新素材を用いた夏用スポーツウェアの生理的着用効果

綿貫 茂喜¹⁾, 平岡万里子¹⁾, 土井 正¹⁾, 清川 寛²⁾

1) 大阪市立大学生生活科学部

2) ミズノ(株)商品開発本部

Physiological Evaluation of Clothing Made of New Material for Protection against the Solar Heat Load

Shigeki WATANUKI¹⁾, Mariko HIRAOKA¹⁾, Tadashi DOI¹⁾ and Hiroshi KIYOKAWA²⁾

1) Faculty of Science of Living, Osaka City University

2) Division of Product Development, Mizuno Corporation

The purpose of this study was to evaluate the effects of clothing made of a new material that is, the polyester staple containing the ceramics and to reflect the solar heat load on physiological responses during rest, exercise (50 % $\dot{V}O_2$ max) and recovery on a cycle ergometer. Six young female subjects exposed their back to an artificial solar heat load of an intensity of 680 kcal/m²/h with an air temperature of 30 °C. The data were compared to those obtained by wearing clothing made of cotton material. The results were as follows. The cardiac output and oxygen consumption obtained at the end of recovery were increased by solar heat load when the subjects wore cotton material. However, these values showed no significant increase when the subjects wore solar heat reflecting clothing. Furthermore, the cardiac output at the end of submaximal work and recovery were higher for the cotton material compared to the heat reflecting clothing in the solar heat load. The increase of cardiac output for the cotton material may show the increase of skin blood flow for the body heat dissipation. Those results suggest that the solar heat reflecting clothing may decrease the physiological strain like a blood redistribution for the body heat dissipation during exercise in summer sunlight.

(Ann. Physiol. Anthrop. 11(6): 585-592, 1992)

Key words: Solar heat load, Clothing, Cardiac Output, Submaximal work, New fabric

夏期の日射量は700kcal/m²/h前後に達し、運動時には深部温を上昇させ、多量の発汗を促すなど、体温調節系や体液調節系の生理的負担を増加させる原因になる(Adolph, 1938, Beckenridge and Goldmann, 1971, Nielsen et al., 1988, Nielsen, 1990)。日射によって過度の生理的負担が生じると熱けいれんや熱疲労が生じ、場合によっては死に至る。事実、1977年に福島市で行われた市民マラソンでは参加者1511名の内30名

近くが日射病で倒れ、その中の2名は死亡した。従って太陽からの輻射熱を遮断する方策が必要となり、その方策の中でも衣服は必ず着用されるものであるから、衣服による遮熱は有用性が高いと思われる。近年、技術革新の成果として、繊維にも種々の新素材が登場し、その中には従来の綿素材よりも輻射熱をより反射する素材が開発された。則ち、この素材で作られたスポーツウェアは従来の綿素材よりも遮熱に富み、生理

的負担を軽減する可能性がある。

このような特性をもつ素材の一つである太陽光反射素材は紫外線領域の波長を吸収するとともに、可視光線および赤外領域の波長を反射する特性を有する高機能セラミックスをポリマーに練り込んだ特殊異形断面のポリエステル短繊維で作られている。その結果、綿素材と比較して可視光線および赤外線の波長領域において分光反射率が高いと同時に分光透過率が低い（坂本1991）。この素材は坂本（1991）が示したように材料学実験上では優れた結果を示している。しかしながらヒトの生理的体温調節および体液調節機能のメカニズムは複雑であり、その機能にも性差、年齢差、人種の特徴および気候馴化の程度も影響することが考えられる。従って材料学上の特性が生理的に好影響を与えるのか、また一側面としては悪影響があるのか吟味する必要がある。

そこで本研究では、上述の素材特性を有した新素材である太陽光反射素材で作られたスポーツウェアが、従来の綿素材のウェアと比較して日射による生理的負担を減ずるのかを、安静時、最大下作業時、回復時において検討した。

