

太陽放射を伴った暑熱環境下における衣服の色の 温熱生理反応および運動持久能力に与える影響

奈良女子大学 加藤 雅子

(共同研究者) 同

登倉 尋実

Effects of Clothing Colour on Thermophysiological Responses and Endurance to Handgrip Exercise under Warm Conditions with Sun Radiation

by

Masako Kato, Hiromi Tokura

Department Environmental Health, Nara Women's University

ABSTRACT

The aims of our study were to examine some effects of clothing colours on thermophysiological responses and endurance of handgrip exercise under the warm conditions with the artificial and natural sun radiation. Black and white garments made of cotton were consisted of T-shirts with long sleeves and long trousers.

In the first experiment, 7 subjects volunteered and kept sitting for 1 hour in the chamber at 32°C with the artificial sun radiation. The main results were as follows; though rectal temperature was kept constant level between black and white garment during the experiment, skin temperature on foot, local sweat rates from forearms and mass loss were higher in the white garment. Clothing surface temperature was significantly higher level in the black.

In the second experiment, 1 subject sat for 1 hour under the outdoor conditions in summer in Nara. After then, handgrip exercise was performed until volitional exhaustion and the number of contractions was

counted. Major findings were that clothing surface temperature in the black increased higher than that in the first experiment and the number of contractions was greater in the black garment after 1 hour sitting in the sun.

This study presented that thermoregulatory effectors were activated more and the endurance to handgrip exercise was smaller in the white garment under the summer sun radiation.

要 旨

太陽放射を伴った暑熱環境において、衣服の色がヒトの温熱生理反応や局所的な運動持久力にどのような影響を与えるのかを検討した。実験では、同じ素材から成る白色と黒色の長袖・長ズボンを比較した。

実験1では人工太陽を伴って、環境温32℃に設定した人工気候室で、7名の被験者が1時間椅座安静を保った。温熱生理反応の測定の結果、深部体温である直腸温では2種類の衣服の間に有意な差は見られなかったものの、足背部皮膚温、体重減少量、局所発汗速度で白色の衣服が高いレベルを示した。逆に衣服表面温度では、黒色の衣服で高いレベルを示した。

実験2では実際の夏期屋外において、1名の被験者が1時間椅座安静を保った後、ハンドエルゴメータによる局所的な運動持久力を測定した。その結果、衣服表面温は実際の屋外環境の方がより黒色で高いレベルであること、運動持久力も黒色で高い数値を表わした。

以上の結果、衣服表面温度や布の色の日射に対する物理的性質などが起因して、夏期屋外での衣服の色がヒトの温熱生理反応や運動持久力に影響することがわかった。

緒 言

これまで、暑熱環境下における体温調節反応とそのための衣服の在り方についての研究が数多く

なされてきた。しかし、われわれが自然の暑熱環境を想定するとき、太陽からの熱放射を無視することはできない。実際に砂漠の日射量は最高1000 kcal・m⁻²h⁻¹にも上ることが明らかにされている⁹⁾ ことに加え、日本の暑熱炎天下での日射量は700kcal・m⁻²h⁻¹にも上る。そこで人間と環境との熱交換に焦点を当てた研究がなされ、こうした強い日射がヒトの体温調節反応や運動中の生理反応に及ぼすいくつかの影響について、これまで明らかにされてきた^{2, 13)}。Adolphは日陰と日向との体温調節反応を比較し、日向の蒸発性熱放散がより大きいことを明らかにした²⁾。またNielsenらは、環境が日向から日陰に移る際の運動中の熱平衡の変化について研究した¹³⁾。

一方、こうした強力な日射が存在する暑熱炎天下での運動や労働の際に、熱負荷を減らすための手段として、衣服は環境からの熱の侵入を遮断するための非常に重要な手段として考えられている¹⁾。そこで、炎天下での運動前と運動時におけるより快適な衣服について検討する必要がある。

