

毛管現象を付与した自己発汗式冷却下着の開発と検証

岐阜医療科学大学 田中 邦彦
(共同研究者) 日本福祉大学 西村 直紀

Development and Evaluation of Self-Perspiration with Evaporative Cooling Garment Added Capillary Function

by

Kunihiko Tanaka
*Graduate School of Health and Medicine,
Gifu University of Medical Science*

Naoki Nishimura
*Faculty of Sport Sciences,
Nihon Fukushi University*

ABSTRACT

As a body temperature lowering mechanism, we have a perspiration function. Recently, we have developed and demonstrated “self-perspiration with evaporative cooling garment” that lowers body temperature by spontaneous “perspiration” and evaporation. The system is cooling the body with both the “water cooling” in which the cooling water flows through the tube on the clothing surface and the “evaporation” in which water is leached from the pores in the tube and evaporated to cool.

In the present study, we developed the leaching by capillary action (capillary type) rather than the leaching by pore water pressure (pore type), and compared the body cooling function. Six healthy subjects were volunteered to exercise 30W, 60W, 90W, and 120W for 3 minutes each using a cycle ergometer, and changes in skin

temperature and humidity in clothing were measured and analyzed simultaneously. The skin temperature decreased with time in both the pore type and capillary type, but the decrease was significantly larger in the capillary type. There was no significant difference in the humidity change in the garment. The capillary type obtained a higher cooling effect without further increasing the humidity in the garment.

要 旨

体温低下機構として人体は発汗機能を有している。これまでに我々は、衣服が自発的に「発汗」し蒸散することで体温を下げる「自己発汗式冷却下着」を作成、有用性を証明した。これは衣服表面のチューブ内を冷却水が還流する「水冷式」と、そのチューブ内の細孔から水を浸出、蒸散させて冷却する「蒸散式」双方で身体を冷却する方式である。

今回、細孔からの水圧による浸出（細孔式）ではなく、毛管現象による浸出（毛管式）を実現し身体冷却機能を比較した。6名の健康被検者にサイクルエルゴメーターで30W, 60W, 90W, 120Wそれぞれ3分間の運動を行わせ、皮膚温と衣服内湿度の変化を同時に計測、解析した。細孔式、毛管式両者ともに時間経過とともに皮膚温は低下したが、毛管式の方が、有意に低下した。衣服内湿度変化は両者に有意差を認めなかった。毛管式の方が、衣服内湿度をより上げることなく高い冷却効果を得られることがわかった。

緒 言

年々夏期の暑熱環境は過酷さを増している。この暑熱環境下においてスポーツする際はもちろん屋内安静時でも熱中症対策は必須である。特に高齢者は暑熱を実感し難いことからエアコンを使用せず、熱中症から、死亡に至るといった事例が近年多く報道されている。エアコンが使用できない屋外での活動では、なおさら危険である。

人体には、体温を低下させる機構として発汗機能を有している。これは、皮膚の汗腺から分泌された汗が蒸散する際に気化熱を奪うことで身体を冷却する機構である。合目的な機構であるが、この機構では発汗しなければ体温を低下させない、言いかえれば一度体温が上昇しなければ冷却機構としてはたらないことになる。これまでに我々は、体温が上昇する前に、あるいは人体が発汗する以前に、衣服が自発的・積極的に「発汗」し蒸散することで、体温を下げる「自己発汗式冷却下着」を作製し、その有用性を証明したのち特許取得した¹⁾。これは皮膚表面に密着する衣服の表面に縫着したチューブ内を、冷却水が還流することによる「水冷式」と、そのチューブに作成した細孔から水を浸出させ、その蒸散によって気化熱を奪うことで冷却する「蒸散式」の双方で身体を冷却する方式である。しかしながら長期間の使用にあたっては、チューブの劣化、蒸散による静水圧の変化などから浸出する水の量が減少してしまう可能性がある。そこで今回、チューブからの水浸出を、これまでのような細孔から水圧によって受動的に浸出させるのではなく、毛管現象を応用して積極的に一定の浸出量を確保可能とする冷却機能を付与し、静水圧による浸出との身体冷却機能の差異を検討した。

