

人体よりの熱流束の測定*

中井誠一**・花輪啓一***・伊藤 孝**・井川正治****

寄本 明****・北 博正****・松岡脩吉***

(昭和 53 年 12 月 1 日受付)

Measurements of Direct Heat Flux from the Human Body

By Seiiti NAKAI, Keiiti HANAWA, Takashi ITO, Shoji IGAWA,
Akira YORIMOTO, Hiromasa KITA and Syukiti MATUOKA

An unique direct measuring instrument, heat flux transducer, was used to measure the heat flux from the body surface area and the value thus obtained were compared with calculated values of heat loss by convection and radiation from the body surface.

Heat flux transducers and thermister thermometers were placed on seven parts of the body surface, recording air temperatures. Mean heat flux (M.H.F.) was calculated by the equation:

$$\text{M.H.F.} = 0.14 \cdot \text{upper} + 0.05 \cdot \text{palm} + 0.07 \cdot \text{fore head} + 0.175 \cdot \text{chest} + 0.175 \cdot \text{back} + 0.19 \cdot \text{thigh} + 0.20 \cdot \text{calf}$$

Three healthy male subjects were given two tests for each in the wind-tunnel. In the first test, they were sitting one after another on a chair for 30 minutes each and then worked on the bicycle ergometer for 20 minutes, work intensity being kept at 600 kpm/min. and air velocity at 0.1 m/s. In the second test, after 30 min. rest (air velocity: 0.1 m/s), they worked for 20 min. on the bicycle ergometer (600 kpm/min.), air velocity being kept at 5.7 m/s.

Direct heat flux from each part of the body surface changed in accordance with changing ambient air temperature, and coefficient of correlation between M.H.F. and the ambient temperature was found significant at 0.1% level ($r = -0.994$, $n = 41$) at rest and also during exercise ($r = -0.805$, $n = 15$).

M.H.F. values were from 0.7 to 1.3 kcal/m/min. at 20.2~29.2°C during exercise.

Relationship between M.H.F. and calculated heat loss by convection and radiation showed highly significant, coefficient, of correlation being 0.937 ($n = 34$) at rest (exposure to 0.1 m/s air velocity) and 0.948 ($n = 27$) during exercise (including exposures to high air velocity).

Our results showed that the heat loss can be observed easily and quite accurately by the transducer attached to each part of the body because the value agrees quite well with the calculated value and the M.H.F. showed good response to changing air conditions (temperature and velocity).

1. はじめに

人体よりの熱放散は体熱平衡のための重要な要素の一つであり、特に身体運動時の熱放散は運動遂行成績を大きく左右することが知られて

いる^{1)~3)}。

従来、人体よりの熱放散や熱平衡に関する測定方法は、Calorimeter を用いる Hardy^{4)~8)}の方法や Winslow ら⁷⁾による分割熱量測定法

* 第 48 回日本衛生学会総会において発表した。

** 衛生学教室

*** 大学院健康学研究室

**** 大学院体力学研究室

(partitioned calorimetry)^{8,9)} などや、熱収支の基本式

$$M = \pm C \pm R + E + W \pm S$$

M : 産熱量, C : 人体表面からの対流, R : 輻射, E : 蒸発, W : 外的仕事量, S : 体温の増減による貯熱量から

$$C + R = M - W - S - E$$

として求める場合^{10)~15)} と産熱量と環境の奪熱率とから算出する方法^{1), 2), 16)~20)} とがある。

近年、特殊の熱電堆 (thermopile) を用いて直接熱流束 (heat flux) を測定する素子が開発され、この素子を用い玉置ら¹⁰⁾ は dry (対流と輻射) の熱流束の測定を行ない、熱収支式を用いる間接的方法によって求めた放熱量との検討を試みている。また Hody ら²¹⁾ および中山ら^{22, 23)} も、この素子を用い水中での人体の熱流束の測定を行なっている。

今回、著者らはこの素子を用いて、安静時及び運動時の体表面からの熱流束の測定を行ない、従来よりの環境の奪熱率からの放熱量の計算値との関係について検討し、とくに変化する種々の環境条件での放熱量の測定が可能なものか否かについても検討を加えた。

