

# 運動時の温熱ストレスを軽減するための 冷却部位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  
同 新矢 博美  
京都エル技研 高橋 浩二

## Determination of Optimal Cooling Area of the Body Surface to Reduce Exercise-Heat Stress

by

Tetsuya Yoshida  
*Kyoto Institute of Technology*  
Seiichi Nakai, Hiromi Shin-ya  
*Kyoto Women's University*  
Koji Takahashi  
*Kyoto L Giken*

### ABSTRACT

To determine the optimal cooling area of the body surface to reduce exercise-heat stress, the effects of various body surface areas being cooled by perfusion of a tube-lined suit (PTLS) on thermoregulatory responses was evaluated during exercise in a hot environment. Seven male subjects performed three sessions of 20-min cycle exercise at light intensity ( $250\text{W/m}^2$ ) in a room maintained at  $30^\circ\text{C}$ . The subjects were dressed in clothing with low moisture permeability (rain coat) over PTLS covering whole body surface except for the face, hands, and feet. Esophageal ( $T_{es}$ ), deep thigh ( $T_{core}$ ) and mean skin temperature ( $\bar{T}_{sk}$ ), heart rate (HR), skin blood flow (SkBF), thermal sensation (TS), and dehydration (DEH) were measured under six conditions under various body surface

cooling conditions ; 1) whole body (WHO), 2) upper body (UP), 3) lower body (LOW), 4) lower body except lower leg (THI), 5) head and neck (HN), and 6) no body cooling (NO). Coolant temperature at the inlet was 20 °C for all conditions. The  $T_{es}$ ,  $T_{core}$ , and HR during exercise were significantly ( $p < 0.01$ ) higher in NO and HN, and  $SkBF$  and  $DEH$  were significantly ( $p < 0.01$ ) lower in WHO than in other conditions. However, there was a similar tendency in  $T_{es}$  between WHO, UP, THI, and LOW, and  $T_{core}$  in UP was significantly ( $p < 0.01$ ) higher than that in WHO, THI, and LOW. In comparison with resting level,  $\bar{T}_{sk}$  and  $TS$  significantly ( $p < 0.01$ ) rose in NO and HN, and fell in UP and WHO, but remained constant in THI and LOW during exercise. These results suggest that upper body surface cooling is able to maintain high  $T_{core}$  while  $T_{es}$ ,  $T_{sk}$ , and  $TS$  are as low as those with whole body cooling during exercise in a hot environment.

## 要 旨

本研究は運動時の温熱ストレス軽減のための最適な冷却部位について検討するため、チューブ水循環スーツ（以下PTLS）を用いて身体の各部位を冷却した時の暑熱下（30 °C）運動時における体温調節反応を評価した。男性7名の被験者は手・足・顔以外全身を覆うPTLSの上に汗の蒸発を防ぐレインコートを着用し、軽度負荷（250W/m<sup>2</sup>）による20分間の自転車漕ぎ運動を3回実施した。食道温（ $T_{es}$ ）、大腿部深部温（ $T_{core}$ ）、平均皮膚温（ $\bar{T}_{sk}$ ）、心拍数（HR）、皮膚血流（ $SkBF$ ）、温冷感（ $TS$ ）、脱水量（ $DEH$ ）は身体各部位を冷却した6条件；1) 全身（WHO）、2) 上半身（UP）、3) 下半身（LOW）、4) 下腿を除く下半身（THI）、5) 頭部・頸部（HN）、6) 冷却なし（NO）について測定した。なお水の循環温度は20 °Cとした。運動時による $T_{es}$ 、 $T_{core}$ 、HRはNOとHNが他の条件に比較して有意（ $p < 0.01$ ）に高く、 $SkBF$ と $DEH$ はWHOが有意（ $p < 0.01$ ）に低かった。しかし、WHO、UP、THI、LOWの $T_{es}$ は同様の傾向を示し、UPの $T_{core}$ はWHO、THI、LOWよりも有意（ $p < 0.01$ ）に高かった。また $\bar{T}_{sk}$ と $TS$ を安静時と比較すると、運動