1. 方 法

速乾式スポーツウェアの表面に外径6 mm、内径4 mmのシリコンチューブを縫着した(図1)。従来の細孔方式として、チューブに5か所、直接

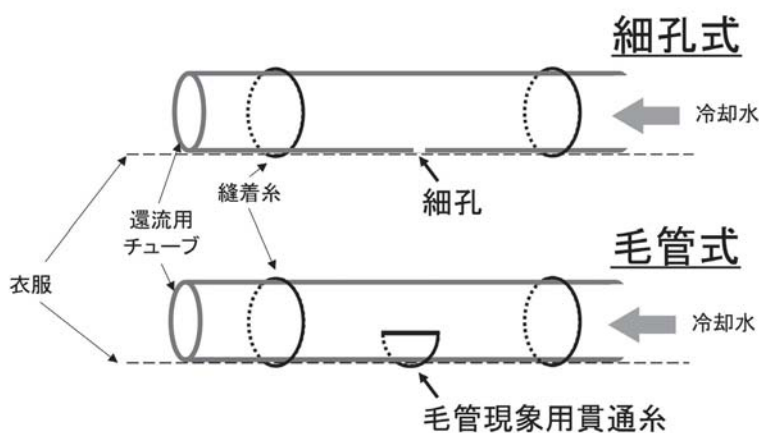


図1 細孔式（上）と毛管式（下）の水浸出方法

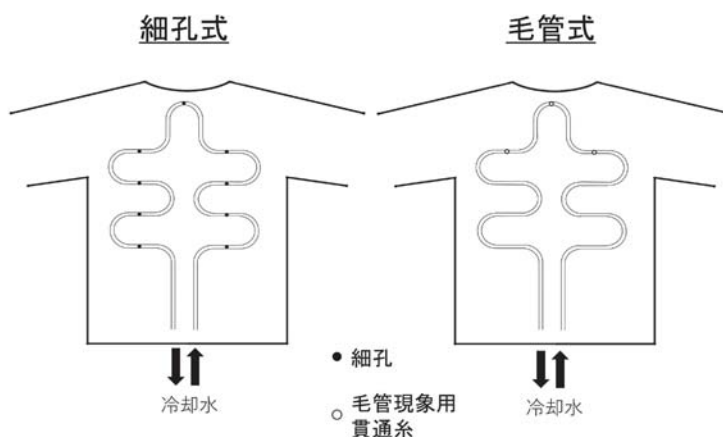


図2 細孔式（左）と毛管式（右）冷却衣服のチューブ配置と水浸出部分

細孔を作成した（細孔式，図2左）．毛管方式については縫着用の糸とは別に，3か所で浸出用の糸をチューブに貫通させ，縫着を追加した（毛管式，図2右）．細孔式，毛管式はそれぞれ成人用Lサイズ2着，Mサイズ2着を作製し被検者の体格に合わせて装着させた．細孔式，毛管式いずれも保温ボトル内に用意した4℃の冷水を，ブラシレス電動ポンプ（DC30A-1230, Shaanxi, China）で600 mL/分の速度で還流させた（図3）．

6人の健康男性ボランティアで計測を行った（年齢 22 ± 0.22 才，身長 169.3 ± 2.4 cm，体重 63.8 ± 3.4 kg，それぞれ平均 \pm 標準誤差）．計測はすべて岐阜医療科学大学倫理委員会承認（2019

- 2）のもと，実施した．被検者には計測内容に関する説明を行い，書面による同意を得た上で行った．計測は気温 $29.5 - 31$ ℃，湿度 $70 - 75\%$ の室内で行った．左肩甲骨の肩甲棘下部に皮膚温センサー（DL-240, S&ME, 東京）と湿度センサー（DL-220, S&ME, 東京）を貼付した．皮膚温，湿度はいずれもアナログ→デジタル変換機（DC-300H, 日本光電, 東京）でデジタル変換したのち20Hzで連続記録した．記録は記録解析ソフト（LabChart 8, AD Instruments, Australia）上で行った．

被検者に冷却服を装着し，自転車エルゴメーター（EZ101, COMBI, 東京）上で安静にさせた．



図3 実際に作製、使用した冷却衣服の構成（毛管式）

10分間の安静の後、1m/分の風速で背部に送風を開始した。送風開始から3分後、運動を開始させ、30W、60W、90W、120Wで3分間ずつ負荷をかけた。120W終了後、3分間安静にさせ、計測を修了した。各負荷終了時に血圧と脈拍数を計測した（HEM-6051、オムロン、東京）。同様の計測を細孔式と毛管式双方で行った。両者の計測は別の日時に行った。

