

Perfusing a Tube-Lined Suits のスポーツ現場 応用に関する基礎的研究

京都工芸繊維大学 芳田 哲也
(共同研究者) 京都女子大学 中井 誠一
東京農業大学 高橋 英一
アムテック(株) 高橋 浩二

Perfusing a Tube-Lined Suits: Determination of an Optimal Perfused Water Temperature and its Application to Sports Activities

by

Tetsuya Yoshida
Kyoto Institute of Technology
Seiichi Nakai
Kyoto Women's University
Eiichi Takahashi
Tokyo University of Agriculture
Koji Takahashi
AMTEC CO., LTD.

ABSTRACT

To investigate the effects of clothing on thermoregulation, we analyzed the differences in temperature response between perfusing a tube-lined suits (PTLS) and fencing uniforms (FUT) during exercise in a hot environment, and determined an optimal

perfused water temperature in PTLs. Seven male subjects performed three sessions of 20-min cycle exercise at light intensity ($250\text{W}/\text{m}^2$) in a room maintained at $28\text{ }^\circ\text{C}$ (wet-bulb globe temperature, WBGT). Esophageal (T_{es}) and mean skin temperature (T_{sk}), heart rate (HR), cardiac output (\dot{Q}), oxygen uptake (\dot{V}_{O_2}), thermal sensation (TS), and dehydration (DEH) were measured under four conditions, with two sets of clothing, FUT and PTLs perfused water at 14 (PT14), 20 (PT20), and 26 (PT26) $^\circ\text{C}$. The T_{es} during exercise was significantly ($p<0.01$) higher in FUT than in other conditions. However, there was no significant difference in T_{es} between PT14, 20, and 26. The T_{sk} significantly ($p<0.01$) rose in FUT, and fell in PT14 ~ 26 according to the falling water temperature perfused in PTLs. The HR, TS and DEH were significantly ($p<0.01$) higher in FUT than in other conditions, and also significantly ($p<0.01$) higher in PT26 than in PT14 and 20 while these values were similar between PT14 and 20. The \dot{Q} and \dot{V}_{O_2} during exercise showed no significant difference between the four conditions. These results show that perfusing water at $20\text{ }^\circ\text{C}$ in PTLs was the most effective in cooling body temperature during light exercise in a hot environment. Thus, PTLs would be useful for athletes to prevent heat disorders during sports activities in heat.

要 旨

本研究は体温調節に与える着衣の影響を調査するため、perfusing a tube-lined suits (PTLS) とフェンシングユニフォーム (FUT) の高温環境下運動時の体温反応の差異を分析し、PTLSに環流する水の至適温度を決定した。男性7名の被験者はWBGT (wet-bulb globe temperature) : $28\text{ }^\circ\text{C}$ に設定した室内にて軽度負荷 ($250\text{W}/\text{m}^2$) による20分間の自転車漕ぎ運動を3回実施した。食道温 (T_{es})、平均皮膚温 (T_{sk})、心拍数 (HR)、心拍出量 (\dot{Q})、酸素摂取量 (\dot{V}_{O_2})、温冷感 (TS)、脱水量 (DEH) は①FUT着用時、およびPTLSを着用し② $14\text{ }^\circ\text{C}$ (PT14)、③ $20\text{ }^\circ\text{C}$ (PT20)、④ $26\text{ }^\circ\text{C}$ (PT26) の水を循環させた4条件について測定した。FUTの運動時による T_{es} は他の条件と比較して有意 ($p<0.01$) に高かった。しかし、

PT14, PT20, PT26による T_{es} には各条件間に有意差は認められなかった。FUTの T_{sk} は有意 ($p<0.01$) に上昇し、PT14 ~ 26では循環温度の低下に伴って有意 ($p<0.01$) に低下した。HR, TS, DEHについて、FUTは他の条件と比較して有意 ($p<0.01$) に高く、またPT26はPT14とPT20と比較して有意 ($p<0.01$) に高かったが、PT14とPT20は類似していた。 \dot{Q} と \dot{V}_{O_2} は4条件間に有意差は認められなかった。これらの結果は、高温環境下で軽度負荷による運動をPTLSを着用して実施した場合、 $20\text{ }^\circ\text{C}$ の水を循環させると最も効果的に体温を冷却していることを示す。このように、PTLSは高温環境でのスポーツ活動時に競技者の暑熱障害発生を予防するために有用であろう。

はじめに

Perfusing a tube-lined suit (以下PTLSと略す)

