

暑熱環境下における熱中症予防のための クーリング方策に関する研究

京都女子大学 諸岡晴美
(共同研究者) 京都女子大学大学院 坂下理穂
同 加藤礼菜
富山県産業技術 中橋美幸
研究開発センター

Cooling Method for Preventing Heat Strokes in Hot Environments

by

Harumi Morooka
Kyoto Women's University
Riho Sakashita, Reina Kato
Graduate School of Kyoto Women's University
Miyuki Nakahashi
Toyama Industrial Technology
Research and Development Center

ABSTRACT

In this study, to develop a simple and practical cooling method for hot environments, a vest was designed by incorporating a highly absorbent batting material and a moisture-permeable and waterproof fabric as the cover fabric. The authors have named this vest as the “cooling vest.” Three types of clothing styles were examined: T-shirts (sample T), T-shirts and a jacket with two small fans (sample TA), and T-shirts, the cooling vest, and a jacket with two small fans (sample TVA). Five female subjects aged 21-27 years were engaged for the study. The experiments were performed in an environment having a temperature of 32°C. Following parameters were measured

through the wearing experiments: sweating rate, clothing temperature and humidity, oral temperature, skin temperature, and heart rate. Obtained results indicate that compared to the other samples, skin temperature, clothing temperature, and sweating rate tend to be lower in the case of sample TVA. The effect of sample TVA on heart rate and oral temperature could not be observed because the duration of wearing time was very short (15 min). Additionally, subjective evaluation suggests that sample TVA is comfortable to wear and feels cool. These results can be attributed to the release of water vapor from the cooling vest and enhanced evaporation caused by the fans. Furthermore, while conducting the wearing experiments, clothing humidity increased owing to the evaporation of water vapor from the cooling vest, but the corresponding evaluation score for humid sensation didn't decrease. Hence, it can be concluded that by employing the cooling vest along with a jacket having fans, the loss of latent heat can be increased without causing excessive sweating.

要 旨

暑熱下における簡便で実用的なクーリング方策を提案することを目的として、本研究では、透湿防水布を側地として、中綿に高吸収素材を用いた冷却ベストを作製し、衣服内温湿度および生理反応に及ぼす影響を検討した。

冷却ベストの上にファン付きウェア（着衣TVA）を着用したとき、発汗量はほとんど確認されなかったが、皮膚温および衣服内温度が低下した。これらの結果は、高吸水素材から透湿防水布を通して水蒸気が放出し、ファンによって蒸発が促進されたことによるものであり、主観評価においても涼しくて快適であると評価された。一方、高吸水素材から発生した水蒸気のため、衣服内湿度は高くなったが、これによる湿潤感の低下はみられなかった。

以上のことから、ファン付きウェアに冷却ベストを併用する方法は、汗に頼らない潜熱放散が可能となり、簡便で効率的なクーリング方策であることがわかった。

緒 言

温暖化が叫ばれる中、2018年7月23日に埼玉県熊谷市で41.1℃の最高気温が観測されるなど、日本の約10か所地点で40℃を超える猛暑が記録され熱中症患者が急増した。また、2020年の夏には東京オリンピック・パラリンピックが開催される。選手のみならず、屋内・屋外の試合の観戦者やサポーター等の熱中症が懸念され、対策が急務な状況にある。

体熱放散メカニズムとしては、顕熱放散および潜熱放散がある。しかしながら、暑熱環境下においては環境温が皮膚温付近、あるいはそれ以上となるため、顕熱移動による体熱放散は望めない。そのため、汗の蒸発による潜熱移動に頼らざるを得ない。しかし、大量発汗は水分喪失のみでなく、ナトリウムや塩素なども放出され、倦怠感や頭痛・嘔吐に繋がり、これが持続すると熱けいれんや重度の熱中症を発症する。

簡便な暑熱対策グッズとして、水やゲルを凍結させたり、高吸水ポリマーに吸水させたりして頸部に巻く方法がある。しかし、筆者らのこれまで

の実験においては¹⁾、冷却効果が非常に局所的であったり、冷却時間が短かったりと熱中症予防効果が低いことがわかった。メントールを皮膚にスプレーする方法もあるが、スプレーにより温度感覚と温熱的不快感が減弱したことによりパフォーマンスは上昇したが、深部温に影響がみられなかったとする報告²⁾やパフォーマンスにも深部温にも影響がみられなかったとする報告³⁾がある。他にも従来から、氷やドライアイスなどの冷却材をポケットに挿入する方法や、冷却空気や冷却水を衣服に取り付けられたチューブで循環する水冷式・空冷式⁴⁾などがある。しかしながら、前者では冷却時間が短いこと、後者ではポンプユニットや貯水タンクなど大がかりな装置を必要とし⁵⁻⁷⁾、簡便な方法とは言い難い。

