

撥水加工によるスポーツウェアの吸水性低減が 体温調節反応におよぼす影響

神戸女子大学 田中香利
(共同研究者) 同 平田耕造

Effects of Water-Proof Finishing for Cotton Clothing on Thermoregulatory Responses during Heat Load

by

Kaori Tanaka and Kozo Hirata
*Faculty of Home Economics,
Kobe Women's University*

ABSTRACT

The aim of present study was to clarify the effects of water-proof finishing for cotton clothing on thermoregulatory responses during heat load. Nine female subjects were dressed in cotton shirt with water-proof finishing (FC) or without one (C). They immersed their lower-legs and foot in a water bath at a temperature raised from 35 °C to 41 °C for 70min at an ambient temperature of 28 °C and 50% relative humidity. With heat load, sweating occurred in FC- and C-clothed subjects, the amount of sweat remaining on cotton shirts was significantly smaller in FC than in C. The increment of skin blood flows on the chest and the forearm were significantly smaller in FC- than in C-clothed subjects, but not on the thigh. The rise of upper-arm and mean skin temperature were significantly suppressed in FC- compared with C-clothed subjects. There were no significant differences of rectal temperature or subjective voting between the both clothing conditions. These results suggest that the water-proof finishing for cotton clothing reduced the capacity of water absorbency, and it induced the soaking skin and suppressed the increase of skin blood flow.

要 旨

スポーツウエアには発汗に適切に対応できる機能が要求され、吸水性や吸湿性などの水分移動特性が重要な役割を果たしている。本研究では、撥水加工されたスポーツウエアが着用者の体温調節反応におよぼす影響を明らかにすることを目的とした。被験者9名は、綿100%素材の長袖ポロシャツあるいは同品に撥水加工を施したもの、いずれかを着用した。その後、室温28℃、相対湿度50%の人工気候室内において、70分間の下肢温浴（水温35℃→41℃）を行った。その結果、撥水加工を施したウエアは、未加工品に比較して、衣服に残留する水分量が少ないことが明らかになった。また、撥水加工ウエア着用時には、胸部および前腕皮膚血流量の増加が抑制され、上腕皮膚温および平均皮膚温の上昇が抑えられることが確認された。直腸温や感覚応答には加工の有無による顕著な違いは見られなかった。撥水加工によるスポーツウエアの吸水性低減は、皮膚の湿潤を招き、皮膚血流量の増加抑制を引き起こすことが示唆された。

緒 言

スポーツ活動に伴う汗によるムレやべとつきは、誰にとっても不快であり、快適にスポーツを行なうためには、これらの不快さを解消することが必要である。従ってスポーツウエアには発汗に適切に対応できる機能が要求され、吸湿性や吸水性といった水分移動特性が重要な役割を果たしている。

従来、スポーツ時のウエアやインナー素材には、肌触りが良く、吸湿・吸水性に優れた綿が多用されてきた。われわれは綿素材のウエア着用時において、発汗直後に汗を吸湿した綿衣服が収着熱を発生し、ポリエステル素材着用時と比較して、着用者の不快感や暑熱感を増幅させたことを検証し

ている¹⁾。さらに綿着用時においては、発汗速度が高い者ほど体温調節反応が亢進したこと²⁾や長時間発汗が持続すると、ウエアが汗を吸水し続け、多量発汗者ほど皮膚血流や皮膚温上昇が抑制されることを確認した³⁾。一方、ポリエステル着用時には着用者の発汗反応と体温調節反応との間に関連性は認められなかった。

衣服の吸水性と体温調節反応の関係については従来多くの研究がなされている^{4~6)}。しかしながら、吸水性の異なる素材を用いて着用時の体温調節反応への影響を検討しようとする、素材の違いに伴って、吸湿性や通気性、熱伝導性、厚み等他の特性も同時に変化するため、吸水性の影響のみを捉えることは非常に難しい。そこで今回は、高吸水性素材である綿に撥水加工を施し、吸水性の低減化と吸湿性等他の材料特性の維持を同時に実現した。

