ+手袋……約83%露出
- c) トレーニングウェア上・下+くつ下・ズック……約12%露出
- d) トレーニングウェア上・下+くつ下・ズック+手袋……約7%露出

a) では、安静時 1.55W の $H_L(\underline{R}+\underline{C})$ を示し運動開始後減少し続け、終了時 0.54W となり、増加に転ずることはなかった。

b) では、手袋を通して放散される $H_L(\underline{R}+\underline{C})$ は、安静時 2.82W と、素手のときの約1.8倍もあった。運動開始後15分まで減少し、その後増加に転じ、終了時 4.09W に達した。手袋により局所的に手皮膚温が上昇し、素手に比べ高い $H_L(\underline{R}+\underline{C})$ で平衡が保たれたものと考えられ

る。

c) では、素手にもかかわらず、身体の88%に被服を着けることにより、安静時 3.89W と高く、a) 条件の2.5倍にも達している。運動開始後20分まで減少し 2.50W となり、その後増加に転じ、終了時 5.29W となった。

d) では、頭部を残し他の身体部位はすべて覆うことにより、環境温 20°C でも安静時最も高い 4.37W で、a) 条件の2.8倍を示した。運動開始後わずかに減少し、ほぼ4Wを保ち、35分目から増加に転じ、終了時には 5.07W に達した。

これらの結果を、体表面積に対する手の占める面積との関係から検討してみることにする。

熱産生量に対し左手の占める面積比 (2.5%) に相当する熱放散量を100%として、各被服条件下の手からの $H_L(\underline{R}+\underline{C})$ の割合を示したものが図8である。

安静時では、a) 74%, b) 135%, c) 186%, d) 209%と、ランニングパンツのみ着用時だけは面積比相当以下の $H_L(\underline{R}+\underline{C})$ であったが、他の条件下では面積比相当以上の熱放散量を示し、トレーニングウェア上・下着用時は、面積比相当の約2倍もの熱を手から放散していることを示している。身体を被服で覆う割合が多くなる程、手からの $H_L(\underline{R}+\underline{C})$ は面積比以上に行われ、手からの熱放散の重要性が理解されるであろう。

運動時の体熱平衡がとれた55~60分目の $H_L(\underline{R}+\underline{C})$ は、a) 13%, b) 98%, c) 127%, d) 122%となり、a) のランニングパンツのみの裸体条件時が極めて少ないのは、運動強度が20%と軽く、熱産生量増加分が少ないうえに、ペダリングにより強制対流による熱放散が増加したため、手からの $H_L(\underline{R}+\underline{C})$ をさらに抑制し、体熱平衡を保つよう積極的に調節されたものと考えられる。

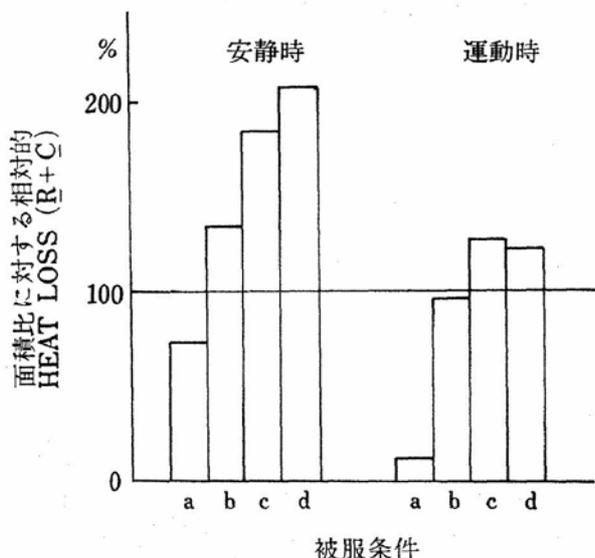


図 8

b), c), d) の 3 条件では, いずれも 100% に近く, 安静時ほど大きくはない. これは, 手の血流量増加が最大限となり, (R+C) による熱放散の上限を示すものかも知れない. それ以上の熱放散は汗などの蒸発による熱放散 $H_L(E)$ に依存しなければならないことを示唆するものである. これは, 安静時と運動時の手からの $H_L(R+C)$ の重要性と, その上限界を示すものと考えられる.

ま と め

1. 室温 $20 \pm 1^\circ C$, 湿度 $50 \pm 10\%$ の条件下で, 手からの $H_L(R+C)$ を安静時および運動時 (20, 35, 45% $\dot{V}O_2 \text{ max}$) 60 分間にわたり測定した.
2. 手からの $H_L(R+C)$ は T_{es} の上昇に比例して増加するが, $H_L(R+C) : T_{es}$ の Slope は, 運動強度が大なる程緩徐になった.
3. 同一条件下でも, 運動中の $H_L(R+C)$ の変化には, 季節による差が認められた.
4. 体表面積の 12% から 93% まで覆うように被服条件を変えると, 安静時, 運動時とも, 身体を覆う割合が多くなる程, 手からの $H_L(R+C)$ は面積比以上に増加し, 手からの熱放散の重要性増

大が認められた.

おわりに

今後さらに, 環境条件, 運動強度, 被服条件, 男女差, 女性の性周期による差, 日内差, 年齢差などの組合せにより, 手からの $H_L(R+C)$, $H_L(E)$, さらに全身の熱放散量の面から検討を加え, 体温調節能力を決定する基礎資料を提供したい.

文 献

- 1) Chappuis, P., P. Pittet, E. Jequier ; Heat storage regulation in exercise during thermal transients. *J. Appl. Physiol.*, **40** (3), 384—392 (1976)
- 2) Folk, E.G. Jr. ; Textbook of Environmental Physiology, 2nd ed., Lea and Fediger, Philadelphia, p. 405 (1974)
- 3) Forster, R.E. II, B.G. Ferris, Jr., R. Day ; The relationship between total heat exchange and blood flow in the hand at various ambient temperatures. *Am. J. Physiol.*, **146**, 600—609 (1946)
- 4) Gaskell, P.; Are there sympathetic vasodilator nerves to the vessels of the hand? *J. Physiol.* (London), **131**, 647—656 (1956)
- 5) 平下政美, 平田耕造, 平井敦夫, 蜂矢鉄心 ; 「運動時のハンドカロリメトリー」, 金沢経済大学論集, **14** (1), 33—46 (1980)
- 6) Nagasaka, T., Y. Sugano, K. Hirata ; Direct calorimeter for measuring heat loss from the rat and from the human hand. *J.J. Aerospace Environ. Med.*, **15**, 1—7 (1978)
- 7) Nakayama, T., Y. Ohnuki, K. Niwa ; Fall in skin temperature during exercise. *Jpn. J. Physiol.*, **27**, 423—437 (1977)
- 8) Ohnuki, Y., K. Niwa, T. Nakayama, T. Hirahara ; Skin temperatures during exercise with no sweating. *Jap. J. Biometeor.*, **16** (1), 36—41 (1979)
- 9) Roberts, M.F., C.B. Wenger ; Control of skin blood flow during exercise : thermal and non-thermal factors. *J. Appl. Physiol.*, **46** (4), 780—786 (1979)