近年では、小型ファン付きウェアを用いた衣服内空気循環による方法^{8,9)}が暑熱環境下で作業する人々に広く利用されている。ペルチェ素子を用いた頸部冷却装置も開発されるなど¹⁰⁾、熱中症予防対策に注目が集まっている。しかし、簡便で実用的なクーリング方策は未だ十分でないのが現状である。

本研究では、暑熱環境下における熱中症予防のためのクーリング方策として、安価で簡便、かつ長時間の冷却持続能力をもつクーリング方策を提案することを目的とし、高吸水素材と高密度織物による透湿防水布を用いたベスト（これを冷却ベストとする）を作製し、冷却ベストが衣服内気候および生理反応に及ぼす影響を明らかにした。

1. 実験方法

1.1 冷却ベストの作製

本研究では、皮膚を濡らさずに、潜熱移動により体熱を放散する系として、中綿に高吸水素材を、側地には透湿防水素材を用いてベストを作製した。用いた中綿は、ポリアクリル酸ナトリウム塩を主成分とするポリマーを直接紡糸して繊維形状化

させたものであり、15分間蒸留水に浸漬した結果、自重の28倍の吸水力を有していた。すなわち、長時間の着用においても、途中での給水を必要としない十分な吸水能力をもつものとして用いた。側地には、表1に示す透湿防水布A（ポリエステル100%）の高密度織物を用いた。透湿度をJIS A2法（ウォータ法）に準拠して、20℃、65%RHの標準状態で測定した結果、綿ブロードおよびポリエステルタフタといった通常の織物と比べても遜色のない透湿度をもち、透湿防水布B（多孔性樹脂フィルムofラミネート）よりも透湿度が高かった。また、この布は耐水圧が2000mmH₂Oであるため、高密度織物の割には水分が染み出しにくいと考えられ、透湿防水布Aを用いてベストを作製することにした。

表1 側地の透湿度(一般的な織物との比較)

試料	透湿度g/(m ² ・h)
綿ブロード	31.5
ポリエステルタフタ	30.2
透湿防水布A	27.9
透湿防水布B	25.6

ベストには前身頃および後ろ身頃に約6.5cm間隔でほぼ均等に5mmΦの孔を計18個開けた後に縫製を行った。外観を図1に示す。蒸留水に浸漬すると、ベストに設けられた孔より吸水し、15分間で約500ml含水することがわかった。これは、中綿がもつ吸水能力の約半分程度であった。

冷却ベスト

ファン付きウェア



図1 実験用試料

表2 被験者の身体特性

被験者	年齢 (歳)	身長 (mm)	体重 (kg)	体脂肪率 (%)	BMI
a	27	1500	40.6	18.2	18.0
b	23	1650	59.0	32.8	21.7
c	23	1650	60.4	33.3	22.8
d	21	1530	46.4	27.1	19.8
e	21	1540	41.6	24.6	17.5
\bar{x}	23.0	1574	49.6	27.2	20.0
σ	2.45	70.9	9.49	6.25	2.29

1. 2 被験者およびプロトコル

20歳代女性5人を被験者とした。被験者の体型を表2に示す。やや体型にばらつきがあり、BMIでは痩せ～標準であった。基本着衣を綿100%の半袖Tシャツにひざ丈のスカートおよびアンクル丈の靴下とした。また、ブラジャー（ナイロン75%/ポリウレタン25%）は圧力の弱いものに統一したが、ショーツは各自のものとした。これを着衣Tとする。Tシャツの上に、図1に示す、2個の小型ファンが付いたブルゾン（以後、ファン付きウェアとする）を着用した場合を着衣TA、Tシャツの上から冷却ベストを着用し、さらにファン付きウェアを着用した場合を着衣TVAとし、3種の着衣形態で着用実験を行った（表3）。

表3 実験着用衣

試料記号	着衣形態
T	半袖Tシャツ
TA	半袖Tシャツ+ファン付きウェア
TVA	半袖Tシャツ+冷却ベスト+ファン付きウェア

プロトコルを図2に示す。被験者は、着衣Tで、32℃ 60%RHに設定された実験室にて30分間椅座位安静状態とし、各種センサを貼付した。その後、別室（25℃、60%）にて5分間クールダウンした後に実験を開始した。

着衣Tで32℃の実験室に入室して、衣服内温湿度および生理量の測定を開始し、10分間椅座位安静状態を維持した。その後、着衣Tのまま、あるいは着衣TAおよびTVAに替えて、さらに15分間椅座位安静状態を維持した。これを1ユニットとし、その後再び、5分間クールダウンした後に、32℃の実験室に入室して2ユニット目の実験を行った。この時、衣服内温湿度や他の生理量がほぼ回復していることを確認して、次のユニットに移るよう配慮した。これを繰り返し、着衣形態3種で3ユニットの実験を行った。着衣T、TA、TVAの実験順序は被験者ごとにランダムとした。また、後述する主観評価をSD法7段階評価に加えて、シェッフェの対比較法（中屋の変法）で