2. 方 法

1) 実験条件

対象: 大学生男子 3 名

着衣の条件: 運動用シートパンツ 1 枚の裸体。

実験は井川ら²⁴⁾ の自家製風洞 (壁体: 段ボール張りあわせ, 正面アクリル板, 風速 0~5.7 m/s, 気温 16~41°C, クーラー及びヒーターにより調節可能) 内で行なった。

各被検者とも 2 回の実験に参加した。

第 1 回は気流 0.1 m/s の条件で 30 分の安静と 20 分間の自転車エルゴメーター (monark 社製) の負荷運動 (600 kpm/min) である。

第 2 回は気流 0.1 m/s での 30 分の安静に引き続き、5.7 m/s の気流で 5 分間の安静と 20 分間の自転車エルゴメーターによる負荷運動 (600 kmp/min) である。

実験成績は安静時と運動時に分けて整理した。

2) 測定項目

熱流束, 体表面温, 室温, 心拍数である。

熱流束の測定: Heat Flux Transducer (Thermonetics 社製, Model H 12-18-5 P, 縦横 28 mm, 厚さ 1.5 mm) を人体 7 カ所, (1) 上腕 (2) 手の甲 (3) 前額 (4) 胸 (5) 背 (6) 大腿 (7) 下腿にサージカルテープで固定した。

各部位の熱流束は、250 mm 幅の平衡記録計 (理研電子 SP-5P) に記録された素子の出力 (mV) に素子それぞれの thermal constant (kcal/m²/min/mV) を乗じて算出した。

体表面温の測定: heat flux の測定と同じ部位にて、サーミスター温度計を用いて測定した。

平均皮膚温 (T_s) の測定: 7 カ所の体表面温から Hardy-Du Bois²⁵⁾ の式を一部次のごとく修正したものを用いて求めた。

$$T_s = 0.14 t (\text{上腕}) + 0.05 t (\text{手}) + 0.07 t (\text{前額}) \\ + 0.175 t (\text{胸}) + 0.175 t (\text{背}) + 0.19 t (\text{大腿}) \\ + 0.20 t (\text{下腿})$$

平均熱流束 (kcal/m²/min) の測定: 熱流束の各部位の値をもとに、平均皮膚温算出のための各部位の按分比を乗じ、体表面からの平均熱流束を算出した。

3) 放熱量の計算

平均皮膚温と環境の奪熱率からの放熱量, 対流 C , 蒸発 E , 輻射 R は次式⁹⁾ によりそれぞれ求めた。ここでは皮膚表面からの放熱だけを考え、呼気による放熱は算出しなかった。

$$C = 10.524 \sqrt{v} (T_s - T_A) \\ E = 10.117 v^{0.87} w \{E(T_s) - rh \cdot E(T_A)\} \\ R = 3.69 \{[(T_s + 273)/100]^4 - [(T_A + 273)/100]^4\} \\ (C, E, R \text{ の単位は Kcal/m}^2/\text{hr})$$

但し, v : 気流速度 (m/s), T_A : 気温 (°C), 周囲物体温 = T_A とした。), T_s : 平均皮膚温 (°C), $E(T_A)$ 及び $E(T_s)$: それぞれの温度での最大蒸気圧 (mmHg), rh : は小数での相対湿度, w : 湿潤面積率 (wetted area) である。

3. 結 果

図 1 は安静時及び運動時の手及び上腕の熱流

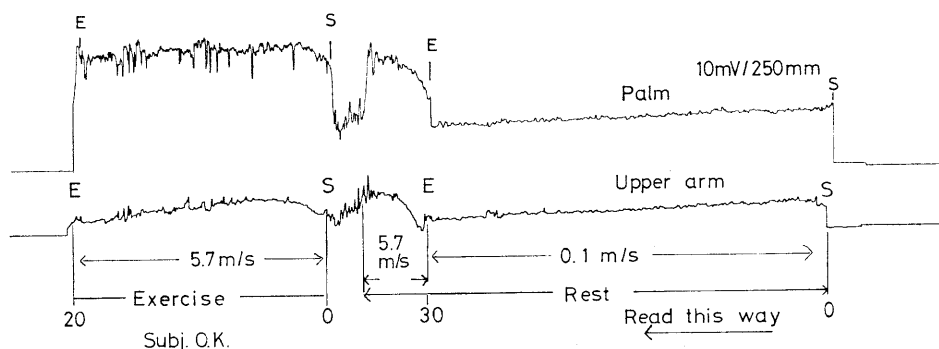


Fig. 1 安静時および運動時の熱流束(手の甲, 上腕)測定記録
Heat flux curves (palm, upper arm), the subject sitting at rest and during bicycle ergometer exercise (600 Kpm/min)