方 法

1) 衣服素材

実験に用いたウェアの形状はTシャツ（色は白色）で、素材は従来用いられている綿と、太陽光を反射する素材である。両素材の材料学的物性値を表1に示す。素材の厚み、保温性、接触温冷感および通気量はできるだけ近似するようにした。なお各項目の試験方法は以下の通りとした。目付はJIS L 1018、厚みはJIS L 1018（圧力：3g/cm²、保温性と接触温冷感はJIS L 1096準拠（KES-F7サーモラボII法）、通気量はJIS L 1096 A 法（フラジール法）である。被験者は日射がある場合と無い場合の2条件下で、いずれかの素材のシャツ（形状や色は同一）を着用した。なお被験者はポリエステル100%のランニングパンツ、および綿80%でポリエステル20%の帽子を着用した。

2) 日射照射装置

日射量は夏期の日射量を想定して1時間辺り680 kcal/m²程度とした。この量を人工的に設定するために太陽光線の波長とほぼ近似した波長をもつランプ（500w）を30個取付けた幅1.5m、高さ2 mのパネル

Table 1 Physical properties of the fabrics. A: solar heat reflecting fabric. B: cotton fabric,

試 料	太陽光反射素材	綿素材
組成 (%)	E-100	C-100
編組織	天竺	天竺
糸使い	(表) 135d (裏) 40/1	46/2
目付 [g/m ²]	179	160
厚み [mm]	0.63	0.51
保温性 (湿式) [clo]	0.21	0.18
保温性 (乾式) [clo]	0.55	0.52
接触温冷感 [w/cm ²]	0.227	0.280
通気量 [cc/cm ² ・sec]	83	95

を作製した。パネルは自転車に座った被験者の背面と平行になるように調節して、光線が被験者の背面に垂直に当たるように調節し、下腿を除くほぼ全身に一定の日射量が当たるようにした。なお、日射時の黒球温度は約46℃前後となった。この温度は堀越と久保（1988）が8月に大阪で行った屋外での実測値と近似する。

3) 実験手順

日射が無い場合、気温約30℃、相対湿度約60%の環境下において、被験者はいずれかのTシャツを着用した後に自転車エルゴメータ（Monark 社製）上で40分間の安静を保った。続いて最大酸素摂取量の約50%に相当する負荷で20分間自転車をこぎ、その後15分間の回復を保った。日射がある場合は日射を安静時の20分目から回復終了時まで照射した。

4) 測定項目

安静終了時（日射有りの場合は日射を当てる前の安静時および日射を当てた状態での安静終了時）、作業終了時および回復終了時の直前に酸素摂取量と心拍出量を測定した。酸素摂取量はダググラスバッグに呼吸を採集し、呼気中のCO₂濃度とO₂濃度を分析（フクダ電子製、RE-5000）し、換気量を測定（SHINAGAWA SEIKI, W-NK-2A）して算出した。心拍出量はCO₂再呼吸法によって算出した。用いた混合ガスの濃度はO₂濃度を95%、CO₂濃度を5%とした。なお、同時期に主観的着用感を調査した。評価尺度は総合的に快適であれば+2、やや快適を+1、どちらでもないを0、やや不快を-1、不快を-2とし、被験者はいずれかを

Fig. 1 A comparison of the oxygen consumption and cardiac output at rest, exercise and recovery between cotton (○) and solar heat reflecting shirts (■) in the shade. Values are means and SD.

選択した。また実験中は双極誘導による心拍数（フクタ電子製，CARDIMAX FX-601），鼓膜温，背部と胸部の皮膚温，背面の衣服表面温度（TAKARA THERMISTER K350）を連続して記録した。実験前後の体重を測定（KOBE KOUKI 製，人体天秤，測定精度1g）し体重減少量を求めた。得られた値は対応のあるT検定を用いて有意差の有無を検討した。被験者は健康な女子大学生6名（身長：平均161.0cm：範囲154～171cm，体重：平均49.1kg：範囲43.6～55.2kg）とした。被験者の最大酸素摂取量は平均48.53ml/min/kg（範囲47.07～50.96ml/min/kg）であった。なお最大酸素摂取量はSatoら（1977）の間接推定法で求めた。

Fig. 2 A comparison of the oxygen consumption at rest, exercise and recovery between the condition of shade (●) and solar heat load (○) in each fabric. Values are means and SD.