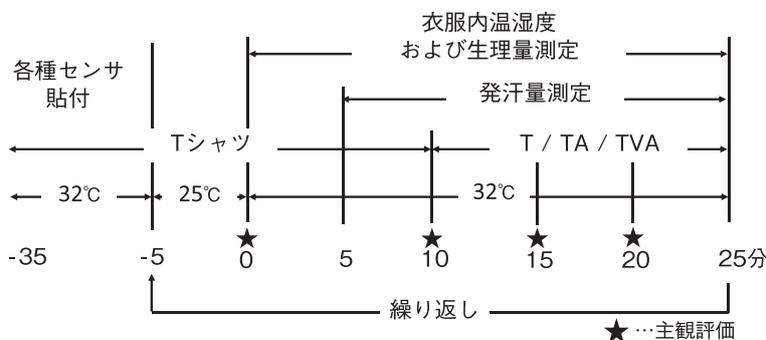


図2 実験プロトコル

も評価を行うために、3ユニット目の実験終了後に再度、最初に実験を行った着衣形態に戻り、同様のプロトコルで実験を繰り返した。しかし、最終の実験については主観評価のみのデータを取得した。

なお、本研究を実施するにあたっては、京都女子大学臨床研究審査を受けて承認を得た（許可番号28-13）。被験者に対しては、研究目的、方法、期間について説明し、本研究における実験の安全性に問題がないことを説明した上、自らの自由意志で本研究に参加し、実験途中であってもいつでも中止できる旨を伝え、十分に配慮しながら行った。

1. 3 測定項目

測定項目を衣服内温湿度、皮膚温、発汗量、舌下温、心拍数とした。衣服内温湿度は（神栄（株）製のサーミスタ型温度センサおよび湿度センサを用いてインターバル2秒として、左胸部、左背部（肩甲骨部）、後頸部の3部位で測定した。皮膚温は、安立計器（株）製の熱電対型温度センサを用いてインターバル2秒として、ラマナサンの4点法に基づき、胸部、上腕部、大腿部、下腿部にて測定を行った。発汗量は換気カプセル型発汗計（（株）スキノス製）を用いて胸部にて測定した。発汗計については換気カプセル法であり、測定する環境下で5分程度の調整時間を要するため、実験開始5分後からの測定となっている。また深部温の指標としてサーミスタ型温度センサを用い、インターバル2秒で舌下温を測定した。心拍数はポラール・エレクトロ・ジャパン（株）を用いてRRインターバルから算出した。主観評価についてはSD法7段階およびシェッフエの一对比較法（中屋の変法）を用い、温冷感、湿潤感、快適感を評価した。

1. 4 サーマルマネキンを用いた実験

成人男性の体型をもつFRP樹脂製のサーマル

マネキン（京都電子工業（株）製）を用いて実験を行った。サーマルマネキン（以後、マネキン）は、一般的にマネキン各部位の表面温度を設定温度に保つに必要な供給電力から衣服の保温力を測定するために用いられることが多い。しかし、本研究では暑熱下での冷却効果をマネキン表面温で確認するために、以下に示す定電力制御により測定を行った。

30℃ 50%RHの実験環境内で、裸体でマネキン各部位の表面温度がおおむね36℃の一定温を維持できる平均供給熱量を確認した。その後、各部位で確認された電力を実験中供給し続ける定電力制御実験を行い、着衣形態によるマネキン表面温度の変化挙動を胸と背で50分間継続測定した。本研究では、マネキンを発汗させずにドライとして実験を行った。

2. 結果

2. 1 局所発汗量への影響

局所発汗量 Sw の経時変化を図3に示す。着衣Tでは時間経過とともに Sw が徐々に増加傾向を示している。着衣TAではファン付きウェアを着用した直後に Sw が増加するものの、その後急速に低下したが、実験時間20分経過後に再度上昇傾向を示し、着衣TとTAの Sw 間に有意差はみら

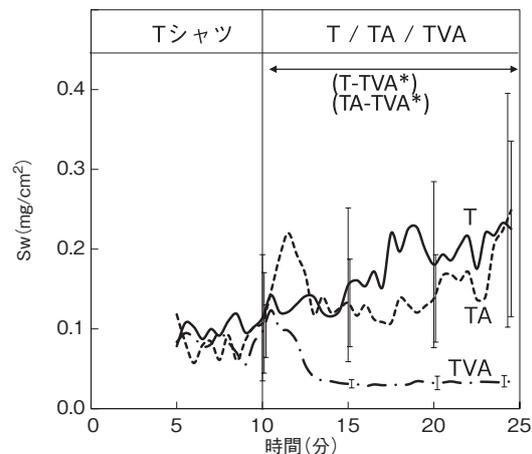


図3 局所発汗量 Sw の経時変化(胸部)