本研究では、撥水加工による吸水性の低減が着用者の体温調節反応や快適性にいかに影響するかを明らかにすることを目的とした。

1. 研究方法

1. 1 被験者および環境条件

被験者として、20代の成人女性9名を対象とし、室温28℃、相対湿度50%、風速0.2m・sec⁻¹の人工気候室内にて実験を行った。被験者ごとに測定開始時刻を同一にし、全ての実験は、性周期、摂食および飲水条件を統一して行なった。被験者の身体特性は、身長160.3±2.1cm、体重49.2±2.0kg、体脂肪率22.9±1.48%であった。

なお、全被験者に対し、事前に研究の目的、方法、起こりうる危険性などを十分説明し、書面による参加の同意を得た上で実施した。また、本研究は神戸女子大学ヒト研究倫理委員会の審査、承認のもとに行われた（受付番号 H17-11）。

1. 2 着用衣服

市販されている綿100%素材の長袖ポロシャツ(以下「加工なし」と同品に撥水加工を施したものの(以下「加工あり」)の2種を実験用衣服として用いた。両衣服の材料特性を表1に示した。そ

表1 ポロシャツの材料特性

素 材		撥水加工	
		あり	なし
綿100%			
厚み	(mm)	1.08	1.05
目付	(g・m ⁻²)	224	214
通気度	(cc・cm ⁻² ・sec ⁻¹)	108	103
吸水性	(sec)	なし	23
水分率	(%)	4.9	4.3
透湿性	(g・m ⁻² ・h ⁻¹)	390	400
保温率	(%)	16	18

の他、ハーフパンツ(ポリエステル100%)と下着(ナイロン82%, ポリウレタン18%)を着用した。実験時の総着衣重量から求めたclo値は、両衣服着用時ともに、0.64cloであった⁷⁾。

1. 3 測定項目

本実験では、皮膚温(胸部, 上腕, 前腕, 手指, 大腿, 下腿)(YSI), 皮膚血流量(胸部, 前腕, 手指, 大腿)(ALF21, ALF21D: アドバンス), 局所発汗量(胸部, 前腕)(SKD-2000: スキノス), 直腸温(YSI)を測定し, データ取込みソフト(インタークロス)を介して連続記録した。また, 心拍数(S610: ポラール), 血圧(JENTOW 7700: 日本コーリン), 衣服内および衣服表面湿度(胸部, 前腕, 大腿)(RS-11, RS-12: エスペックミック), 実験前後における各衣服の衣服重量を測定した。感覚応答(温冷感, むれ感, ぬれ感, 湿潤感, 快適感)は口頭で申告させた。

1. 4 実験手順

被験者は「加工あり」, あるいは「加工なし」, いずれかの実験用衣服に更衣後, 実験室内にて椅座位安静を保った。その後各種測定センサーを装着し, 下腿を水温35℃の水槽内に浸漬した。水

温は35℃を10分間維持した後, 41℃まで上昇させ, 測定終了まで同温を維持した。計70分間の下肢温浴を負荷した。

1. 5 データ解析

各測定値は全て平均値±標準誤差で表した。条件間の比較は2元配置の分散分析およびt検定を用いて解析し, 危険率5%を有意水準とした。

2. 研究結果

撥水加工の有無による実験前後のポロシャツ重量変化への影響を図1に示した。実験前における「加工あり」のポロシャツ重量は270.63±1.11g, 「加工なし」は, 266.20±0.60gであった。実験後は各々275.12±1.13g, 277.70±3.48gへ増加した。従って実験前後の重量変化は, 「加工あり」4.5±0.4g, 「加工なし」11.5±3.2gであり, 「加工あり」の方が有意に低い値を示した。ポロシャツを除く他の衣服の重量変化には, 加工の有無による顕著な違いは認められなかった。