結果

先ず日射の無い状態で太陽光反射素材が綿と比較して異なる生理的变化を与えるか検討した。図1は酸素摂取量（図上段）と心拍出量（図下段）について、綿素材（記号：○印）と太陽光反射素材（■印）を着用した時の値を安静，作業，および回復別に示したものである。太陽光反射素材を着用した時の酸素摂取量と心拍出量は綿素材を着用した時と変わらなかった。なお心拍数，胸や背の皮膚温，鼓膜温および体重減少量も素材間に差はなかった。

次に各素材において，日射時の酸素摂取量と心拍出量は日射の無い時と差があるのかをみた。図2は酸素摂取量について，上段に綿を，下段に太陽光反射素材を着用した時の値を，日射有りは○印で日射無しは●印で示した。太陽光反射素材を着用した時の値は日射が無い時と差はない。綿素材でも安静時や作業時では差はないが，回復時では日射が有る時の値が日射の無

Fig. 3 A comparison of the cardiac output at rest, exercise and recovery between the condition of shade (●) and solar heat load (○) in each fabric. Values are means and SD.

い時より有意 ($P < 0.05$) に大きかった。

図3は心拍出量について、図2の酸素摂取量と同様に示したものである。酸素摂取量の結果と同様に、太陽光反射素材を着用した時の心拍出量には、日射の影響はなかった。しかし、綿素材を着用した時の回復時において、心拍出量は日射により有意 ($P < 0.05$) に増加した。なお、心拍数は両素材ともに日射により増加した。

次に日射の有る状態で、生理的負担は素材によって異なるのかをみた。図4は図上段に酸素摂取量、下段に心拍出量を素材別に示す。記号の○印は綿素材、■印は太陽光反射素材を着用した時の値を示す。太陽光反射素材を着用した時の酸素摂取量は、安静時、作業時、回復時ともに綿素材を着用した時と変わらなかった。図下段に示す心拍出量では、作業時と回復時にお

Fig. 4 A comparison of the oxygen consumption and cardiac output at rest, exercise and recovery between cotton (○) and solar heat reflecting shirts (■) in the solar heat load. Values are means and SD.

いて綿素材よりも太陽光反射素材を着用した時の方が小さかった。

次に安静時での素材による測定値の違いをみた。なお安静時の酸素摂取量と心拍出量には素材間の差がなかったため、皮膚温について素材間の違いを検討した。図5は日射無し(図上段)と日射有り(下段)の時の胸の皮膚温の時間変化を示す。なお値は日射を当てていない時の皮膚温をゼロとした変化量を示す。皮膚温は日射が直接当たる背部の皮膚温等数カ所を測定したが、それらの中から日射が直接当たらない胸の皮膚温を選んだ理由は、日射による熱負荷によって当然予想される発汗の出現をみるには、背部の皮膚温では日射の影響が強過ぎて発汗の出現が皮膚温変化からは見えにくいこと、また発汗は熱負荷が局所的であってもほぼ

Fig. 5 A comparison of the skin temperature of chest during rest between cotton (○) and solar heat reflecting shirts (■) in the shade (upper figure) and solar heat load (lower figure). Values are means and SD.