時においてNOとHNは有意（ $p < 0.01$ ）に上昇し、WHOとUPでは有意（ $p < 0.01$ ）に低下したが、THIとLOWには顕著な変動が見られなかった。以上の結果から、上半身冷却は運動時の $T_{es}$ 、 $\bar{T}_{sk}$ 、 $TS$ を全身冷却と同様に低下させて、 $T_{core}$ を高く維持できることが示唆された。

## はじめに

著者たちはこれまでスポーツ現場の実態調査や実験的研究から、安全のために全身を覆うスポーツウェアの着用が皮膚温の上昇を導き、それらが温熱ストレスの増加に起因することを明らかにした<sup>5-7)</sup>。さらに運動時における皮膚温低下の方策について水循環スーツ（以下PTLS）<sup>8)</sup>やベストの有用性を検討し、運動時の全身冷却は体幹のみの冷却より効果的に体温上昇を抑制できることを示した<sup>10)</sup>。しかし四肢等の活動筋周囲を過度に冷却することは筋温低下が予想されることから、体温上昇抑制には効果的であるが運動能力を阻害する可能性がある<sup>9)</sup>。そこで本研究では、暑熱下運動時における体温上昇抑制のための冷却部位に関する基礎的実験を実施し、温熱ストレスを軽減し、かつ筋温を維持して運動能力低下を抑制できる効果的な冷却部位について検討することを目的

とした。

## 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：170 ± 2cm、体重：62.1 ± 2.7kg、体表面積：1.67 ± 0.04m<sup>2</sup>である。体表面積はFujimoto and Watanabe<sup>1)</sup>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正午に実験室へ入室し、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を着用し、その上に蒸散性熱放散を阻害する衣服(レインコート)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<sup>1</sup>/<sub>4</sub>)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事を確認し、食道温が36.7℃付近で安定した後、実験を開始した。運動は30℃に設定した室内にて、20分間の安静値を測定した後、エネルギー消費量が250W/m<sup>2</sup>(約30%  $\dot{V}O_{2max}$ )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10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

PTLSの素材は50% KERMEL ARAMID(ケルメルアラミド)、50%FR VISCOSE(フランスビスコース)で伸縮性があり、手、足、顔を除き、頭部・頸部まで全身を覆う。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、水を循環させた

場合の総重量は1.85kgである。レインコートは100%EVA(エチレンビニールアセテート)、総重量は0.35kgであり、本実験では足から熱放散を防ぐために野球用のアンダーストッキングを着用した。

### 1.4 実験条件

実験時には低温恒温水槽(井内, LTB-400)を用いて20℃に設定した水を、安静開始15分目より運動後の回復終了(100分)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PTLSに循環した。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。水循環部位は①頭部・頸部(HN)、②頭部、体幹、上肢を含む上半身(UP)、③大腿、下腿、臀部、腰部の下半身(LOW)、④臀部、腰部、大腿の活動筋周囲(THI)、⑤全身(WHO)とし、⑥冷却なし(NO)を加えた6条件を設定した。

### 1.5 測定項目

食道温(Tes)、皮膚温(額、胸、腹、上腕、前腕、大腿、下腿)は熱電対を用いて30秒毎に測定し、7部位の皮膚温から平均皮膚温( $\bar{T}_{sk}$ )をNadel, et al.<sup>4)</sup>の算出式より求めた。また大腿部の深部温(Tcore)は熱流補償法による深部温度計(テルモCTM-205)を、前腕の皮膚血流(SkBF)はレーザー組織血流計(オメガ FLO-C1)を用いて30秒毎に測定した。心拍数(HR)はベッドサイドモニター(日本光電, BSM-7200)を用いて1分毎、温冷感(TS)は1(かなり寒い)から9(かなり暑い)までの9段階のスケール<sup>2, 3)</sup>を用いて5分毎に被験者に自己申告させた。また熱電対をポンプからPTLSへの水の流入口と、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変化を測定した。さらに実験前後の体重の変化より運動時の脱水量(DEH)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6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、各条件の間でFisherのLSDテストにより有意差を検定した。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