中でも動物の毛皮や衣服の色は、太陽の放射に対する吸収および反射という面において、それを着る動物やヒトの熱平衡を左右する非常に大きな要因となる。砂漠など強度の太陽放射のある地域で生息する動物の毛皮の性質や、色とその生存についての研究が数多くなされた^{5, 7, 10)}。また衣服については、一般的に夏には白色のものが涼しく過ごせると考えられているが、世界のあらゆる民族の中には、たとえば砂漠に生活するアラブ人が

表1 実験に用いた衣服の太陽放射に関する物理的性質

T-shirts			
	Radiant reflectance (%) r	Radiant absorptance (%) a	Radiant penetration (%) p
Black	27.0	73.0	20.0
White	48.9	51.1	50.2

Trousers			
	Radiant reflectance (%) r	Radiant absorptance (%) a	Radiant penetration (%) p
Black	15.7	84.3	11.4
White	44.2	55.8	42.9

真っ黒なヴェールで男女問わず全身を覆い隠すように、あえて暑熱環境で黒色の衣服を身につける民族が見られる^{11, 12, 16)}。そうした事実は、宗教的な意味を持つにしろ、注目すべきことである。しかし、実際には、暑熱炎天下での衣服の色とヒトの体温調節反応や運動能力との関わりについての研究はまだなされていない。

そこで、本実験では屋外での運動前安静時の衣服の色が、日射を伴った暑熱環境下における温熱生理反応やその直後の運動持久力にどの程度影響するのか、またどのような影響を及ぼすのかについて一連の実験を行った。

1. 実験方法

1. 1 実験1

1. 1. 1 測定項目

深部体温として直腸温 (Takara Thermistor, Japan, $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$)、前額、胸部、背部、前腕部、手背部、大腿部、下腿部、足背部において皮膚温 8 カ所 (Takara Thermistor, Japan, $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$)、両前腕部で局所発汗速度 (Visala, HMP-35A) を 6 秒ごとに、体重減少量 (Sartorius, Germany, $\pm 1\text{g}$) を 5 分ごとに連続測定した。また、胸部 2 点において衣服表面温度を測定しこれらを平均した。

これらの測定値について、ANOVA によって比較検討した。

1. 1. 2 人工太陽

2 枚のパネルに太陽と同じ波長を持った 11 個のランプを取り付けた。日本の夏期屋外を想定した環境 ($700\text{kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) にするため、被験者の位置に黒球温度計を設置し、これによって放射強度を制御した。この人工太陽 ($2 \times 1.5\text{m}$) は被験者の前面 1.2m の位置に設置した。

1. 1. 3 実験に用いた衣服

ほぼ同じ物性値を保つように作成した、綿 100% の黒 (Black) と白 (White) の衣服を比較した。どちらも長袖、長ズボンで構成され、実験では帽子とサングラスを使用した。また、太陽放射に関するこれらの衣服の性質についての測定を全天日射計を用いて行った。表 1 はその結果を示すが、全日射量 (R) に対する反射率 (r) を測定し、 $R-r$ を日射吸収率 (a) とした。また、R に対する布表面から布裏面への日射透過率 (p) を測定した。

実験衣服は実験開始 2 時間前から、開始時の設定環境 (27°C , $50\%\text{r.h.}$) 中に置かれた。

1. 1. 4 実験手順

平均年齢 24.5 ± 2.2 歳、身長 $159.6 \pm 1.9\text{cm}$ 、体重 $54.06 \pm 3.3\text{kg}$ 、体表面積 $1.51 \pm 0.05\text{cm}^2$ ^{2, 6)} の 7

名の健康な女子学生が被験者として協力した。実験は同じ生理周期、同じ時間帯に行い、実験開始前に被験者に十分な実験内容についての理解を得た。前室において下着のみ着用した状態で、直腸温を各自約12cm挿入した後、30分間安静状態を保ち、2条件間で深部体温が $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ の範囲内であることを確認した。各センサー、発汗カプセルを装着し、 27°C 、50%r.h.、 $0.45\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$ に設定された人工気候室に入室した。10分後、ランダムに選んだ衣服を着衣させ、その5分後に人工太陽照射を開始した。環境温は照射開始10分間で 32°C に上昇し、以後一定であった。黒球温度は 43°C に即座に上昇し、以後一定であった。被験者はおのの温熱生理反応に関する測定を続けながら、1時間天秤上で椅座安静を保った。