全身で生じるからである。

図上段に示す日射無しの時の皮膚温は素材間に差がなかった。図下段に示す日射が有る時でも素材間に有意差はなかったが、太陽光反射素材を着用した場合の皮膚温は約 0.2°C ほど上昇した後はほぼ一定の値を示すのに対して、綿を着用した場合の皮膚温は約6分目以降から低下傾向を示した。なお、体重減少量は綿の方が太陽光反射素材より大きくなる傾向を示したが有意差はなかった。

図6は生理量と主観的着用感との関係を見るために、作業時(図上段)と回復時(図下段)における心拍出量と総合的な着用感(快適～不快)との関係を示したものである。作業時には、綿を着用した時は太陽光反射素材を着用した時よりも心理的にはより快適となる傾向を示すが、生理的には心拍出量が大きかった。

回復時には、太陽光反射素材は心拍出量が綿より少なく、不快感も小さい傾向にあった。なお作業前の安静時には着用感に素材間の差はなかった。

考 察

夏期の日射量は $700\text{kcal}/\text{m}^2/\text{h}$ 前後に達し、自然環境下では体熱平衡を保つ上で無視し得ない大きさとなる(Adolph, 1938, Beckenridge and Goldmann, 1971, Nielsen et al., 1988)。今日まで太陽からの輻射熱と体熱平衡に関する研究は幾つかなされている。その中で、動物の毛や羽の色が黒色であると熱の吸収量が大きいため、蒸発性熱損失が大きくなること(Borut et al., 1979, Finch et al., 1980, Ellis, 1980)、またヒトの場合でも衣服の色によって太陽からの輻射熱の吸収、反射の程度が異なり、黒色の衣服を着用すると白色よりも

Fig. 6 The relationship between cardiac output and the degree of subjective feeling of comfort in a cotton (○) and heat load reflecting shirts (■) at exercise and recovery. Vertical line shows the subjective feeling (2: comfort, 0: neutral, -2: discomfort). Values are means and SD.

心拍数や発汗量などが増加する (Nielsen, 1990) ことが示されている。これらの結果は太陽からの輻射熱の生理的影響は大きく、衣服素材が輻射熱を反射あるいは吸収する能力の大小によって生理的負担が左右されることを示す。

本研究で検討した太陽光反射素材は、材料学上では紫外線領域から赤外線に至る領域において遮熱する能力が綿より優れている (坂本1991)。この素材特性の違いは以下に示す結果から推測すると、着用者の生理的反応に違いを引き起こしたと考えられる。すなわち、第1に日射が無い時の生理値には素材間の差が無い (図1) こと、第2に日射が有る時には素材によって

生理反応は異なり、太陽光反射素材を着用した時は、酸素摂取量と心拍出量は日射の無い時と変わらない (図2, 3, 下段) が、綿を着用した時の回復時では日射によって両値ともに増加したこと、第3に日射が有る時の作業時と回復時の心拍出量を素材間で比較すると太陽光反射素材より綿素材を着用した時の方が大きかった (図4下段) ことである。この生理反応の中でも全身の血流動態を示す心拍出量に素材の違いや日射の有無が影響を与えるようである。

高温暴露あるいは高体温になると安静時あるいは最大下作業時の心拍出量は一般に増加するようであり (Koroxenidis et al., 1961, MacDougal et al., 1974, Nadel et al., 1979, Katsuura, 1981, Nielsen et al., 1984), 本研究結果と一致する。その原因として熱放散のための皮膚血流量の増加が考えられる (Koroxenidis et al. 1961, MacDougal et al., 1974)。例えば Koroxenidis ら (1961) は口腔温を 38.2°C まで高めると、通常時より皮膚の血流が $1.8\text{L}/\text{min}/\text{m}^2$ 増加すると共に、心拍出量が60%増加したことを報告した。本研究においても、綿着用時では日射による体温上昇を防ぐために皮膚血流量が増加し、その結果心拍出量が増加したと考えられる。逆に太陽光反射素材を着用した時には心拍出量を増加させる程度の皮膚血流の増大はなかったと考えられる。すなわち、太陽光反射素材を用いた衣服を着用すれば綿を着用した時よりも太陽からの輻射熱に起因する生理的負担を軽減する可能性がある。なお、これらの変化は作業時および回復時においてみられたもので作業前の安静時には酸素摂取量や心拍出量ばかりでなく、図5に示すように胸の皮膚温変化にも有意差はなかった。これは運動することにより身体の呼吸循環系の負担が一度増加した状態において新素材の有用性が発揮されることを示すのかもしれない。あるいは図5下段に示すように有意差はないものの素材間に違いが生じる傾向がみられることから、日射への暴露時間をより長くすれば安静時においても生理的負担に素材の違いがあらわれる可能性がある。