は一定温度の水が衣服に敷き詰められたチューブ内を循環する衣服であり、皮膚温を一定に保つことができるため環境生理学の研究や宇宙飛行士の訓練などで広く用いられている^{4), 8), 15)}。

一方、高温環境で実施される夏期スポーツ活動時には、多量の発汗により体液が損失し脱水や高温に陥る場合が多い。特に全身をユニフォームで覆うフェンシングや剣道等については運動時の熱放散が阻害されるため、夏期練習時にはトレーニング効果を減少させるだけでなく暑熱障害の発生が極めて高い。我々はこれまで夏期フェンシング練習時の発汗量や体温上昇について調査し、フェンシングユニフォーム (FU) 着用時の皮膚温や直腸温の上昇および発汗量はTシャツ、短パン着用時に比較して有意に高く、温熱ストレスが大きいことを報告した^{11), 12)}。

そこで、夏期練習時に低温の水を循環させたPTLSを着用し夏期練習を実施すると、トレーニング効果を向上させ、さらに暑熱障害の発生を激減させる可能性が考えられる。

本研究は、PTLSのスポーツ現場応用に関する基礎的資料を得ることを目的として、高温環境でPTLSを着用して運動を実施した場合の至適循環温度条件について、温熱生理学的応答から明らかにし、スポーツ現場の応用について検討した。

1. 方法

1.1 被験者

健康成人男子7名とした。被験者には実験の主旨を十分説明し、同意を得た上で実験に協力を依頼した。被験者の身体的特徴は身長：174 ± 2cm、体重：65.7 ± 2.7kg、体表面積：1.79 ± 0.03m²、体脂肪率：10.9 ± 1.2%である。体表面積はFujimoto and Watanabeの推定式²⁾、体脂肪率は皮下脂肪厚測定 (栄研式キャリパー) よりBrožek¹⁾およびNagamine and Suzuki¹⁰⁾の推定式を用いて算出した。

1.2 実験の手順

被験者は昼食を摂取せずに12:00に実験室へ来室し、30分以上座位にて安静した。裸体時体重を10g精度の体重計 (AND, FW-100K) を用いて測定した後、皮膚温測定用の熱電対および心拍数電極を装着してPTLS (アムテック社製) またはTシャツを着用し、その上からフェンシングユニフォーム (以下FUと略す) を着用した。最後に食道温測定用の熱電対を鼻より約42~44cm (身長¹⁾の1/4) 挿入した。また水を200ml飲ませてセンサーが食道に挿入されていることを確認し、食道温が36.7℃付近で安定した後、実験を開始した。環境温度と運動強度の設定に関して、中井たち¹²⁾は、フェンシング場の夏の環境温度 (黒球湿球温度、以下WBGT) は、およそ28℃、練習時の平均心拍数は105-106拍/分 (およそ30% $\dot{V}O_2\max$) であったことを報告している。したがって運動はWBGT: 28℃に設定した室内にて、20分間の安静値を測定した後、250W/m² (約30% $\dot{V}O_2\max$) の軽度負荷で20分間の自転車漕ぎ運動を5分の休憩を挟んで3回実施し、その後20分間回復させた。回復終了後に汗を十分拭き取り、再び裸体時体重を測定した。

1.3 着衣の素材と構成

1) FUは通称オペロンという伸縮性のある素材で作成され、手、頭部、下腿を除いて全身を覆う。本実験では下腿に野球用のアンダーストッキングを着用した。総重量は1.25kg。

2) PTLSの素材は50% KERMEL ARAMID、50% FR VISCOSEで伸縮性があり、手、足、顔を除き、頭部まで全身を覆う。また直径4mmのナイロンチューブが3~5cm間隔でスーツ全体に設置され、その長さの合計は、上半身 (頭部を含む) : 35.2m、下半身 : 22.4mである。水を循環させ場合の総重量は1.85kg。

1. 4 実験条件

実験はFUの下にTシャツを着用した場合（以下FUT）と、FUの下にPTLSを着用し14℃（以下PT14）、20℃（以下PT20）、および26℃（以下PT26）の水を循環させた4条件について実施した。頭部については、フェンシング用のマスクは着用せず、FUT条件では頭部のみのPTLSの水を循環させずに着用した。PTLSを着用した実験時には低温恒温水槽（井内、LTB-400）を用いて各温度に設定した水を、安静開始15分目より運動後の回復終了までシールレスキャンド循環ポンプ（Grundfos, USP 25-80 JA）を用いて1リットル/分で循環した。またポンプからPTLSへの水の流入口を上半身と下半身に分け、水が効率よく循環できるよう工夫した。