れなかった。これに対して、着衣TVAでは、着衣を替えた途端に一時的に Sw が上昇するもののその後は発汗の上昇がみられなかった。また、着衣Tの Sw の個人差は大きい、着衣TAではやや少なく、着衣TVAでは個人差がほとんどみられなかった。このことは、着衣TVAにおいてすべての被験者で発汗が抑制されたことを示している。着衣TVAは、TおよびTAより有意に発汗量が少なかった。

2. 2 衣服内温湿度への影響

小型ファン付きウェアは、後ろ身頃下部から空気が流入し、首や袖口から流出するため、本研究では後頸部でも衣服内温湿度を測定した。衣服内温度 T_{cl} の結果を図4に示す。胸部、背部、後頸部ともに25℃の実験室から32℃の実験室に入

室すると、 T_{cl} が急上昇する。着衣変更2分で着衣形態間の相違が始め、着衣Tではさらにやや上昇し、 T_{cl} が34℃以上に達した。これに対して、着衣TAおよびTVAにおいては、すべての測定部位において着衣Tより有意に T_{cl} が低下した($p<0.01$)。特に後頸部では、着衣TAとTVA間においても有意差がみられ($p<0.01$)、着衣TVAでは T_{cl} が約32℃まで回復した。

衣服内湿度 H_{cl} の結果を図5に示す。32℃の実験室に入室後に上昇し、着衣形態を替えた後には着衣TVAが最も高く、次にTであり、TAで最も低い傾向がみられた。前述したように、着衣TVAで発汗がほとんど観察されなかったことから、冷却ベストからの水分蒸発による湿度上昇であると考えられる。これに対して、着衣TおよびTAの湿度上昇は発汗によるものであり、着衣TA