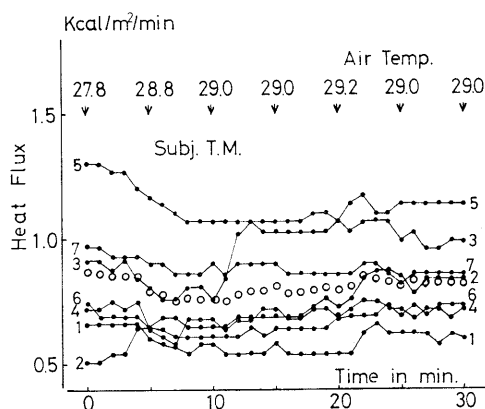


Fig. 2 安静時における身体各部位(1~7)の熱流束(○印は平均), 室温: 27.8~29.2°C
Heat flux from each part of the body surface at rest (ambient air temperature: 27.8~29.2°C)

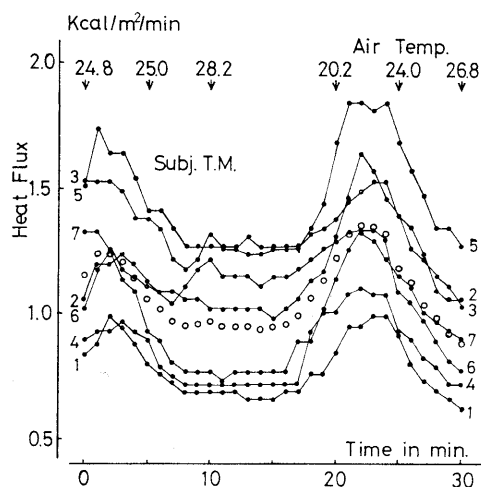


Fig. 3 安静時における身体各部位の熱流束(○印は平均), 室温: 20.2~28.2°C
Heat flux from each part of the body surface at rest (ambient air temperature: 20.2~28.2°C)

束の記録を示したものである。それぞれの部位について、1分ごとに出力を測定し、単位面積当りの熱量(kcal/m²/min)として求めた。

1. 安静時の熱流束

安静時の体表7部位の熱流束(代表的なもの)は図2, 図3に示した。図2は室温の変動が27.8°Cから29.2°Cで比較的小さい場合で、図3はその変動が20.2°Cから28.2°Cで大きいものである。部位により値は異なるが、室温の変化によく応答している。いずれの場合も前額(3), 背部(5)で大きな値を示している。図4

は人体表面からの平均熱流束を計算し、30分間の変動を示したものであり、室温の影響を強く反映しているが、今回の室温条件では(一定ではないが)、20.2°Cから29.2°Cの範囲で、0.7~1.3 kcal/m²/minの平均熱流束の移動があるものと考えられる。

室温の変動に対する反応を検討するために、平均熱流束と室温の相関をとったものが図5である。図のごとく相関係数は-0.994(n=41)であり、0.1%の危険率で有意と認められる。

熱流束の測定結果と計算による放熱量との関

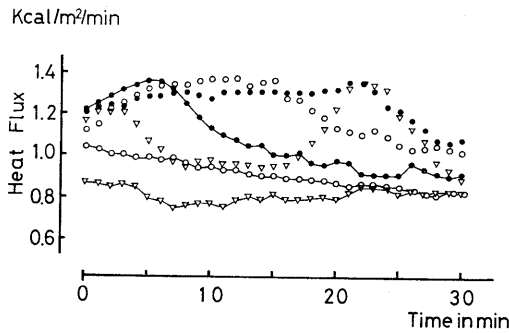


Fig. 4 安静時における体表よりの平均熱流束
室温: 20.2~29.2°C
Mean heat flux from the body surface during 30 minutes' rest.