1. 5 測定項目

食道温、皮膚温（胸部、上腕部、大腿部）は熱電対を用いて30秒毎に測定し、平均皮膚温（ $0.43 \times \text{胸部} + 0.25 \times \text{上腕部} + 0.32 \times \text{大腿部}^{14)}$ ）と平均体温（ $0.9 \times \text{食道温} + 0.1 \times \text{平均皮膚温}^3$ ）を算出した。心拍数（日本光電、BSM-7200）、酸素摂取量（バイズメディカル、METS900）は1分ごと、温冷感は1（かなり寒い）から9（かなり暑い）までのスケール^{6,7}を用いて5分ごとに測定した。心拍出量はCO₂再呼吸法（CO₂平衡法⁵）により各運動時の13～17分に3回測定し、その平均値を各運動時の値とした。また熱電対を①ポンプからPTLSへの水の流入口と、②上半身、および③下半身のPTLSを循環して低温恒温水槽に戻る水の出口に設置し、PTLS着用時による水の循環温度を測定した。さらに実験前後の体重の変化より運動時の脱水量を算出した。

1. 6 統計処理

各測定項目の経時変化については、まず4条件間でTwo-way repeated measures ANOVA (2-

within factors) を実施し、有意差が認められた場合には、FUTとPTLSを着用した条件の間で有意差を検定した。さらにPTLSを着用した条件間（PT14, 20, 26）のみについても同様の統計処理を実施し、3条件間の有意差を検定した。脱水量の検定についてはOne-way repeated measures ANOVA (1-within factors) を用いた。いずれの場合についても $p < 0.05$ を有意水準とした。

2. 結果

2. 1 水温

水の循環開始（安静開始15分目）より終了までの水の平均循環温度を表1に示した。ポンプからPTLSへの水の流入口（IN）の温度は設定温度を維持できたが、PTLSを循環して低温恒温水槽に戻る出口の水温は、INに比較して上半身側出口（OUT-U）および下半身側出口（OUT-L）共に有意（ $p < 0.01$ ）に高く、さらにOUT-UはOUT-Lに比較して有意（ $p < 0.01$ ）に高かった。

表1 水の平均循環温度

Conditions	IN (°C)	OUT-U (°C)	OUT-L (°C)
PT14	14.68 ± 0.32	20.52 ± 0.48	18.11 ± 0.30
PT20	20.32 ± 0.21	24.54 ± 0.24	22.86 ± 0.22
PT26	26.41 ± 0.37	29.10 ± 0.32	27.99 ± 0.30

IN, ポンプよりPTLSの入り口；OUT-U, 上半身側の出口；OUT-L, 下半身側の出口；PT14, PT20, PT26はそれぞれ14℃, 20℃, 26℃の水を循環させた条件を示す。値は平均±標準偏差

2. 2 体温変動

図1に食道温、平均皮膚温、平均体温の変動を5分ごとの平均値で示した。各測定項目共にFUTはPTLSを着用した3条件よりも有意（ $p < 0.001$ ）に高かった。特にFUTの食道温は運動回数（図中Ex-1～3）の増加に伴って顕著に上昇したが、PTLSを着用した3条件では運動回数の増加に伴う食道温上昇は見られず、さらに3条件間で顕著な差は認められなかった。また、平均皮膚温は水の循環温度の低下に伴って有意（ $p < 0.001$ ）に低下したが、平均体温については3回目の運動時