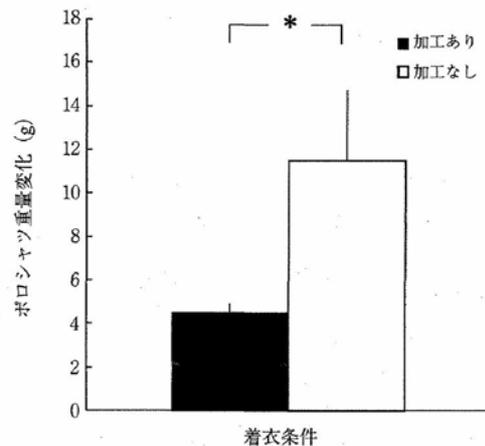


図1 撥水加工の有無による実験前後のポロシャツ重量変化への影響
平均値±標準誤差, *: p<0.05

表2は, 撥水加工の有無による局所皮膚温への影響を示したものである。「加工あり」「加工なし」とともに, 胸部皮膚温は, わずかに上昇した後, 下降する傾向を示した。上腕, 大腿, 下腿では, 徐々に上昇する傾向が見られた。上腕部において

表2 撥水加工の有無による局所皮膚温 (°C) への影響

	撥水加工	水温 41°C		
		水温 35°C 10分	40分	70分
胸部皮膚温	あり	35.17 ± 0.15	35.44 ± 0.15	34.97 ± 0.25
	なし	35.12 ± 0.12	35.25 ± 0.13	35.04 ± 0.17
上腕皮膚温	あり	33.25 ± 0.11	33.36 ± 0.13 *	34.28 ± 0.44 *
	なし	33.52 ± 0.25	33.87 ± 0.26	34.86 ± 0.57
大腿皮膚温	あり	34.00 ± 0.20	33.96 ± 0.23	34.16 ± 0.36
	なし	34.26 ± 0.16	34.28 ± 0.23	34.38 ± 0.43
下腿皮膚温	あり	35.25 ± 0.03	40.76 ± 0.09	40.40 ± 0.29
	なし	35.28 ± 0.03	40.70 ± 0.09	40.61 ± 0.10

平均値±標準誤差, * : p<0.05 撥水加工条件間の有意差

は、時間経過に伴って、着衣条件間の温度差が拡大し、40分目および70分目において、「加工あり」の方が「加工なし」に比べ、有意に低い値を示した。

撥水加工の有無による平均皮膚温⁸⁾への影響を図2に示した。水温35°Cの水槽内への下腿浸漬

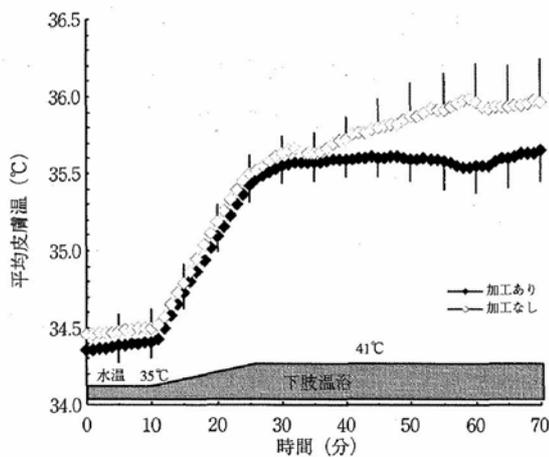


図2 撥水加工の有無による平均皮膚温への影響
平均値±標準誤差, * : p<0.05

開始時には、「加工あり」34.12 ± 0.14°C, 「加工なし」34.26 ± 0.15°Cであり、両者は近似した値を示した。その後、水温を41°Cへ上昇させて下腿温浴を続けると、両着衣条件とも、徐々に温度上昇した。「加工あり」は「加工なし」に比べ、有意に低値を示す結果が得られた。