皮膚温、衣服内湿度は、送風開始直前の値を基準として、各負荷終了直前10秒間の平均を解析した。解析値はすべて平均 ± 標準誤差で示し、繰り返しのある分散分析ののち、時間とグループ（細孔式と毛管式）の差異について Scheffe の post hoc テストを行った。p < 0.05 をもって統計学的有意とした。

2. 結果

すべての被検者が計測を完遂した。血圧は、運動に伴って収縮期血圧、拡張期血圧ともに上昇傾向を認めたが、統計学的有意には至らなかった（図4上）。一方心拍数は運動負荷増大とともに有意に上昇した（図4下）。しかしながら、図5に示すように皮膚温は、送風、冷却水還流に加えて水分の浸出、気化によって運動負荷増大にも関わらず、時間経過とともに低下した。この低下は従来の細孔式よりも毛管式の方が有意に大きかった

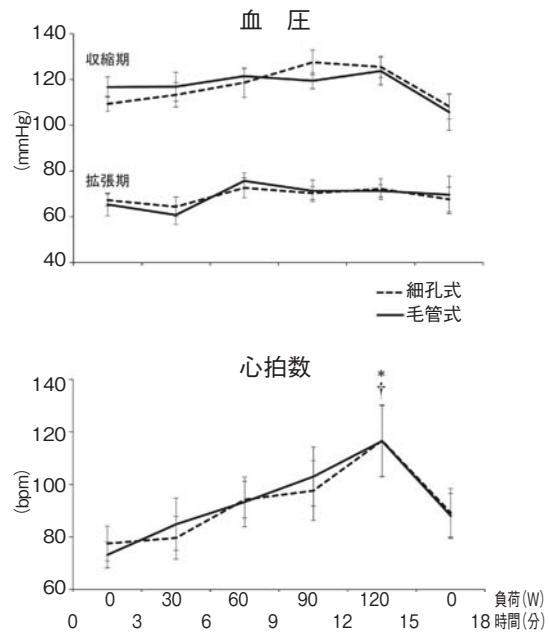


図4 血圧（上）と心拍数（下）変化
*p = 0.112 vs. 0-3分

（図5上）。

衣服内湿度は運動負荷増大とともに有意に増加した。しかしながら、細孔式と毛管式の間には有意な差を認めなかった（図5下）。

3. 考察

今回の計測では細孔式よりも①「毛管式による自己発汗式冷却下着の方がより高い身体冷却効果を得られる」、このとき②「衣服内湿度を、より上昇させることはない」ということを示した。

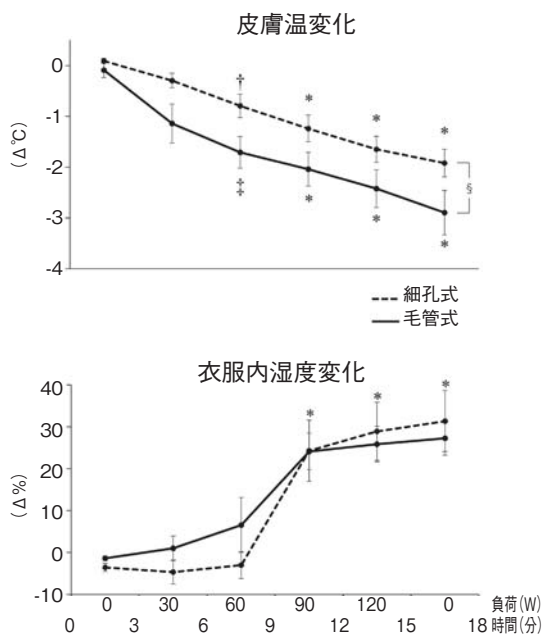


図5 皮膚温 (上) と衣服内湿度 (下) 変化

§p = 0.047 vs. 細孔式
 †p = 0.045 vs. 0-3分
 ‡p = 0.0040 vs. 0-3分
 *p < 0.0001 vs. 0-3分