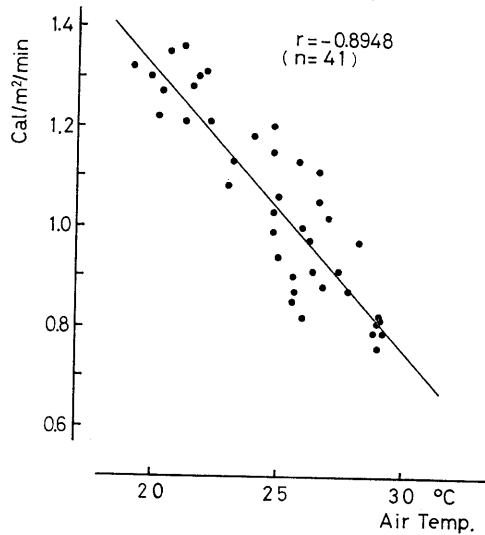


Fig. 5 平均熱流束と室温との関係
Relationship between mean heat flux (direct measurement) and ambient air temperature.

係は図 6 に示すごとくであり、計算による対流と輻射の放熱量が比較的大きい値を示しているが、相関 ($r=0.937$, $n=34$) は有意と認められる。

2) 運動時の熱流束

運動時の平均熱流束を示したものが図 7 であるが、2 種の気流の影響を大きく反映しており、また室温との相関 ($r=-0.804$, $n=15$) は有意と認められる。安静時と同様に計算による放熱

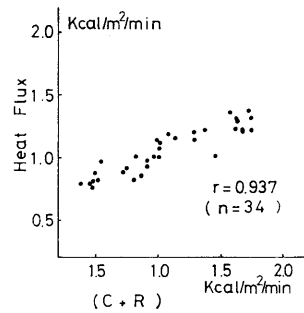


Fig. 6 直接測定による熱流束と計算による放熱量(対流, 輻射)の関係
Relationship between measured heat flux and calculated heat loss by convection and radiation.

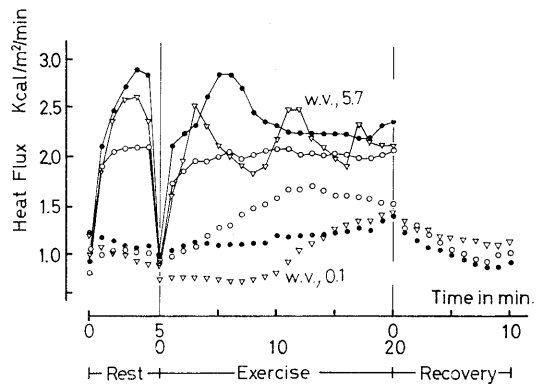


Fig. 7 気流 0.1 m/s と 5.7 m/s の条件での運動中の平均熱流束の変動
室温: 21.9~30.6°C

Mean heat flux from body surface during ergometer exercise, air velocity at 0.1 m/s and 5.7 m/s (ambient air temperature: 21.9 ~30.6°C)

量(対流, 輻射)との相関 ($r=0.948$, $n=27$) も有意と認められる(図 8)。また図中の ●印は気流が 0.1 m/s の時で、○印は気流 5.7 m/s の時に得られたものである。気流の大きさに比例し、放熱量も大きな値を示し、気流の大小に関係なく同一線上に並ぶことがわかる。

4. 考 察

安静時の体表よりの熱流束測定値は、気温及

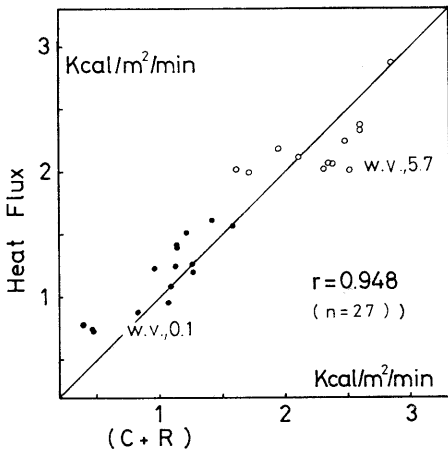


Fig. 8 運動時の直接測定による熱流束と計算による放熱量との関係(●印; 0.1 m/s, ○印; 5.7 m/s)
 Relationship between measured heat flux and calculated heat loss by convection and radiation.