直腸温、心拍数、平均血圧には着衣条件間に有意な差異は認められなかった。

図3は、撥水加工の有無による部位別皮膚血流量への影響を実験終了時において比較したもので

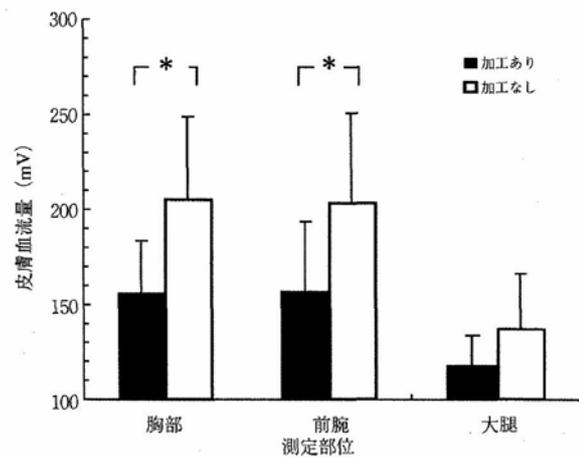


図3 撥水加工の有無による
部位別皮膚血流量への影響 (実験終了時)
平均値±標準誤差, * : p<0.05

ある。下肢温浴の開始前は、胸部、前腕、大腿、いずれの部位も低値であったが、温浴を続けると両着衣条件とも、徐々に増大する傾向が見られた。実験終了時の胸部皮膚血流量は、「加工あり」が157 ± 27mV, 「加工なし」では205 ± 44mVに至った。前腕部においては、「加工あり」で157 ± 36mV, 「加工なし」では204 ± 47mVまで増加した。胸部および前腕部においては、両条件間に有意差が認められた。大腿部も他の2部位同様、「加工あり」の方が低値を示す傾向にあったが、有意差は認められなかった。

撥水加工の有無による胸部局所発汗量への影響を図4に示した。両条件ともに、30分辺りから急激な増加が見られ、発汗発現が観察された。70分目においては、「加工あり」0.53 ± 0.14mg·cm⁻²·min⁻¹, 「加工なし」0.53 ± 0.16mg·cm⁻²·min⁻¹ま

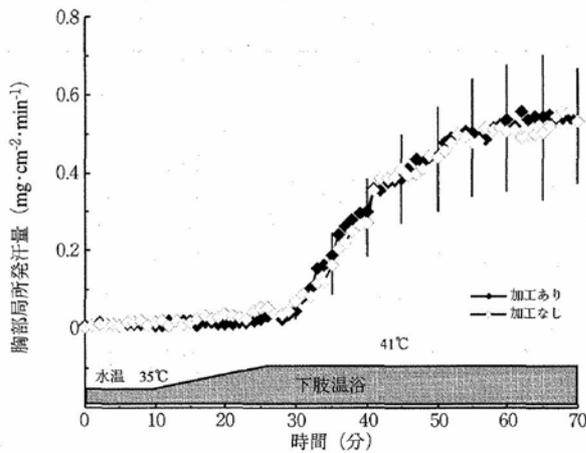


図4 撥水加工の有無による胸部局所発汗量への影響
 平均値±標準誤差, * : $p < 0.05$

で増大した。両者は近似した値を示し、有意な違いは確認されなかった。前腕局所発汗量も胸部同様、条件間に、顕著な違いは見られなかった。

胸部および前腕衣服内温度は、「加工あり」、「加工なし」いずれにおいても、30分を過ぎてから温度上昇する傾向が見られた。大腿ではほぼ一定の温度を維持し続けた。衣服内湿度は、両着衣条件とも、30分辺りから大きく上昇した後、測定終了まで高値を維持した。衣服表面温湿度においても、両条件間の差はほとんど認められなかった。

下肢温浴開始時の全身温冷感は、「どちらでもない」に近似した値を示していたが、徐々に暑熱側へ移行した。終了時には「非常に暑い」と「暑い」との間を申告した。しかし両条件間に明らかな違いはなかった。むれ感は「かなりむれる」に達し、ぬれ感は「かなりぬれている」に近い値を示した。湿潤感は「非常に湿っている」と「湿っている」の間、快適感は「かなり不快」と「不快」の間を申告した。「加工あり」の方が「加工なし」と比較して、やや強いむれ感、ぬれ感、湿潤感を申告する傾向が見られた。