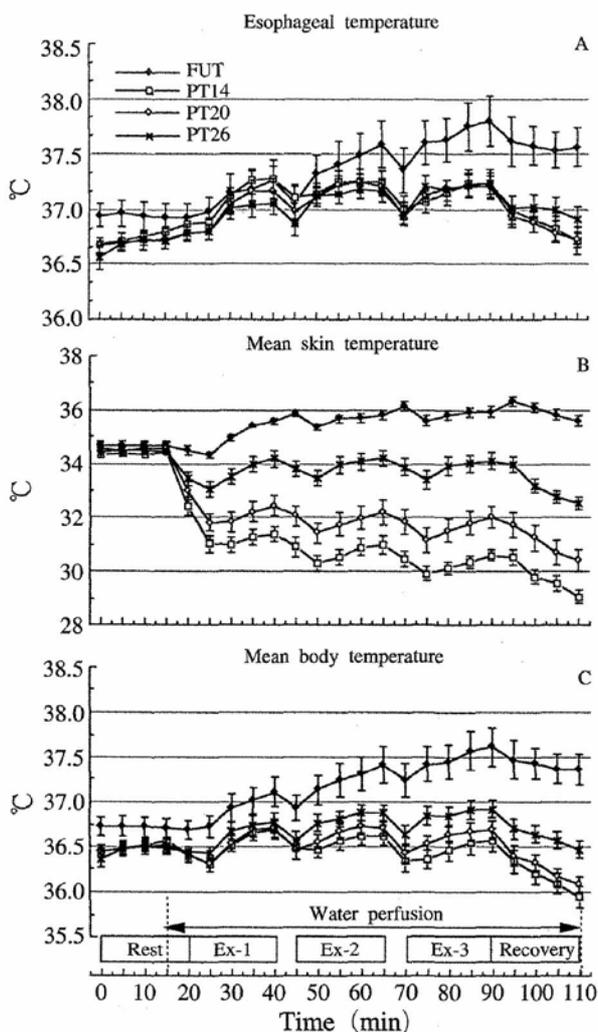


図1 食道温 (A), 平均皮膚温 (B), 平均体温 (C) の経時変化

図中FUTはフェンシングユニフォーム着用時, PT14, PT20, PT26はそれぞれperfusing a tube-lined suitを着用して14, 20, 26℃の水を循環させた条件を示す。

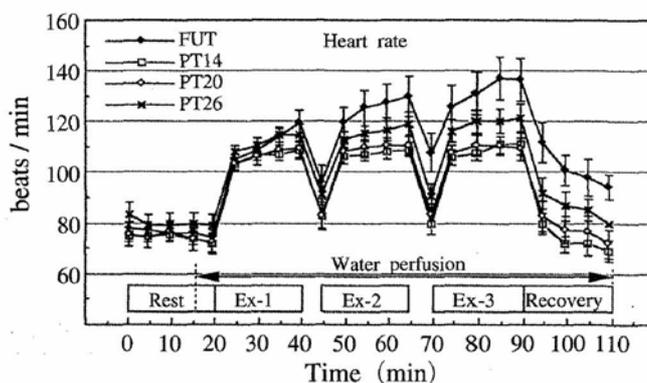


図2 心拍数の変化

図中FUTはフェンシングユニフォーム着用時, PT14, PT20, PT26はそれぞれperfusing a tube-lined suitを着用して14, 20, 26℃の水を循環させた条件を示す。

(Ex-3) にPTLSを着用した3条件間で有意差 ($p < 0.01$) が認められ, PT14, PT20, PT26の順で低値を示した。

2. 3 心拍数と温冷感

図2は心拍数の変動を示した。FUTの運動時心拍数は他の条件に比較して運動2回目 (Ex-2) 以降に有意 ($p < 0.01$) に高かった。しかし, PTLSを着用したPT14とPT20の心拍数は類似した傾向を示し, 両者の間に有意差は認められなかった。図3に示した温冷感についてもFUTは他の条件に比較して有意 ($p < 0.01$) に高かったが, PTLSを着用したPT14とPT20の温冷感は運動3回目