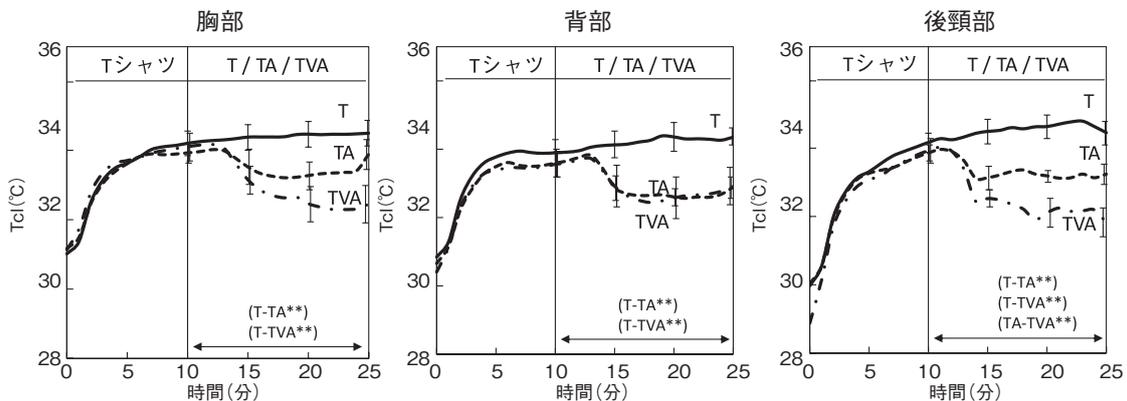


図4 身体各部の衣服内温度 T_{cl}

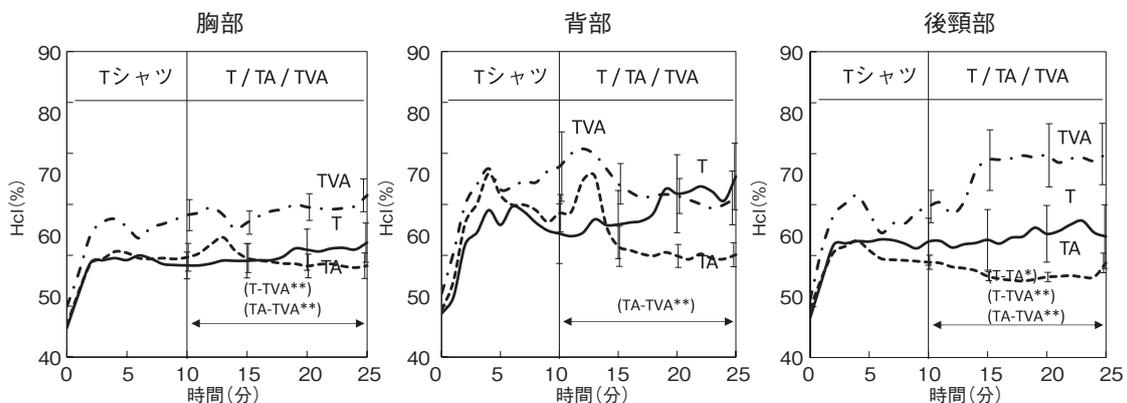


図5 身体各部の衣服内湿度 H_{cl}

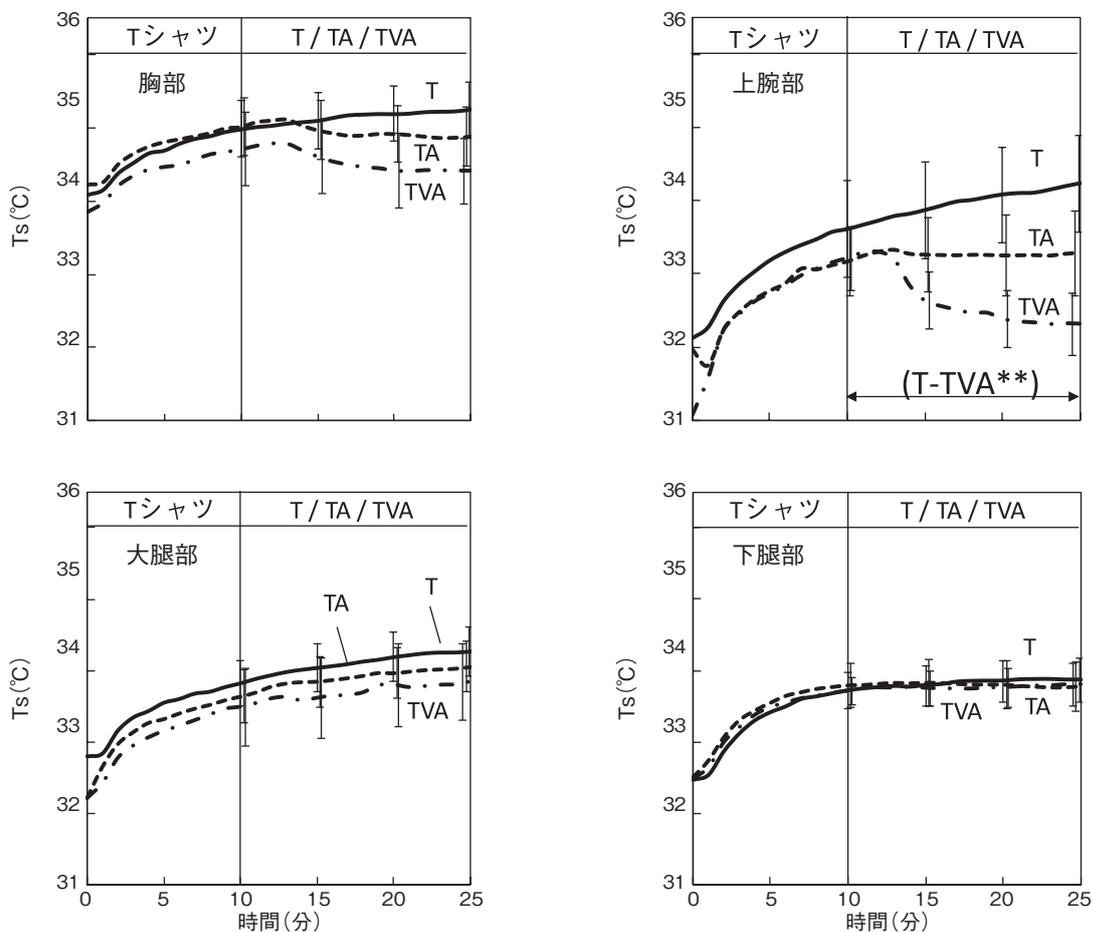


図6 身体各部における皮膚温 t_s の経時変化

では衣服内の強制対流により水蒸気が衣服系外に放出された結果、着衣Tより H_{cl} が低くなったと考えられる。

2.3 皮膚温への影響

皮膚温 t_s の結果を図6に示す。ファン付きウェアから取り込まれた空気が体幹に沿って首元から、さらに体幹を通過して上肢から袖口へと排出されるため、胸部および上腕部で着衣間の差が大きかった。着衣Tでは t_s が実験終了時まで徐々に上昇し、胸部で約35°C、上腕部で約34°Cに達している。着衣TAでは若干低下傾向を示し、着衣TVAでは着衣TおよびTAに比べて大きく低下

し、特に上腕部では着衣Tより有意に低下した($p < 0.01$)。しかし、大腿部や下腿部ではほとんど差がみられなかった。この理由として、冷却ベストやファン付きウェアが上半身のみであったことや、着用時間が15分と短かったことがあげられる。