3. 考察

撥水加工されたポロシャツ着用時において、皮

膚血流量（胸部、前腕）の増加が、未加工品着用時に比較して抑制されることが明らかになった（図3）。本研究においては、下肢温浴による温熱負荷によって、明らかに発汗が生じているため（図4）、これらの皮膚血流量増加は、皮膚血管収縮神経活動の緩和による受動的血管拡張ではなく、汗腺活動に伴う能動的皮膚血管拡張によるものであると考えられる。通常、能動的皮膚血管拡張の場合、血流量の変化は発汗量の変化と連動している^{9~10}。しかしながら、図4に示した局所発汗量の増加は、皮膚血流量の場合とは異なり、撥水加工の有無による明らかな違いは認められなかった。その理由として、本実験では、発汗測定に換気カプセル法を採用したことが一因であると考えられる。この手法では、皮膚表面に換気カプセルを固定し、内部を常に換気しているため、発汗が生じてもカプセル内部の皮膚は湿潤し難い。そのため衣服内でカプセル外部の皮膚は湿潤して高湿であっても、カプセル内部の皮膚のみ局所的に低湿であったものと推測される。さらに、本実験では、襟元や袖口等衣服の開口部を全て閉じて着用しているため、衣服と皮膚表面間に積極的な換気は生じていない。従って、カプセル外部の発汗している皮膚表面は衣服内湿度測定で得られた値よりも相当に高湿であったと考えるのが妥当であろう。図3に示すように、「加工あり」において皮膚血流の増加が抑制されたことは、図4の結果にも関わらず、発汗の抑制を伴ったものと推察される。撥水加工によって、多量の汗が衣服に吸水されず皮膚上に残留したため、相対的な発汗漸減（hidromeiosis）により、発汗が抑制された可能性が示唆される。

発汗漸減は、発汗持続時に、汗が皮膚に浸透して角質層を膨潤させ、汗腺導管の汗口を狭窄あるいは閉塞させるために、発汗量が徐々に減る現象であるといわれている¹¹）。アームバッグ法を用いて上肢を密閉し、皮膚表面を被覆すると、発汗

漸減が起こり、アームバッグを外すと、汗腺が再度活動を始めることも報告されている¹²⁾。従って、発汗漸減の発生は汗腺周囲の皮膚の湿潤程度と密接に関連すると推測されている。

表1のように、「加工あり」では、吸水性が低減しているため、実験前後のポロシャツ重量変化は4.5gであり、「加工なし」の11.5gと比較して、衣服に吸収された水分量が有意に少ないことを示した(図1)。本研究と同一のウェアを発汗マネキンに着用させた森下の実験結果¹³⁾においても、「加工あり」は「加工なし」と比較して、衣服に吸収された汗量が明らかに少なく、ヒトを対象とした本研究と一致した成果が得られている。

従って、「加工あり」では、汗腺から皮膚表面へ排出された汗が、繊維内部に移動せず、皮膚上に残留すると思われる。それらの汗が汗腺周囲の角質層を膨潤させ、発汗量の減少を引き起こしたのであろう。半袖ウェア着用時の報告¹⁴⁾によると、自転車運動によって $1.5 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ まで増大した局所発汗量は、運動終了後、即座に減少に転じ、終了10分後には、 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ を示した。しかし、同時に測定した衣服内湿度は、運動終了後も90%以上の高値を維持し続けた。本研究においても、発汗に伴って上昇した衣服内湿度は実験終了まで高く維持されたが、発汗量は減少していた可能性がある。その結果、撥水加工されたポロシャツに被覆された胸部および前腕では、皮膚血流の増加抑制が確認された(図3)。

「加工あり」「加工なし」着衣時ともに、下肢にはポリエステル素材の同一のハーフパンツを着用しており、大腿部の皮膚血流には上半身に着用したシャツの撥水加工の有無による影響は認められなかった(図3)。実験前後のハーフパンツ重量変化にも両着衣条件間に差異は認められなかった。従って、撥水加工の有無は、ポロシャツ直下の皮膚に対し、血流量の増加抑制をもたらすことが明らかになった。さらに「加工あり」で確認