1. 2 実験2

1. 2. 1 実験環境

奈良女子大学4階校舎の屋上において1996年9月の晴天の2日間に実験を行った。実験の間には被験者の位置で環境温度、黒球温度、風速および日射量を連続測定した。

図2-1は、実験当時の環境の変化を表わしてい

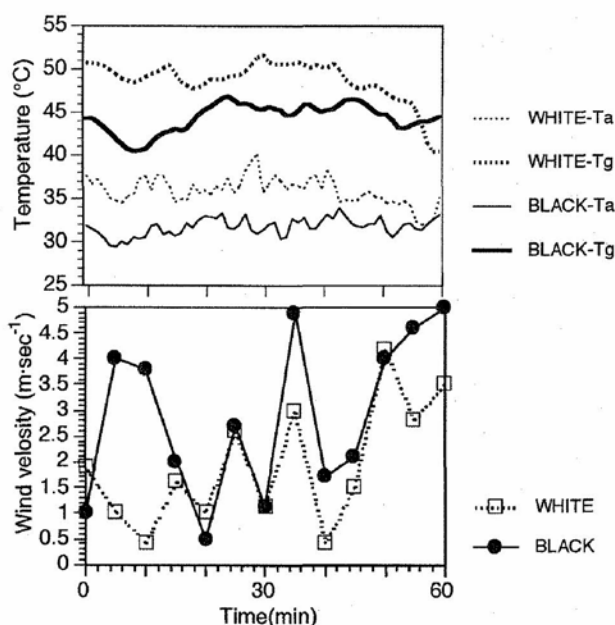


図2-1 実験2における環境温度、黒球温度(上図)および風速(下図)の変化

る。環境温は全般的に White の時に高く、黒球温度も White 実験時に高いレベルであった。日射量は Black 時に約 $500\text{kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 、White 時に $400\text{kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ であった。

1. 2. 2 実験衣服

実験には実験1と同じものを用いた。

1. 2. 3 測定項目および実験手順

深部体温として直腸温、背部において衣服表面温度を連続測定しながら1時間椅座安静を保った。その後ハンドエルゴメータによる被験者の最大握力 MVC (椅座、右手による握力計を用いた測定 $\pm 0.5\text{kg}$) 10%の掌握運動を一定リズム ($50\text{beat}\cdot\text{min}^{-1}$) で行った。被験者が疲労を訴え、リズムに合わせることができなくなった時点で実験を終了した。

2. 実験結果

2. 1 実験1

直腸温はすべての被験者において上昇がみられたが、衣服の色間で有意な差は見られず、Black では $37.44\pm 0.07^{\circ}\text{C}$ 、White では $37.42\pm 0.08^{\circ}\text{C}$ に達した。

図1-1は本実験で得られた足背部皮膚温について、被験者2名 (S-6 S-7) に見られた典型的な例を表わしている。平均値の比較では、1時間の実験の間有意に White の皮膚温が高いレベルを示した ($F=8.51$, $p<0.05$)。他の部位では有意な差は認められなかった。

両前腕部からの局所発汗速度の比較の結果、実験時間全般において有意に Black で低い値を示した ($F=16.67$, $p<0.01$)。図1-2はその中の代表的な例として、被験者2名 (S-2 S-6) についての結果を表わしている。

5分ごとに測定した体重減少量の比較の結果、図1-3はS-2の結果を表わしている。実験による体重減少量は White において $142.6\pm 4.2\text{g}$ 、Black では $133.0\pm 6.0\text{g}$ であり White でより多くの体重