2.4 定電力制御によるマネキン表面温への影響

胸部および背部のマネキンの表面温 t_s' を図7に示す。被験者実験では汗が関与したが、ドライマネキンでは潜熱損失がないため、着衣形態間の相違がより明瞭になった。着衣Tでは t_s' が時間経過とともに上昇し、約37°Cに達した。着衣TAでは、設定したマネキン表面温度よりも低い32°Cの空

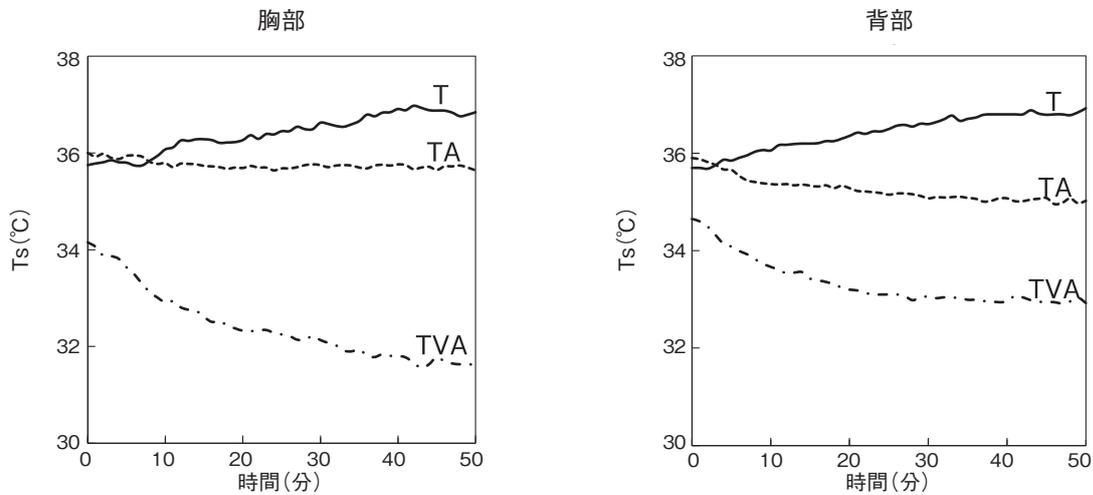


図7 ドライマネキンでの皮膚温 T_s の変化挙動

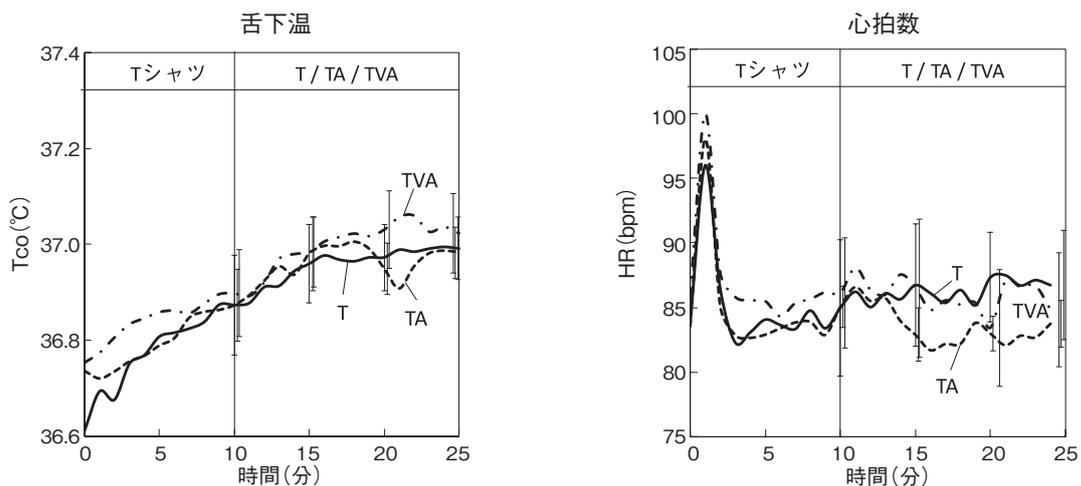


図8 舌下温 T_{co} および心拍数 HR の経時変化

気が流入したため、 t_s' が若干減少する傾向がみられた。これに対して、着衣TVAでは着衣直後の実験0分後から t_s' が大きく低下しており、胸部では32℃まで低下した。これは、冷却ベストからの水分蒸発による潜熱損失量によるものであり、このことは人が汗を分泌しなくても冷却ベスト着用により皮膚温を低下させることができることを示唆している。

2. 5 舌下温および心拍数への影響

舌下温および心拍数の結果を図8に示す。舌下温は、32℃の実験室に入室してから徐々に上昇し続けているが、着衣形態間に差はみられなかった。心拍数は実験室への移動により一時的に上昇しているが、その後は回復し85bpmを推移しており、舌下温と同様に着衣形態間の差はみられなかった。