び計算による放熱量との間に高い相関が得られた。これは計算による放熱は対流及び輻射によるものだけであるが、蒸発による放熱を加えても、安静状態で蒸発がきわめて小さいために、有意な相関が得られたものと考えられる。しかし素子を体表面に固定するため、蒸発による放熱は、この素子による測定値には含まれないものと考えられる。

玉置ら¹⁰⁾は同じ素子を用いた熱流束値と、対流、輻射による放熱と比較検討し、安静時には直接的に求めた放熱が大きくなるとしているが、著者らの成績では、安静時は計算による放熱が大きい傾向になり、運動時には直接測定による放熱と計算による放熱は等しい傾向がみられた。これは玉置ら¹⁰⁾は室温が一定(29°C)の条件で測定を行なっているのに対し、著者らは刻々変化する環境条件での測定であり、間接的な放熱量の算出方法も異なるためと考えられる。しかし、運動時における皮膚温等の変化する条件下においても計算値とよく一致することから、運動に伴い対流因子が増加しても、それをよく反映しているものと考えられる。これは運動時

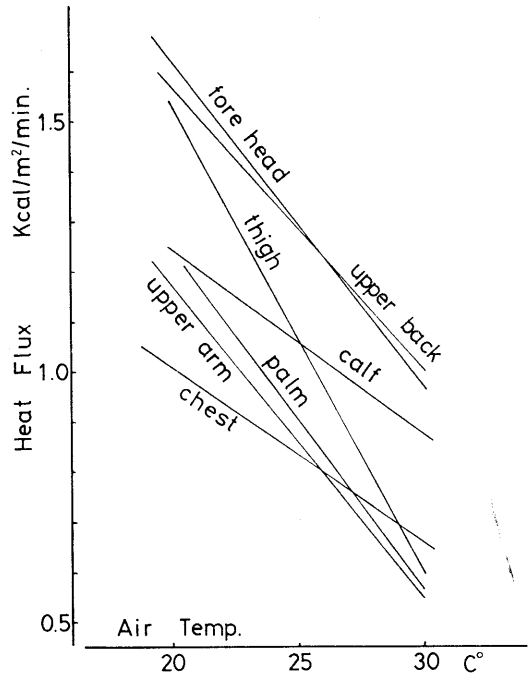


Fig. 9 安静時の身体各部位の熱流束と室温との関係
 Relationship between local heat flux and ambient air temperature.

に気流 (5.7 m/s) を加えた場合とくに明らかである。

また玉置ら¹⁰⁾は部位別の放熱量についても考察しており、頭部が単位面積当りでは大きいことを指摘しているが、著者らも同様の結果を得た。今回測定した各部位の放熱量と室温との回帰直線を求めたものが図9である。部位の放熱の大小をこの図から比較すると、頭部、背部で大きく、胸、上腕が小さい傾向がみられる。一定温度内の測定でないため、このような部位別放熱量を比較するには多少無理があるにせよ頭部で大きいのは玉置らの報告と一致する。しかし、われわれの実験では温度変化が大きいことから、運動時の熱流束の変化について論ずることは無理がある。上述の結果、温度変化と気流の変化に鋭敏に反応することは明らかであり、刻々変化する環境下での放熱量を観察するためには利用可能なものと考えられる。しかし個体

による放熱量の絶対比較に利用可能かどうかは、今回の実験だけでは結論づけられない。

5. ま と め

運動を安全に遂行させ、その成績を大きく左右する因子の中で、とくに体熱の放散についての情報を得るため、熱流束直接測定素子を用いて体表よりの熱流束を測定し、計算による放熱量を比較検討した。

(1) 安静時及び運動時とも室温と熱流束には高い相関が得られ、室温の変化によく応答する。

(2) 計算による放熱量と熱流束値との相関は安静時、運動時ともに有意である。

(3) とくに、運動時の計算値と直接測定値とはよく一致する。

(4) 運動時に気流の条件を加えても直接測定値と計算値の相関は高い。

(5) 身体部位別の熱流束の比較及び運動時の変化を検討するには、室温が一定条件下での実験が必要である。

(6) 室温変化への応答及び計算値ともよく一致することから、この素子を用い刻々変化する環境下での人体よりの熱放散量の観察が可能である。

尚、本研究に被検者としてご協力いただいた学生諸君に心より感謝する。本研究は一部昭和 52 年度文部省科学研究費一般研究 C258027 (代表者、北博正) によるものである。あわせて感謝の意を表する。