ところで、長時間高温に暴露されたり、重作業を長時間行って、深部温が極度に上昇すると心拍出量は減少する (Rowell et al., 1966, MacDougal et al., 1974)。この減少は一回拍出量の低下に起因する (Saltin and Stenberg, 1964, Rowell et al., 1966)。例えば Fortney ら (1983) は 30°C の環境下で $60\sim 70\%\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ の作業

を行った時の血液量と一回拍出量との関係を検討した。その結果、一回拍出量は低食道温より高食道温(38.5℃)の時に、および高血液量より低血液量の時に減少することを示し、その原因が静脈還流圧の低下にあることを報告した。静脈還流圧の低下が生じる原因として、皮膚血流量の増大に伴って末梢血管で血液が貯留することが示唆されている(Rowell et al., 1966, MacDougal et al., 1974, Fortney et al., 1983)。また、末梢血管に血液が貯留すると血液循環が不全となり熱射病となる(Daily and Harrison, 1948)。

本研究での作業強度は約50%Vo2max程度で、作業時間は20分と比較的短時間であったため、深部温が極度に上昇し、心拍出量や一回拍出量が低下することはなかった。しかし、綿素材を着用した時には、一回拍出量の低下原因となる皮膚血流量の増加が伺われ、回復時には酸素摂取量も増加して回復が遅延した。事実、日射のある自然環境下で作業時の生理的变化を検討したNielsenら(1988)の報告によると、日射時の平均皮膚温と直腸温が日陰の時より高いことから、皮膚血流が増加した可能性があること、および酸素摂取量が増加したことを示した。なお、本研究では深部温の指標として鼓膜温を測定したが、輻射熱の影響が無視できなかったため議論から除外するが、作業時の鼓膜温は日射が無い時で約37.0℃程度、日射時で輻射熱の影響があったとしても約37.6℃程度であり、極度に深部温が上昇したとはいえない。しかし、より強度の作業を行うか、あるいは作業時間をより長くすれば、深部温が上昇し一回拍出量が低下するかもしれない。今後そのような実験条件を設定してどちらの素材の方が深部温をより上昇させるか検討する必要があるが、綿素材着用時では末梢血管への血液貯留を誘因する皮膚血流量の増加が伺えることから、太陽光反射素材よりも綿素材の方が深部温の上昇を招きやすいと推測される。

最後に主観的着用感と心拍出量との関係(図6)をみると、回復時には着用感がより快適な方が心拍出量も小さくなったが、作業時ではその逆の傾向がみられた。これは着用者の主観的評価が生理量と必ずしも一致しないこと、つまり着用者の主観評価のみでは衣服の性能は評価できないことを示唆する。

まとめ

日射に起因する生理的負担を軽減する可能性がある新素材(太陽光反射素材)を用いたスポーツウェアの着用効果を従来素材である綿のウェアと比較検討したところ、以下のような結果が得られた。

1. 綿素材を着用した場合、日射によって最大下作業時の心拍出量、および回復時の酸素摂取量と心拍出量が増加した。心拍出量の増加は体熱放散のための皮膚血流量の増加によるものと考えられた。
2. 太陽光反射素材を着用した場合、日射をあてても最大下作業時および回復時の酸素摂取量と心拍出量は日射の無い時と差がなかった。

これらの結果から、夏季の屋外のような日射量が多い環境下において着用するスポーツウェアの素材として太陽光反射素材は有用であることが示唆された。

謝 辞

稿を終えるにあたり、日射装置の製作にご尽力賜りました本学部技術職員の横田圭氏、および貴重なご助言や資料を賜りました名古屋工業大学の堀越哲美教授、本学部の中根芳一教授に深謝致します。