本研究では、32℃という暑熱環境としては比較的マイルドな環境条件下であり、対象とした着衣

がTシャツのみの通常の夏季における着衣であったこと、ファン付きウェアを着用したことや、冷却ベスト着用時間が15分と短かったことなどから、人体生理にまで影響を与えなかったものと考えられる。

これについては、長時間着用実験を通して、今後確認する必要がある。

2. 6 主観評価への影響

SD法による主観評価の結果を図9に示す。まずSD法についてみてみると、着衣Tでは時間経過とともに有意に暑いと評価されたが、着衣TAおよびTVAでは温冷感、湿潤感、快適感の評価が高かった。しかし、着衣TAとTVAの相違はみ

られなかった。

次に、図10に示す一対比較法をみてみると、着衣TAとTVAの差を捉えることができ、着衣TVAがTAよりも有意に涼しく快適と評価された ($p<0.05$)。また、着衣TVAのHclが高かったが、湿潤感評価の低下に繋がらないことがわかった。これは、Hclの増加が発汗によるものではなく、冷却ベストからの蒸発であったことやファンによって蒸発が促進されていることによると考えられた。

3. 考 察

ファン付きウェアは、環境温度がヒトの皮膚温より低温でなければ空気循環による体熱放散は生

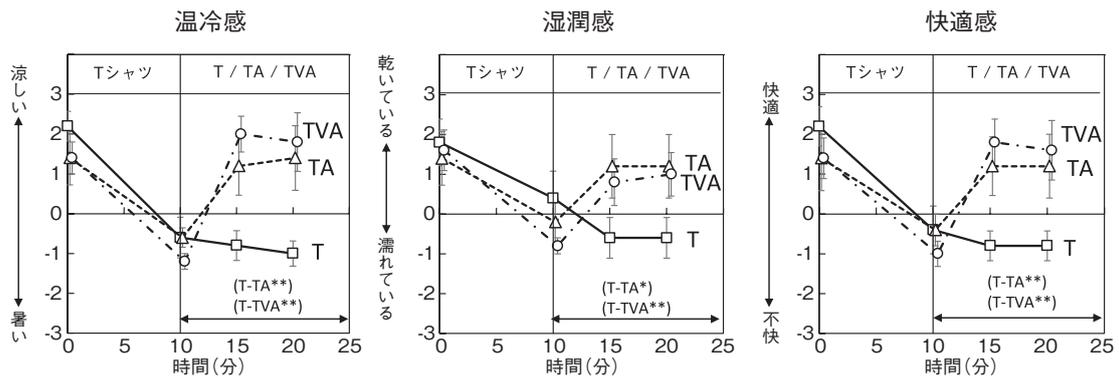


図9 SD法による主観評価

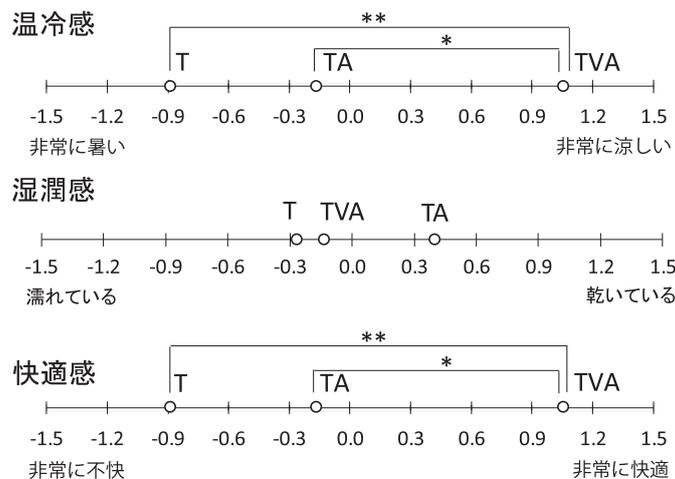


図10 一対比較法(中屋の変法)による主観評価

じない。体熱放散を促進させるためには発汗を必要とする。一方、発汗が継続すれば、身体負荷が大きくなることは想像に難くない。本研究では、発汗に頼らない方法として、冷却ベストを試作し、そのクーリング効果を検証した。

冷却ベストを用いる着衣TVAでは、着衣TおよびTAに比べて胸部や背部、後頸部の衣服内温度 T_{cl} が有意に低下し、胸部と上腕部の皮膚温がそれぞれ約1℃、約2℃減少するなどの効果がみられた。局所発汗量 S_w の結果では、着衣TおよびTAに対して、着衣TVAの S_w が非常に少なかったことから、汗の蒸発に代わって、冷却ベストからの水蒸気蒸発が皮膚温や衣服内温度の低下に効果的であることがわかった。これらの結果が主観評価に繋がり、温冷感と快適感において高評価を得た。冷却ベスト着用で衣服内湿度が高くなったが、湿潤感の低下には繋がらなかった。