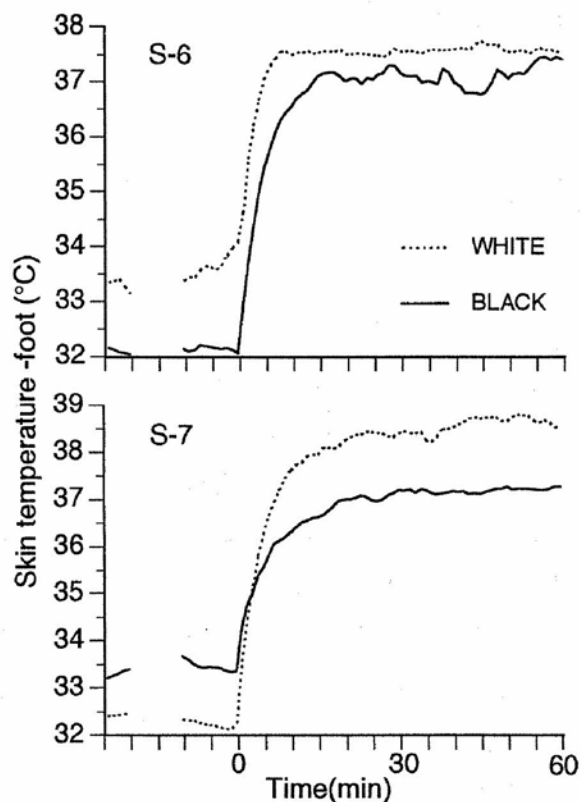


図 1-1 足背部皮膚温の変化

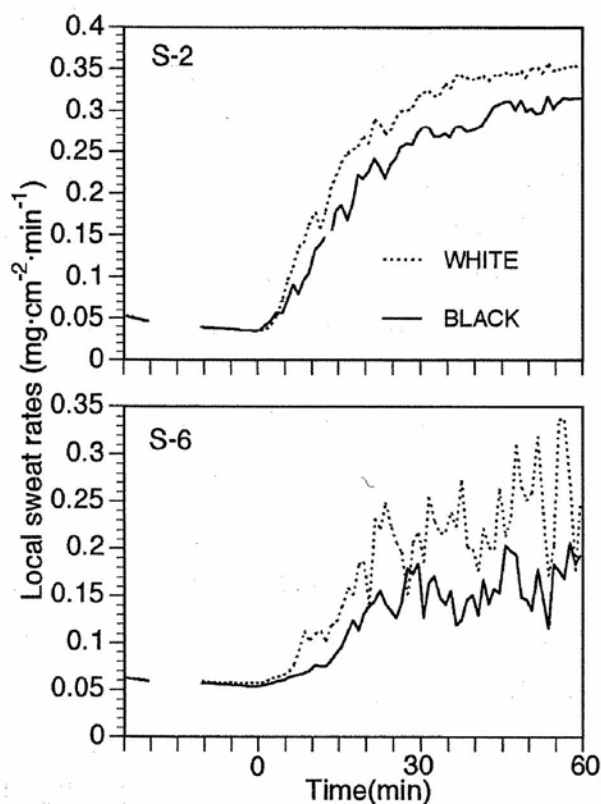


図 1-2 前腕部からの局所発汗速度の変化

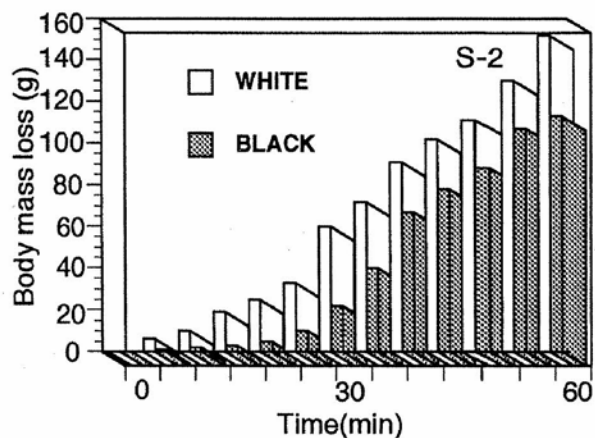


図 1-3 体重減少量の変化

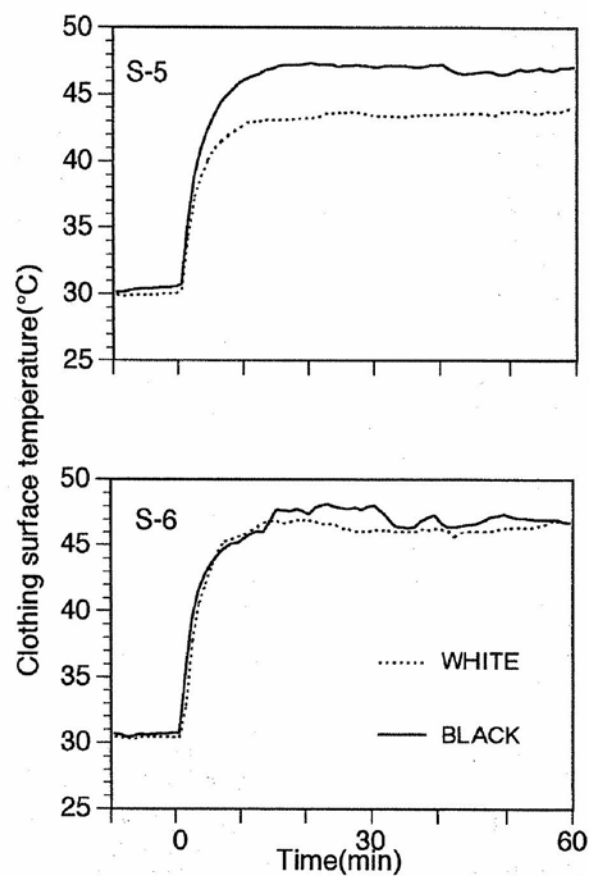


図 1-4 衣服表面温度の変化

減少が傾向として見られた ($F=4.29$, $p<0.10$).

背部の衣服表面温度は White で $45.55 \pm 0.46^{\circ}\text{C}$, Black では $46.15 \pm 0.54^{\circ}\text{C}$ まで上昇し, 有意に Black の表面温度が高いことが明らかであった ($F=15.67$, $p<0.01$). 図1-4は2名の被験者についての典型的な結果を表す.