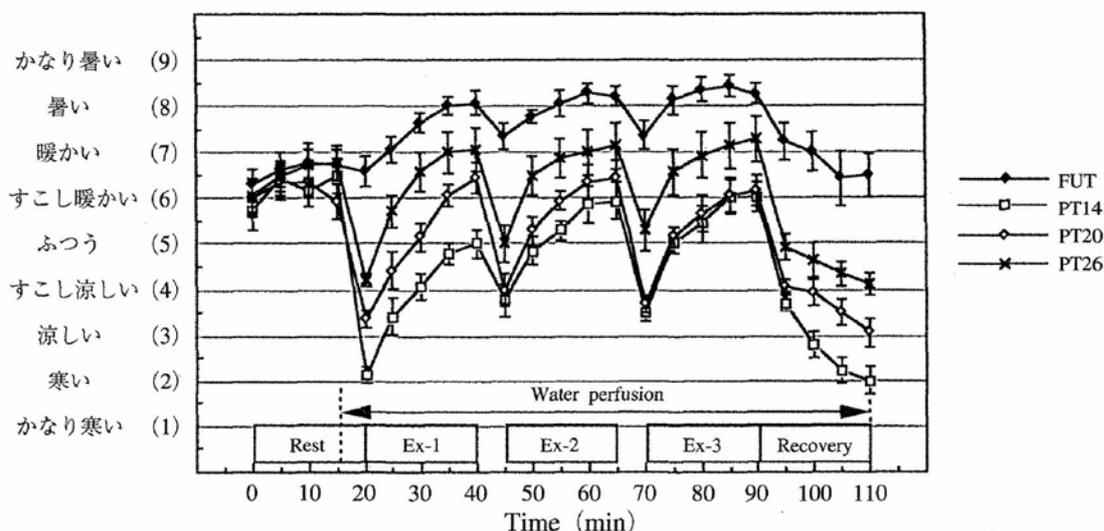


図3 温冷感の変化

図中FUTはフェンシングユニフォーム着用時, PT14, PT20, PT26はそれぞれperfusing a tube-lined suitを着用して14, 20, 26℃の水を循環させた条件を示す。

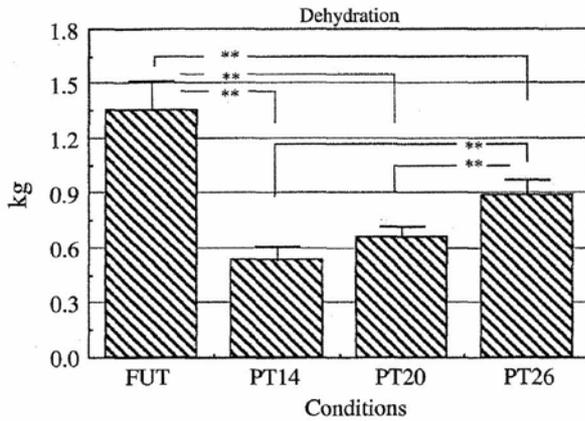


図4 各実験条件による脱水量の比較
 図中FUTはフェンシングユニフォーム着用時, PT14, PT20, PT26,はそれぞれperfusing a tube-lined suitを着用して14, 20, 26℃の水を循環させた条件を示す.
 **, p<0.001

(Ex-3) に類似した傾向を示した。

2. 4 脱水量

図4は実験前後の体重測定より算出した脱水量を示した。FUTの脱水量は他の条件に比較して有意 (p<0.01) に高値を示した。また, PTLsを着用したPT26は, PT14およびPT20と比較して有意 (p<0.01) に高値を示したが, PT14とPT20の間には有意差は認められなかった。

2. 5 酸素摂取量と心拍出量

運動時の酸素摂取量および心拍出量は, 運動回数 (Ex-1 ~ Ex-3) や着衣条件の間で有意な変化が認められなかった。

3. 考察

本実験におけるFUTの食道温は運動回数 (Ex-1 ~ 3) の増加に伴って顕著に上昇したが, PTLsを着用した3条件では運動回数の増加に伴う食道温上昇は見られず, さらに3条件間で顕著な差は認められなかった。5℃~30℃ (乾球温) の環境温度では運動時の直腸温度の上昇は同程度であるが, 環境温度がある範囲をこえれば, 深部体温の上昇は運動強度や環境温度の影響を受ける¹³⁾。PTLSを着用した場合の循環温度は14℃~26℃

であり, この範囲であれば食道温の上昇が同程度であったことは予想された結果である。また, 換言すれば, PTLsを着用したいずれの循環温度においても深部体温の維持は可能であることが示唆される。

しかしPTLSを着用した条件間では, PT26による平均体温や心拍数, 温冷感 PT14やPT20に比較して上昇が大きく, 脱水量についてもPT26はPTLSを着用した他の2条件よりも有意に多かった。またPT14とPT20の脱水量には有意差は認められず, 両者の平均体温, 心拍数, 温冷感の傾向は類似していた。したがって, WBGT28℃の環境で250W/m² (約30% $\dot{V}O_{2max}$) の軽度負荷運動をPTLSを着用して実施した場合には水の循環温度を14℃まで低下させなくても, 20℃程度に設定することで効率よく体温を冷却できることが考えられる。

中井たち¹²⁾は夏のフェンシング練習時の心拍数を測定し, Tシャツ短パン時の練習では106.3±8.8拍/分, FU着用時でも105.3±7.1拍/分であり着衣による心拍数の変動には有意な差異は認められないことを報告している。しかし, 本研究ではFUTの心拍数はPTLSを着用した条件に比較し有意に高値を示した。おそらく, 実際の夏期フェンシング練習では運動強度を自主的に低下させたり, 休息を積極的に取り入れるなど, FU着用による暑さを軽減させる対策を実施していることが推察される。