しかしながら、心拍数や舌下温においては、着衣形態間の相違はみられなかった。筒井らは、水冷式による下肢冷却服の実験において、短パンのみの着衣よりも皮膚温が低下したが、食道温および心拍数では相違がみられなかったと報告している⁶⁾。また、今田と平田の水冷スーツを用いた実験においても、すべての部位で皮膚温が有意に低下したと述べているが、冷却により心拍数の有意な低下は認められなかったと報告している⁵⁾。一方、鈴木らは長袖・長ズボンの農作業服群と小型ファン付きウェア着用群の実験において、鼓膜温や心拍数が有意に減少した報告している⁹⁾。これらの事実は、それぞれの研究において比較対象が異なるものの、水冷服に比べてファンを用いた強制対流による汗の蒸発促進（潜熱移動）によるクーリング方法が有効であることを示している。また、時澤は、熱中症対策の実用的な方法として、水を2～3分置きに身体にスプレーすることが有効であると述べているが¹⁰⁾、このような方法では日常生活や作業が行えず、現実的でないと思わ

れる。

本研究では、対象とした着衣が夏季における通常の着衣であるTシャツのみであること、またファン付きウェアであることから、冷却ベスト着用による心拍数および舌下温への影響は認められなかった。しかし、鈴木らのファン付きウェアと時澤の蒸発潜熱の双方のクーリング方法を同時に用いたことから、着用時間が長くなれば心拍数や深部温にも効果をもたらすであろうことが予測される。

冷却ベストの着用は、ファン付きウェアとの併用により、身体を濡らさない潜熱放散を可能とし、発汗による身体負荷を軽減する方法として有用であり、簡便で効率的なクーリング方法として提案できる。

4. 結 語

本研究では、暑熱環境下における熱中症予防のためのクーリング方策として、安価で簡便、かつ長時間の冷却持続能力をもつクーリング方策を提案することを目的とし、高吸水素材と高密度織物による透湿防水布を用いた冷却ベストを作製し、冷却ベストが衣服内気候および生理反応に及ぼす影響を明らかにした。

冷却ベストの上にファン付きウェアを着用した着衣TVAにおいて、Tシャツのみの着用（着衣T）や小型ファン付きウェアの着用（着衣TA）に比べて、皮膚温の低下と衣服内温度の低下を認めることができた。一方、着衣TVAの発汗量は、着衣TおよびTAに比べて非常に少なかった。これらのことは、冷却ベストから放出した水蒸気がファンによって蒸発促進されたことによるものであり、効率的なクーリングに繋がったと考えられた。主観評価においても着衣TVAは、涼しくて快適と評価された。また、着衣TVAにおいては衣服内湿度が高かったが、湿潤感の低下をもたらさないことがわかった。

以上のことから、ファン付きウェアに冷却ベストを併用することにより、汗に頼らない潜熱放熱が可能となり、暑熱下でのクーリングに効果的であることがわかった。

謝 辞

本研究は、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助成を得て行ったものであることを記し、ここに謝意を表する。

文 献

- 1) 諸岡晴美, 未発表
- 2) Schlader Z.J., Simmons et al., The independent roles of temperature and thermal perception in the control of human thermoregulatory behavior, *Physiol. Behav.*, **103**(2), 217-224(2011)
- 3) Barwood M.J., Corbett J. et al., Relieving thermal discomfort: Effects of sprayed L-menthol on perception, performance, and time trial cycling in the heat, *Scand. J. Med. Sci. Sports*, **25**(Suppl. 1), 211-218(2015)
- 4) 日本家政学会被服衛生学部会編, アパレルと健康—基礎から進化する衣服まで—, 井上書院, **59**(2012)
- 5) 今田尚美, 平田耕造, 水灌流スーツによる皮膚冷却に対する体温調節反応の身体部位差に関する研究, *繊維製品消費科学会誌*, **42**(5), 330-339(2001)
- 6) 筒井隆夫, 伊戸田望, ほか, 暑熱環境下での下肢運動における下肢冷却服の体温上昇抑制効果, *産業医科大学雑誌*, **27**(1), 63-71(2005)
- 7) 久米雅, 芳田哲也, ほか, 水循環スーツを着用した運動時の体温調節反応と冷却面積, 冷却容量との関係, *体力科学*, **58**, 109-122(2009)
- 8) 市ヶ谷弘司, 空調服開発のきっかけとビジネス展開, *繊維製品消費科学会*, **59**(6), 447-450(2018)
- 9) 鈴木英悟, 樫村修生, ほか, 衣服内空気循環が夏季暑熱環境下農作業時の体温調節反応に及ぼす影響, *日生氣誌*, **49**(2), 83-92(2012)
- 10) 時澤 健, 熱中症対策の新技术—実用志向と未来志向—, *労働安全衛生研究*, **10**(1), 63-67(2017)