これまでに我々は、今回の細孔式に使用したものと同様な、水浸出用の細孔を付与したシリコン製の冷却水還流用チューブを上半身の前面と後面全体に広く縫着した冷却下着を作製し、衣服内湿度を不要に上昇させることなく身体を冷却できることを証明してきた^{2,3)}。しかしながら、身体深部を冷却するには骨格筋の多い部分よりも骨に近い部分を重点的に冷却する方が、効果が高いこと、また腹部の冷却によって消化管運動の低下が懸念されることなどから今回、背部の肩甲骨付近を重点的に冷却する衣服を作製し、計測を行った。

チューブ内を還流する冷却水によって、直接身体を冷却するとともに、細孔から滲出する水分の気化によって身体への高い冷却効果があることはこれまでに証明しているが、これまでの細孔式は十分な水分が滲出・気化し、冷却効果が得られるまでに比較的長時間を必要とした³⁾。これを解消するために、噴霧装置を付帯し、冷却効果を高めたが、今回はこの噴霧装置を使用せずとも、揚水

力の高いポンプを採用することによって、身体の高い位置にある細孔にも十分な水圧をかけることができ、還流開始直後から高い冷却効果を得ることができた。しかしながら、細孔式は均一な浸出孔を付与することが困難であり、また長期間の使用によってチューブが変性すると浸出効率も懸念される。そこで今回、細孔付与のみならず、そこに糸を貫通させ、その糸を衣服に縫着した。チューブ内の還流水が、その糸への毛管現象によって積極的にチューブ内から衣服へと浸出し、さらにそれが気化することによって、より高い身体冷却効果を得ることができた。このとき、より積極的に水分を浸出させているにもかかわらず、衣服内の湿度は、細孔式と同様であった。これはベースとなる衣服として採用した、発汗を外部へ移動させる速乾式衣服の性能によるところも大いに考えられるが、浸出と蒸散の、適度なバランスによるものとも考えられる。すなわち、浸出した水分量と同等量の水分が蒸散することで、衣服内湿度の不要な上昇を抑制できる。これは不快感の抑制にもつながるものと考えられる。今後は湿度の高い環境下でもこうして効果が得られるよう、還流させる液体の組成も考慮する必要があるかもしれない。今回は従来方式との比較を重点に置いたため冷却水を使用したが、冷却水を70%エタノールにすることで、より高い冷感を得ることができるというところまでは確認した。ただし詳細な検討にあたっては引火の危険性も考慮する必要があると考えられる。また、運動強度の増加によって急激に衣服内湿度が上昇しているのは、被検者自身の発汗によるものも大いに考えられる。したがってより広範囲に冷却させ、深部体温上昇を抑制させる方法も考慮する必要がある。皮膚表面のみを冷却すると抵抗血管が収縮し、皮膚血流低下によって放熱を妨げる。したがって、より高い冷却効果の付与、もしくは冷却部分を骨などの熱伝導性が高い部分を選択するなどの改善

が必要とも考えられる。これまでに我々は、シリコンチューブでなく、塩化ビニルチューブでも試作を行ったが、その際には滲出速度が必要以上に大きかったため、衣服内湿度も急激に高くなり実用に不向きと考えられた。また試作段階で毛管現象による浸出が仮説以上に高かったため、今回の計測では3か所のみ限定した（未発表データ）。今回、シリコンチューブを使用し、少数ながら毛管現象を誘発させる構造を付与したことで、より高い冷却効果を得ることができた。今後さらに衣服の自己発汗と蒸散の効率を高め、可能な限り体温の上昇と発汗を抑制する方法を検討したい。

4. 結 語

以上、自己発汗式冷却下着に毛管現象を付与したところ、衣服内の湿度を不要に上昇させることなく、従来の細孔式の冷却下着よりも高い身体冷却効果を得ることができた。

謝 辞

本研究の主旨を御理解いただき、助成を決定いただいた公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団の石本理事長はじめ担当者のみなさま、学術委員の先生方に厚く御礼申し上げます。また被検者として参加いただいたボランティアのみなさまにも御礼申し上げます。

文 献

- 1) 田中邦彦, 特許第 6429392号 冷却衣服(2018)
- 2) K. Tanaka, D. Nagao, K. Okada, K. Nakamura, Cooling Effects of Wearer-Controlled Vaporization for Extravehicular Activity, *Aerosp. Med. Hum. Perform.*, 88 418-422(2017)
- 3) K. Tanaka, K. Nakamura, T. Katafuchi, Self-perspiration garment for extravehicular activity improves skin cooling effects without raising humidity, *Acta. astronautica.*, 104 260-265(2014)