2. 2 実験 2

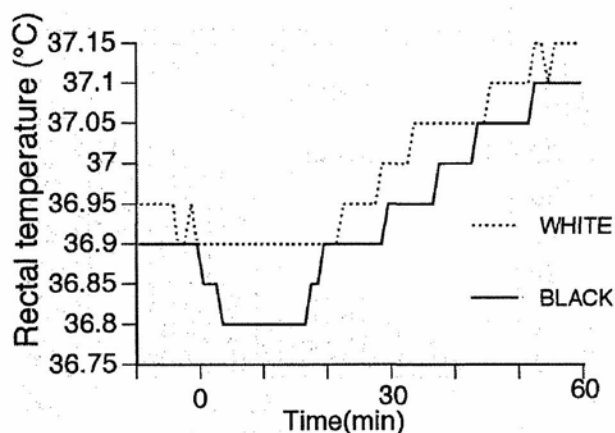


図 2-2 直腸温の変化

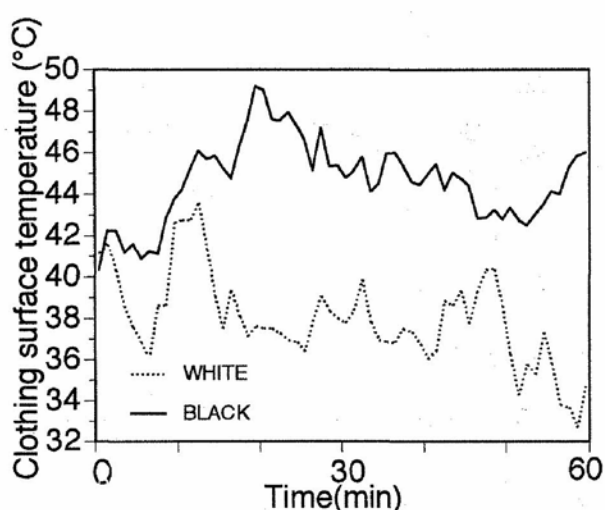


図 2-3 衣服表面温度の変化

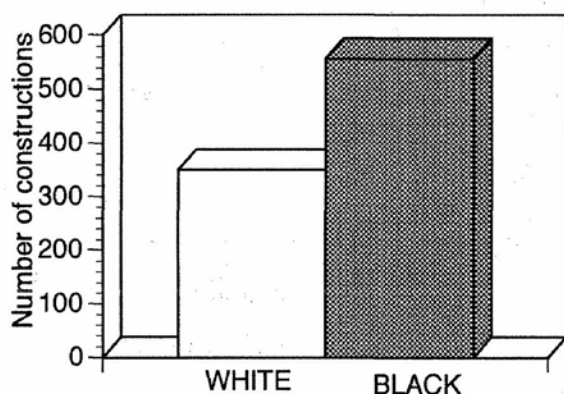


図 2-4 ハンドエルゴメータによる運動回数の比較

図2-2は直腸温の変化を表わす。実験開始後15分目までの、Blackの下降が大きいことがわかった。

また、Black着用時の背部の衣服表面温度は、最高49.05℃にも上った。一方、Whiteでは最高

でも42.75℃であり、その差は実験1よりもかなり大きいものであった。(図2-3)。

ハンドエルゴメータによる局所運動持久力のテストではWhiteが350回、Blackが556回であった。(図2-4)

3. 考 察

実験1で得られた、環境を制御された人工気候室における実験の結果、直腸温には有意な差は見られなかったものの、足背の皮膚温や局所発汗速度、体重減少量がWhiteにおいて、より高いレベルを示した。四肢部はAVAが豊富に存在するため、体全体の熱放散のために重要な役割を果たす³⁾ことが知られている。そこで全身からの発汗や局所発汗に加えて、足背の皮膚温が有意にWhiteで高いレベルであったことは、White着用時の被験者の体温調節中枢が活発に機能し、Blackではその必要性が比較的少なかったものと考えられる。

これらの結果を引き起こした原因として、まず最初に衣服の色の性質が挙げられる。Nielsenは太陽放射に対する反射率(r)はポリエステル、綿ともにWhiteが高く、放射吸収率(a)はBlackが高いという結果を示した¹⁰⁾。また、Reesは著書の中で同様の結果を示し、衣服間隙が小さい場合、気流の少ない環境においては白い衣服が太陽の放射熱を効果的に遮断すると述べてる¹⁰⁾。しかし、本実験では比較的ルーズなTシャツやズボンを用いていることから、とくに黒色表面において高温となった衣服とは密着しておらず、Blackの皮膚への伝導効果は少ないと考えられる。表1にもあるとおり、われわれも日射吸収率、反射率ともに彼等の結果と同様の結果を得た一方、日射透過率は測定では明らかにWhiteが高い値を示した。したがって、Whiteでより活発な体温調節活動の必要性があったことは、Black着用によって受けた高い衣服表面温度の影響よりもWhite

着用による身体への日射透過の影響が大きかったためであると結論した。

第2に、黒球温度の変化からも明らかであるように、本実験では1, 2ともに外界からの日射を受ける Heat Gain の環境であった。したがって、放射による熱交換が起きる衣服表面の温度が重要な意味を持つ。実験の結果、実験1では色の差によって約1℃、実験2では約10℃前後の差が観察された。とくに、屋外で行った実験2ではかなりの気流が存在したにもかかわらず、Black ではかなり高い衣服表面温度が見られた。したがって、熱源との温度差からWhiteでの放射熱の侵入が起きやすかったと考察する。また、同時に黒色での非蒸発性熱放散が活発化したため、発汗量が少なかったことも考えられる。

以上2点から、Black着用時の Heat Gain が比較的抑えられたと思われる。しかし、どちらの衣服においても、深部体温の恒常性を維持できる範囲の負荷であった。また、実験2におけるBlack着用実験時には、かなり風速が高かったことも、Black着用時の熱放散を助け、暑熱負荷を緩和させた原因のひとつとして考慮しなければならない⁴⁾。