PTLS への水の流入口と出口との平均温度差 ( $\Delta$ °C) は、HN:1.33  $\pm$  0.08, THI:2.94  $\pm$  0.10, LOW:3.79  $\pm$  0.15, UP:4.38  $\pm$  0.08, WHOの上半身:3.46  $\pm$  0.11, WHOの下半身:2.92  $\pm$  0.09°Cであり、WHOの下半身とTHIの間には有意差は認められなかったが、それらを除く全ての実験条件間で有意差 ( $p < 0.05$ ) が認められた。

### 2. 2 体温変動

図1に上段よりTes, Tcore,  $\bar{T}_{sk}$ の変動を5分毎の平均値で示した。TesとTcoreは各条件共に運動時に上昇した。特にNOとHNのTesとTcoreは運動回数(Exercise-1~3)の増加に伴って顕著に上昇しExercise-2以降において他の条件に比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に高値を示したが、HNはNOよりも有意 ( $P < 0.05$ ) に低値であった。3回目の運動時(Exercise-3)には、LOW, WHO, UP, THIのTesは同様の傾向を示し、TcoreについてもLOW, WHO, THIは同様であったが、UPのTcoreはLOW, WHO, THIに比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に高値を示した。運動時の $\bar{T}_{sk}$ は安静時に比較してNOとHNは上昇しWHOとUPは低下したが、LOWとTHIは顕著な変動は見られなかった。

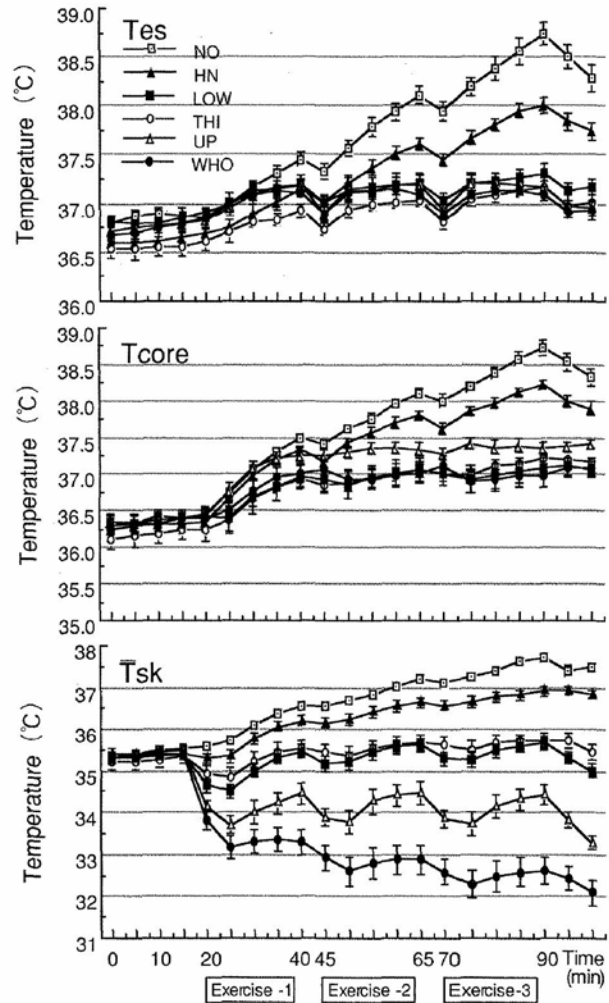


図1 各部位を冷却したときの運動時における食道温 (Tes), 大腿深部温 (Tcore), 平均皮膚温 ( $\bar{T}_{sk}$ ) の変動

### 2. 3 心拍数 (HR) ・皮膚血流 (SkBF) ・温冷感 (TS)

図2は上段よりHR, SkBF, TSの変動を5分毎の平均値で示した。運動時のHRについて、NOとHNは他の条件に比較してExercise-2以降に有意 ( $p < 0.05$ ) に高値を示し、WHOは有意 ( $p < 0.05$ ) に低値であったが、UPはWHOと同様の傾向を示した。図2中段は安静時の平均値を1とした場合のSkBFの変動を示した。WHOによる運動時のSkBFは他の条件に比較していずれの運動時(Exercise1~3)においても有意に低値であった。運動時のTSは安静時に比較してNOとHNは上昇しWHOとUPは低下したが、LOWとTHIのExercise-3では安静時と同様の傾向を示した。