引用文献

- 1) 松岡脩吉: 走行ベストタイムの制限因子としての温度条件に関する検討, 体育学研究, X-2 169, 1965.
- 2) 河谷正光: マラソン競走に及ぼす環境温度の影響に就いて, 体力科学, 5 (2), 62-66, 1955.
- 3) 高橋進: 気温とマラソンの記録, 体育の科学, 19 (9), 1969.
- 4) Hardy, J. D.: The radiation of heat from the human body. I An instrument for measuring the radiation and surface temperature of the skin, *J. Clin. Invest.*, 13, 593, 1934.
- 5) Hardy, J. D. and E. F. DuBois: The technic of measuring radiation and convection, *J. Nutrition*, 15 (5), 1937.
- 6) Hardy, J. D. and G. F. Soderstrom: Heat loss from the nude body and peripheral blood flow at temperatures of 22°C to 35°C, *J. Nutrition*, 16 (5), 1938.
- 7) Winslow, C. E. A., Herrington L. P. and Gagge A. P.: A new method of partitioned calorimetry, *Am. J. Physiol.*, 116, 1936.
- 8) Winslow, C. E. A. and Herrington L. P.: Temperature and human life, Princeton University Press, 1949.
- 北博正, 竹村望訳, 温度と人間, 人間と技術社, 1974.
- 9) Chappuis, P., P. pittet and E. Jequier: Heat storage regulation in exercise during thermal transients, *J. Appl. Physiol.*, 40 (3), 1976.
- 10) 玉置陽子, 鶴谷昭雄, 中山昭雄, 丹羽健一: 皮膚熱流の部位差とその変動, 日生氣誌, 12, 13, 1976.
- 11) Shvarts, Esar, A. Magazanik and Zie Glik: Thermal responses during training in a temperature climate, *J. Appl. Physiol.*, 36 (5), 1974.
- 12) Winslow, C. E. A. and A. P. Gagge: Influence of physical work on physiological reactions to the thermal environment, *Am. J. Physiol.*, 134, 1941.
- 13) Haymes, E. M. E. R. Buskirk, J. L. Hodgson, H. M. Lundegren, and W. C. Nicholas: Heat tolerance of exercise lean and heavy prepubertal girls, *J. Appl. Physiol.*, 35(5), 1974.
- 14) Shvartz, Esar, Ezra Saar and Dan Benor: Physique and heat tolerance in hot-dry and hot-humid environments, *J. Appl. Physiol.*, 34 (6), 1973.
- 15) 丹羽健市, 中山昭雄: 高湿度環境における運動時の体温調節, 体力科学, 27 (1), 1978.
- 16) Matuoka, Sy.: A scale of Calorimetrically Equivalent Temperature, 13th International Congress on Occupational Health, 893-902, 1960 New Yourk.
- 17) Mitchell, Duncan, C. H. Wyndham, A. J. Vermeulen, T. Hodgson, A. R. Alkino and H. S. Hofmeyr: Radiant and convective heat transfer of nude men in dry air, *J. Appl. Physiol.*, 26 (1), 1969.
- 18) Wells, C. L. and Steven M. Horvath: Metabolic and thermoregulatory responses of women to exercise in two thermal environment, *Medicine and Science in Sports*, 6

- (1), 1974.
- 19) Maron, B. Michael, J. A. Wagner and S. M. Horvath: Thermoregulatory responses during competitive marathon running, *J. Appl. Physiol.*; *Respirat., Environ. Exercise, Physiol.*, **42** (6), 1977.
 - 20) Peterson, J. E.: Experimental evaluation of heat stress indices, *Am. Indust. Hyg. Ass. J.*, **31** (3), 1970.
 - 21) Hody, G. L. and J. J. Kacirk: Combiend skin temperature and direct heat flow measurement in a thermaly stressful environment, Aerospace Medical Association Annual Meeting, 1972.
 - 22) 中山英明, 土居純一, 川元茂男: 潜水中の熱損失について, 第30回日本体力医学会報告書, 1975.
 - 23) 中山英昭, 土居純一, 川元茂男: 潜水中の熱損失に関する研究(第2報), 第31回日本体力医学会報告書, 1976.
 - 24) 井川正治, 寄本明, 北博正: 種々の運動負荷時のガス代謝に及ぼす風の影響, 日生氣誌, **14**, 1974.
 - 25) Hardy, J. D. and E. F. DuBois: *J. Nuturi.* **15**. 461, 1938, Ramanathan N. L.: Anew weigiting system for mean surface temperature of the human body, *J. Physiol.*, **19** (3), 1964.