高温環境下での運動時には熱放散を上昇させるために皮膚血流量が増加し, 心拍数も増加する。これは, 皮膚血管拡張により心臓への環流血液量が減少して一回拍出量が減少するため, それを補うため心臓は拍動回数を増加して心拍出量を維持しようとしていると考えられている⁹⁾。したがって運動時の心拍出量は環境温度の変化に影響されず, ほぼ一定の値を維持する¹⁶⁾。本研究の心拍出量は運動回数 (Ex-1 ~ 3) や着衣条件の間で有

意差が認められず、一定の値を示した。

結 語

WBGT: 28℃の環境で250W/m²(約30% $\dot{V}O_{2\max}$)の軽度負荷運動をPTLSを着用して実施した場合の水の至適循環温度は、20℃程度であることが結論された。今後、中等度(約50% $\dot{V}O_{2\max}$)の運動負荷におけるPTLS着用時の生体反応や至適循環温度、さらにスポーツ現場に應用可能な持ち運びが便利で動きやすいPTLSの開発について検討する必要がある。しかし、通気性の悪いユニフォームを着用して夏期練習を実施する競技者において、PTLSを着用して練習を実施するとトレーニング効果を向上させ、暑熱障害の発生を激減できる可能性は十分考えられる。

謝 辞

本研究は石本記念デサントスポーツ科学振興財団の助成によるものである。ここに記して深甚なる謝意を示す。

文 献

- 1) Brožek, J., Grande, F., Anderson, J. T., and Keys, A.; Densitometric analysis of body composition: revision of some quantitative assumptions. *Annals of New York Academy of Sciences*, 110, 113-140 (1963)
- 2) Fujimoto S., and Watanabe T.; Studies on the body surface area of Japanese. *Acta Med. Nagasaki*, 14, 1-13 (1969)
- 3) Gagge, A. P. and Nishi, Y.; Heat exchange between human skin surface and thermal environments. In: Handbook of Physiology. Reactions to Environmental Agents (ed. D. H. K. Lee), sect. 9, chap. 5, pp 69-72. *Am. Physiol. Soc.*, Bethesda, Md (1977)
- 4) Johnson, J. M., Niederberger, M., Rowell, L. B., Eisman, M. M., and Brengelman; G. L.; Competition between cutaneous vasodilator and vasoconstrictor reflexes in man. *J. Appl. Physiol.* 35 (6) :798-803 (1973)
- 5) Jones, N; Clinical exercise testing, W. B. Saunders Co.p192-196 (1988)
- 6) 櫻村修生; 気流と気温が持久的運動時の生理学的反応および温冷感に与える影響. 日生氣誌, 22 (2), 73-81 (1985)
- 7) 櫻村修生; 持久的運動時における温冷感の変動. 体力科学, 35 (5) 264-269 (1986)
- 8) Kellogg, D. L. JR., Johnson, J. M., and Kosiba, W. A.; Control of internal temperature threshold for active cutaneous vasodilation by dynamic exercise. *J. Appl. Physiol.* 71 (6) 2476-2482 (1991)
- 9) 宮下充正, 石井喜八編; 運動生理学概論, 大修館書店, p250 (1983)
- 10) Nagamine, S., and Suzuki, S.; Anthropometry and body composition of Japanese young men and women. *Human Biology*, 36, 8-15 (1964)
- 11) 中井誠一, 新矢博美, 高橋英一, 芳田哲也, 寄本明; 運動時体温上昇に及ぼす着衣の影響, 第56回日本体力医学会大会予稿集p267 (2000)
- 12) 中井誠一, 新矢博美, 高橋英一; 高温環境下におけるフェンシング実施時の体温調節反応に及ぼす着衣の影響, デサントスポーツ科学, 21, 122-129 (1999)
- 13) 中山昭雄編 (1981) 温熱生理学, 理工学社, p433-436.
- 14) Roberts, M. F., Wenger, C. B., Stolwijk, J. A. J., and Nadel, E. R.; Skin blood flow and sweating changes following exercise training and heat acclimation, *J. Appl. Physiol.*, 43, 133-137 (1977)
- 15) Rowell, L. B., Murray, J. A., Brengelmann, G. L., and Kraning K. K. II; Human cardiovascular adjustments to rapid changes in skin temperature during exercise. *Circulation Reserch*, 24, 711-724 (1969)
- 16) Willmore, J. H., and Costill, D. L.; Physiology of sports and exercise, *Human Kinetics*, p249 (1994)