文 献

- Adolph, E. F. 1938: Heat exchanges of man in the desert. *Am. J. Physiol.*, 123: 486-499.
- Beckenridge, JR, and Goldmann, R. F., 1971: Solar heat load in man. *J. Appl. Physiol.*, 31: 659-663.
- Borut, A. R., Dmiel, R. and Shkolnik, A. 1979: Heat balance of resting and walking goats: Comparison of climatic chamber and exposure in the desert. *Physiol. Zool.*, 52: 105-112.
- Daily, W. M. and Harrison, T. R. 1948: A study of the mechanism and treatment of experimental heat pyrexia. *Am. J. Med. Sci.*, 215: 42-55.
- Ellis, H. I. 1980: Metabolism and solar radiation in dark and white herons in hot climate. *Physiol. Zool.*, 53: 358-372.
- Finch, V. A., Dmiel, R., Boxman, R. and Shkolnik, A. and Talor, CR. 1980: Why black goats in hot desert? Effect of coat color on heat exchanges of wild and domestic goats. *Physiol. Zool.*, 53: 19-25.

- Fortney, S. M., Wenger, C. B., Bove, J. R., and Nadel, E. R., 1983: Effects of Plasma volume on forearm venous and cardiac stroke volume during exercise. *J. Appl. Physiol.*, 55: 884-890.
- 堀越哲美, 久保和子, 1988: 建築外部環境における着衣人体の生理心理的影響に関する予察的研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 4350-4351.
- Katsuura, T., 1981: Alterations of cardiac output, stroke volume, and heart rate during 3 hours of exercise in different ambient temperatures. *J. Anthropol. Soc. Nippon*, 89 (3): 351-362.
- Koroxenidis, G.T., Shephard, J.T. and Marshall, R.J., 1961: Cardiovascular response to acute heat stress. *J. Appl. Physiol.*, 16: 869-872.
- MacDougall, J. D., Reddan, W. G., Layton, C. R. and Dempsey, J. A., 1974: Effects of metabolic hyperthermia on performance during heavy prolonged exercise. *J. Appl. Physiol.*, 36 (5): 538-544.
- Nadel, E. R., Cafarelli, E., Roberts, M. F. and Wenger C. B., 1979: Circulatory regulation during exercise in different ambient temperatures. *J. Appl. Physiol.*, 46 (3): 430-437.
- Nielsen, B., Rowell, L. B. and Petersen, F. B., 1984: Cardiovascular responses to heat stress and blood volume displacements during exercise in man. *Eur. J. Appl. Physiol.* 52: 370-374.
- Nielsen, B., Kassow, K. and Aschengreen F. E., 1988: Heat balance during exercise in the sun. *Eur. J. Appl. Physiol.* 58: 189-196.
- Nielsen, B., 1990: Solar heat load: heat balance during exercise in clothed subjects. *Eur. J. Appl. Physiol.* 60: 452-456.
- Rowell, L. B., Marx, H. J., Bruce, R. A., Conn, R. D. and Kusumi, F., 1966: Reduction in cardiac output, central blood volume, and stroke volume with thermal stress in normal men during exercise. *J. Clinical Invest.*, 45 (11): 1801-1816.
- Saltin, B. and Stenberg, J., 1964: Circulatory response to prolonged severe exercise. *J. Appl. Physiol.*, 19 (5): 833-838.
- 坂本光, 1991: 紫外線・熱線遮へい繊維について, 染色工業, 40(2): 66-74.
- Sato, M., Yasukouchi, A. and Harada, H., 1980: Prediction of maximal oxygen intake over wide range of air temperature conditions. *J. Human Ergol.*, 9: 81-89.

(1992年4月4日受付)

Shigeki WATANUKI

Faculty of Science of Living, Osaka City University
3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558, Japan

綿 貫 茂 喜

〒558 大阪市吉住区杉本3-3-138 大阪市立大学生活科学部 生活環境学科