された胸部や前腕皮膚血流量の増加抑制は、上腕においても生じていたと推察される。上腕は、表面積/容積比が高く、熱産生の高い臓器等の組織を含まない部位であるため、皮膚温が皮膚血流変動に強く影響されて変化する特性がある。従って、「加工あり」着用によって、上腕皮膚血流量の増加が抑えられたものと推察される。その結果、皮膚温上昇が抑制されたのであろう。一方、胸部は、表面積/容積比が低く、熱産生の高い組織を有する部位である。また、前腕は、皮膚血流変動の大きい手部からの静脈還流の影響を強く受ける特性を持っている¹⁵⁾。そのため、胸部および前腕皮膚温の変化は、各部位の皮膚血流のみならず、上述の因子に強く影響される。従って、両部位では、撥水加工の影響が皮膚血流量においては明らかになつたにも関わらず、皮膚温には表れなかったものと考えられる。以上の結果より、撥水加工を施したポロシャツに被われた上半身の皮膚に強い湿潤が生じ、皮膚血流量増加や皮膚温上昇が抑制されたと推察される。また、上腕で観察されたように、上半身における皮膚温上昇の抑制により、全身的な平均皮膚温の上昇も抑制されたものと考えられる(図2)。

一方、吸水性の高い「加工なし」においては、汗が繊維内に吸収されて皮膚表面に残留しないため、角質層は膨潤し難い状況であったと推察される。そのため、活発な汗腺活動が続き、皮膚血流増大や皮膚温上昇の抑制が起こらなかったのであろう。

身体活動の多くは発汗を伴うため、スポーツウェアには汗の不快感を軽減できるものが望ましいと考えられる。ウェア素材の水分移動特性の違いは着用者の体温調節反応に関与すると言われて^{1~6)}。しかし一方では、素材による影響はみられないという報告もなされている¹⁶⁾。小坂ら¹⁷⁾や乙益ら¹⁸⁾は、3種の布片(綿、絹、ナイロン素材)を用い、それらを非接触、部分接触、密着、

各々の状態で皮膚面に置いた際の発汗蒸発への影響について観察している。その結果、3種の素材間の違いよりも、布片と皮膚表面との接触度の違いが汗の蒸散に大きく影響することを報告している。本研究では、全ての実験においてウェアと皮膚を密着させて間隙をなくし、同時に全ての着衣の開口部を閉鎖するよう配慮した。衣服材料の特性評価を目的として、着用実験を遂行する際には、開口部の状態や、衣服と皮膚表面との間隙量など、目的とする材料特性以外の条件を統一して検討する必要がある^{1~3,19)}。

4. まとめ

撥水加工されたスポーツウェアが暑熱時の体温調節反応におよぼす影響を明らかにするために、女性被験者9名に70分間の下肢温浴を負荷した。被験者は、撥水加工を施されたウェアと未加工のもの、いずれかを着用した。その結果、「加工あり」は「加工なし」に比較し、衣服に残留した水分量が有意に少ないことが明らかになった。さらに、「加工あり」では、皮膚血流量（胸部、前腕）の増加が抑制され、上腕皮膚温や平均皮膚温上昇は低値を示した。直腸温や感覚応答には、加工の有無による顕著な違いは認められなかった。撥水加工されたウェアの着用は、皮膚の湿潤を招くことにより、皮膚血流量の増加を抑制することが示唆された。

謝 辞

稿を終えるにあたり、本研究に対して助成を賜りました（財）石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、本研究の実施にあたり、多大なご協力を賜りました（株）東洋紡総合研究所、福岡重紀氏、森下禄郎氏、河合貴美子氏に深謝致します。