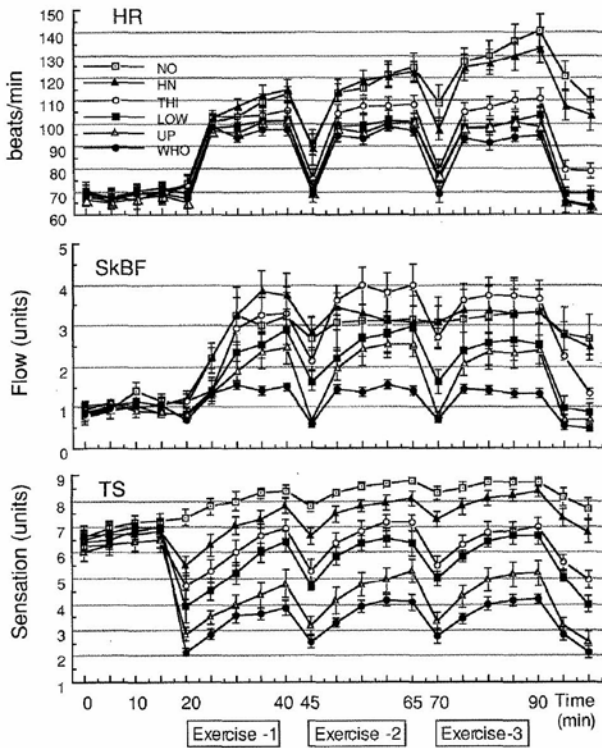


図2 各部位を冷却したときの運動時における心拍数 (HR), 皮膚血流 (SkBF), 温冷感 (TS) の変動

## 2. 4 脱水量 (DEH)

図3は実験前後の体重測定より算出したDEHを示した。NOとHNのDEHは他の条件に比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に高値を示し、WHOは有意 ( $p < 0.05$ ) に低値を示したが、LOW, UP, THIは同様の傾向を示した。

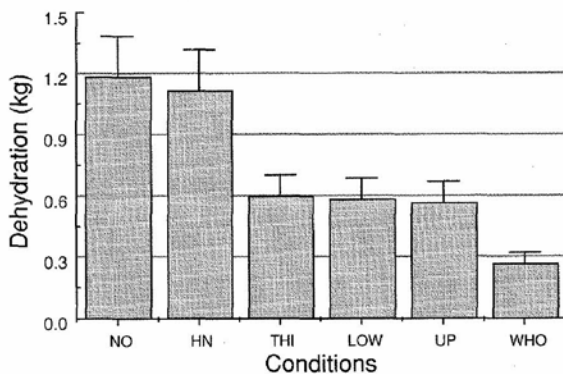


図3 各部位を冷却したときの脱水量

## 3. 考 察

### 3. 1 頭部・頸部の冷却効果

本実験におけるNOとHNのTesとTcoreは運動

回数 (Ex-1~3) の増加に伴って顕著に上昇したが、HNはNOよりも有意 ( $P < 0.05$ ) に低かった。また各測定値のNOとWHOとの差を100としてHNの冷却効果を%で示すと、Tes : 44%, Tcore : 30%,  $\bar{T}_{sk}$  : 16%, HR : 16%, TS : 9%であった。したがって運動時の頭部・頸部冷却において、TesやTcore等の深部体温の冷却効果は全身冷却の約1/3で、 $\bar{T}_{sk}$ やHR, TSに対する抑制効果は少ないことが示唆された。

### 3. 2 活動筋周囲の冷却効果

大腿や臀部周囲は自転車漕ぎ運動時の熱産生部位となる主動筋が多く存在するため、本研究ではその周辺 (THI) から下半身 (LOW), さらに全身 (WHO) 冷却時による体温調節反応の差異について検討した。その結果、THIとLOWのDEHはWHOよりも高かったが、運動時のTesとTcoreについてはTHI, LOW, WHOの間で顕著な差は認められなかったことから、活動筋周囲の冷却は全身冷却と同様の体温抑制効果が認められ、運動時の体温上昇を効果的に抑制できる部位であることが立証できた。