衣服の色の違いが運動持久能力にも影響を及ぼしたことに关して考察すると、これらのWhite着用時の暑熱負荷が、その後の運動持久能力に影響し、Whiteで持久力が低かったと考えられる。その生理的理由は、Jeong and Tokuraの考察と基本的には同じである⁸⁾。本実験2では深部体温には衣服の色による顕著な差は見られなかったが、先に述べた理由によりWhiteの場合の暑熱負荷がより大きいと考えられることから、疲労も早かったのではないかと検討した。

実験2は被験者の数も限られ、屋外環境であったことから、実験2において衣服の色の影響を推測することは非常に困難である。また同時に、屋外環境で行う運動中に着用する衣服の衣服内気候

の変化が、生理反応に及ぼす影響についても併せて、今後繰り返して試験を行う必要がある。しかし、実験1の人工太陽を用いて屋外環境をシミュレートした場合よりも、自然の日射による暑熱炎天下での衣服表面温度の差が非常に高い値を示したことを考慮すると、暑熱炎天下において運動前安静時の衣服の色が、体温調節反応やその後の運動能力に及ぼす影響は、想像以上に大きいと考えられる。

文 献

- 1) Adolph, E.F ; Desert, in L.H.Newburg (ed.) Physiology of heat regulation and the science of clothing (Hafner publishing Co. New York and London), 330-338 (1968)
- 2) Adolph, E.F ; Heat exchange of man in the desert, *Am.J.Physiol.*, **123**, 486-499 (1938)
- 3) Aschoff, J. Hauttemperatur und Hautdurchblutung in Dienst der Temperaturregulation, *Klin. Wochenschr.*, **36**, 193 - 202 (1958)
- 4) Clark, R.P., Edholm, O.G. ; Man and his thermal environment (Edward Arnold Publishers Ltd., London.), 234-238 (1985)
- 5) Finch, V.A., Western, D. ; Cattle colors in pastoral herds: natural selection or social preference? *Ecology*, **58**, 1384-1392 (1977)
- 6) Fujimoto, S., Watanabe, T., Sakamoto, A., Yukawa, K., Morimoto, K ; Studies on physical surface area of Japanese. Part 18 Calculation Formulas in Three Stages over All Age, *Jap. J. Hyg.*, **23**, 443-450 (1968)
- 7) Hutchinson, J.C.B., Brown, G.B. ; Penetrance of cattle coats by radiation, *J. Appl. Physiol.*, **26**, 454-464 (1969)
- 8) Jeong, Y.O., Tokura, H. ; Effects of wearing two types of clothing ensembles on endurance performance of handgrip exercise, *J. Human. Ergol.*, **24**, 25-31 (1995)
- 9) Lee, D.H.K. ; Terrestrial animals in dry heat: man in the desert, in D.B. Dill, E.F. Adolph and C.G. Wilber (eds.), Handbook of physiology, section 4: Adaptation to the environment (American Physiological Soci-

- ety, Washington, D.C.), 551–582 (1964)
- 10) Macfarlane, W.D. ; Terrestrial animals in dry heat: ungulates, in D.B.Dill, E.F.Adolph and C.G.Wilber (eds.), Handbook of physiology, section 4: Adaptation to the environment (American Physiological Society, Washington, D.C.), 509–539 (1964)
 - 11) Magi, G. ; The peninsula of Sinai (Centro Stampa Editoriale Bonechi, Italy) (1993)
 - 12) 本明 寛 ; カラーウォッチング (日本語版) (小学館) 185 (1982)
 - 13) Nielsen, B., Kassow, K., Aschengreen, F.E. ; Heat balance during exercise in the sun, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **58**, 189–196 (1988)
 - 14) Nielsen, B. ; Solar heat load: heat balance during exercise in clothed subjects, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **60**, 452–456 (1990)
 - 15) Rees, W.H. ; The biophysics of clothing materials, in E.T.Renbourn (ed.), Materials and clothing in health and disease (H.K. Lewis & Co Ltd., London), 60–158 (1972)
 - 16) Tanaka, K., Tanaka, C. ; World folk costumes in natural colour (Hoikusha publishing Co., LTD., Japan), **25** (1971)