最後に、被験者として快くご協力くださいました皆様に心より感謝申し上げます。

文 献

- 1) Tanaka K., Hirata K. and Kamata Y., Heat of sorption induced by sweating affects thermoregulatory responses during heat load. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 84, 69-77 (2001)
- 2) Tanaka K. and Hirata K., Effects of individual sweating response on changes in skin blood flow and temperature induced by heat of sorption wearing cotton ensemble. *J. Kor. Soc. Cloth. Ind.*, 2, 398-404 (2000)
- 3) Tanaka K. and Hirata K., Differential effects of cotton and polyester ensembles on changes in clothing surface temperature, skin temperature and skin blood flow during heat load. *J. Kor. Soc. Cloth. Ind.*, 2, 405-410 (2000)
- 4) 登倉尋實, 山下由果, 緑川知子, 寒冷下の運動時および運動直後の体温調節反応に与える衣服の影響, *デサントスポーツ科学*, 5, 102-113 (1984)
- 5) Hirabayashi-Yamashita Y., Hayashi C., Imamura R. and Tokura H., Sweat responses to pesticide-proof clothing influenced by textile materials, *Appl. Human Sci.*, 14, 141-147 (1995)
- 6) Ha M., Tokura H., Effects of two kinds of clothing made from hydrophobic and hydrophilic fabrics on local sweating rates at an ambient temperature of 37°C, *Ergonomics*, 38, 1445-1455 (1995)
- 7) 花田嘉代子, 三平和雄, 大幡久仁子, 婦人用下着類の熱抵抗の計測に関する研究, *織消誌*, 22, 430-437 (1981)
- 8) Ramanathan N.L., A new weighting system for mean surface temperature of the human body, *J. Appl. Physiol.*, 19:531-533 (1964)
- 9) Edholm O.G., Fox R.H. and Macpherson R.K., Vasomotor control of the cutaneous blood vessels in the human forearm, *J. Physiol. (Lond.)*, 139, 455-465 (1957)
- 10) Blair D.A., Glover W.E. and Roddie I.C., Vasodilator fibres to skin in the upper arm, calf and thigh, *J. Physiol. (Lond.)*, 153, 232-238 (1960)
- 11) 小川徳雄, 発汗活動に影響する中枢性および末梢性要因, *日本生理誌*, 48, 1 - 13 (1986)
- 12) Collins K.J. and Weiner J.S., Observation on ARM-BAG suppression of sweating and its relationship to thermal sweat-gland 'fatigue', *J. Physiol. (Lond.)*, 161, 538-556 (1962)
- 13) 森下禄郎, 高性能発汗マネキンによる衣服評価—

- 素材・加工の異なるポロシャツの評価ー, 織消誌, 45, 37-42 (2004)
- 14) 井上真理, 柳本周治, 桑原智子, 山田由佳子, 近藤徳彦, 環境の湿度変化がスポーツウェア着用時における運動時の体温調節反応に及ぼす影響, デサントスポーツ科学, 25, 49-61 (2004)
- 15) Hirata K., Tetsuo N. and Noda Y., Venous return from distal regions affects heat loss from the arms and legs during exercise-induced thermal loads, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 58, 865-872 (1989)
- 16) Gavin T.P., Baington J.P., Harms C.A., Ardelt M.E., Tanner D.A., Stager J.M., Clothing fabrics does not affect thermoregulation during exercise in moderate heat, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 33, 2124-2130 (2001)
- 17) 小坂光男, 大渡伸, 松本孝朗, 乙益絹代, 山内正毅, 換気カプセル法による布片被覆皮膚の発汗解析, デサントスポーツ科学, 15, 84-90 (1994)
- 18) Otomasu K., Yamauchi M., Ohwatari N., Matsumoto T., Tsuchiya K. and Kosaka M., Analysis of sweat evaporation from clothing materials by the ventilated sweat capsule method, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 76, 1-7 (1997)
- 19) 平田耕造, 上地歩美, 中野佳子, 田中絵美子, 吉田美奈子, 被服による皮膚圧迫が体温調節反応に及ぼす影響, デサントスポーツ科学, 24, 3-14 (2003)