### 3. 3 上半身冷却の効果

活動筋周囲を過度に冷却することは体温上昇抑制には効果的であるが、活動筋温の低下を導くので運動能力を阻害する可能性がある<sup>9)</sup>。そこで、本研究では活動筋以外の上半身 (UP) の冷却効果について検討した。運動時のTcoreは上半身を冷却したUPが活動筋周囲から全身を冷却したLOW, WHO, THIの条件よりもExercise-2以降に有意 ( $P < 0.05$ ) に高値を示したが、Exercise-3ではUPのTesはLOW, WHO, THIと顕著な差は認められなかった。また運動時におけるHR, SkBF, DEHについても、UPはLOWやTHIによる活動筋周囲の冷却と顕著な差異は見られず、特にTSや $\bar{T}_{sk}$ はLOWやTHIよりも低値を示した。した

がって上半身冷却 (UP) は Tcore を高く維持しながら  $\bar{T}_{sk}$  や TS の上昇を抑制し, 運動時の DEH や HR, Tes を活動筋周囲冷却と同程度に維持できることが示された。

各実験条件の PTLs による冷却面積比率 (全体表面積を 100 とした場合の%) を渡辺<sup>11)</sup> による被服面積の実測値から計算すると, HN:7%, THI:32%, LOW:42%, UP:45%, WHO:87% であり, UP が WHO に次いで冷却面積が広がった。また PTLs への水の流入口と出口との平均温度差 ( $\Delta T$ ) についても UP が最も大きかったことから, PTLs による UP の熱抽出は HN, THI, LOW に比較して高いことが考えられる。今後, 上半身と下半身冷却による熱抽出量を同程度にした際の生体反応の差異について検討する必要がある。

著者たち<sup>10)</sup> は全体表面積の約 25% を占める体幹を PTLs により冷却した場合, 運動時の深部体温上昇を有意に抑制できないことを報告した。このことから, 上半身の中でも体温上昇を顕著に抑制できる冷却部位は体幹よりも頭部・頸部や上肢であることが考えられる。

以上のように, 活動筋周囲の体温を維持し, かつ温熱ストレスを軽減できる冷却部位は上半身であることが示唆された。

## 結 語

本研究は運動時の温熱ストレス軽減のための最適な冷却部位について検討するため, PTLs を用いて身体各部位を冷却した時の暑熱下 (30℃) 運動時における体温調節反応を評価した。その結果, 1) 頭部・頸部冷却は全身冷却と比べて約 1/3 の体温冷却効果があり, 2) 活動筋周囲の冷却は全身冷却と同程度の体温冷却効果が認められ, 3) 上半身冷却は活動筋周囲の Tcore を高く維持しながら  $\bar{T}_{sk}$  や TS の上昇を抑制し, 運動時の Tes を活動筋周囲冷却と同程度に維持できることが示さ

れた。したがって活動筋周囲の体温を維持し, かつ温熱ストレスを軽減できる冷却部位は上半身であることが示唆された。

## 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) Fujimoto S, and Watanabe T.; Studies on the body surface area of Japanese. *Acta Med. Nagasaki* 14: 1-13 (1969)
- 2) 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)
- 3) 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)
- 4) Nadel, E. R., Mitchell, J. W., and Stolwijk, J. A. J.; Differential thermal sensitivity in the human skin. *J. Pflüger Arch.*, 340, 71-76 (1973)
- 5) 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)
- 6) 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)
- 7) Shin-ya, H., et al.; Effects of sports wear on thermoregulatory responses during exercise in a hot environment. *Environmental Ergonomics* X:119-122 (2002)
- 8) 芳田哲也, 中井誠一, 他; Perfusing a tube-lined suits のスポーツ現場応用に関する基礎的研究, *デサントスポーツ科学*, 22, 41-47 (2001)
- 9) 芳田哲也; 寒冷下での運動とトレーニング, 新運動生理学 下巻 (宮村実晴編), 真興交易 (株) 医書出版, 東京, 273-280 (2001)
- 10) Yoshida, T., et al.; The effects of water perfused suits and vests on body cooling during exercise in a hot environment. *Environmental Ergonomics* X:113-117 (2002)
- 11) 渡辺ミチ; 被服面積のニ, 三の実測値について, *被服学会誌*, 2 (2) 7-11 (1958)