

## 環境温37°Cにおける水分蒸発機能をもつ冷却ベストの効果

坂下 理穂<sup>1</sup>・太田 彩絵<sup>2</sup>・諸岡 晴美<sup>3</sup>

Effects of cooling vest with moisture evaporation function in air temperature of 37°C

Riho Sakashita, Sae Ota, Harumi Morooka

We have been conducting a series of studies on simple and practical cooling methods for hot environments. A vest with moisture evaporation function 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”. In this study, the wearing experiment was performed in an experimental environment at 37°C, 40%RH (WBGT 30°C), which also corresponds to the body temperature. The subjects included eight females in their 20s. During the experiment, they wore T-shirts (T) or the cooling vest on a T-shirt (TV), or the blouson with two small fans on the cooling vest with a T-shirt (TVA). Following parameters were measured through the wearing experiments: sweating rate ( $Sw$ ), clothing temperature ( $T_{cl}$ ) and humidity ( $H_{cl}$ ), oral temperature ( $t_{co}$ ), skin temperature ( $t_s$ ), and heart rate ( $HR$ ) and subjective evaluation. When wearing the sample TVA, the  $T_{cl}$  and  $t_s$  significantly decreased at the chest region. The  $Sw$  for sample T significantly increased over time. The  $Sw$  for the sample TV also tended to increase, but that for the sample TVA significantly decreased over time. The scores of thermal sensation and subjective sweating state for sample TVA significantly decreased. The 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 due to the fans. Therefore, it can be concluded that using the cooling vest along with a blouson installed with fans, the loss of latent heat can be increased without causing excessive sweating.

### 1. 緒 言

総務省消防庁資料<sup>1)</sup>によると、夏季の全国熱中症搬送者数の年間推移が2017年の約53,000人に対して、2018年には約95,000人と急増しており、2019年には24か所地点で猛暑日(35°C以上)の日数が20日を超える<sup>2)</sup>など地球温暖化現象が加速している。気温30°Cを超える環境においては、温度差による体熱放散(顕熱移動)が激減し、恒体温を維持するために発汗が促進され、蒸発による体熱放散(潜熱移動)が増大する。

しかしながら、ヒトの発汗量にも限りがあること、多量の発汗は脱水症状に繋がるのみでなく塩分なども放出され、熱痙攣や重度の熱中症を発症する。暑熱下においても発汗のみに頼る体温調節は危険性が高い。

冷却方法に関する先行研究には、氷やドライアイスなどの冷却材を用いる方法や<sup>3)</sup>、冷却空気や冷却水を用いる方法など<sup>4-6)</sup>がみられる。しかしながら、前者の効果は非常に短時間でしかも局所的であり、後者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、実用的でないと思われる。また近年は、小型ファン付きウェア<sup>7,8)</sup>やペルチェ素子を

<sup>1</sup>本学大学院研修者 <sup>2</sup>本学大学研修員 <sup>3</sup>本学教授

用いた冷却法<sup>9)</sup>も提案されている。しかしながら、前者は発汗を必要とし、後者は顕熱移動の増大を目指すものであり、暑熱環境下においてその効果は限定的であると考えられる。

近年、潜熱移動を利用した冷却方式として、下着にチューブを配し、毛管現象を利用して水を滲出させて下着を湿潤させる方法が提案されている<sup>10)</sup>。しかしながら、この方式も冷却水保温ボトルや電動ポンプを必要とし、簡略な方法とはいえない。

筆者らは、前報<sup>11)</sup>において、水分蒸発機能を備えたベスト（以降、冷却ベストとする）を作製した。32℃に設定した人工気象室内において着用実験を行った結果、試作ベストをファン付きウェアと組み合わせることで着用することによって、ファン付きウェアのみの着用に比べて、発汗量が減少したにもかかわらず、胸部・背部や後頸部の衣服内温度の低下と、胸部・上腕部において皮膚温の低下が認められた。すなわち、汗に代わって冷却ベストからの水分蒸散が有効な効果をもたらすことが明らかとなった。一方で、水分が経時的に重力により裾の方に溜まる傾向がみられたことから、改善が必要であることがわかった。

そこで本研究では、時間が経過してもできるだけ体表面に広く水分が配置されるように冷却ベストの改善を試みた。この冷却ベストを用いて、顕熱移動が存在しない系での冷却ベストの効果を明らかにすることを目的として着用実験の環境温を前報<sup>11)</sup>よりもさらに高い37℃とし、発汗量、衣服内温湿度、皮膚温、心拍数、口腔温、主観評価への影響を検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 冷却ベストの作製

発汗によらず潜熱移動により体熱を放散する系を作るために、前報<sup>11)</sup>と同様に、側地に高密度織物からなる透湿防水布、中綿に長時間放湿が可能な状態を維持させるために高吸水素材を用いて冷却ベストを作製した。側地の透湿度は、JIS L 1099 A-2法（ウォータ法）に準拠して40℃の恒温槽内で測定を行った結果、約239 g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>であった。この値は、

同様の方法で測定したTシャツ地の透湿度268 g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>と比べて、遜色がないことを確認している。中綿は15分間蒸留水に浸漬した結果、自重の約28倍の吸水力を有していた。

前報<sup>11)</sup>では、後身頃で1枚、前身頃については前開きのため、左右にそれぞれ1枚の中綿を用いて製作した。しかし、吸水した水が時間とともに裾の方に溜まる傾向がみられ、長時間着用を想定した場合には、冷却ベストの上部が乾燥状態に至ることが懸念された。

そこで本研究では、前身頃および後身頃の中綿をそれぞれ左右4分割、計16区画とし、水分が下方の区画に移動せずに、できるだけ広範囲に分布するように改良した。冷却ベストの外観を図1に示す。冷却ベストの側地（表地および裏地）には、前肩線部に1個、後ろ肩線部に2個、前身頃および後ろ身頃の分割線付近（各区画上部）に前後中心線と脇線間を等間隔に5 mmφの孔を2個ずつ計30個開けた。その後、裏地の各区画部に中綿を設置し、その周囲に耐水接着剤を置き、表地と裏地を接着した。次に、ベストの周囲をバイヤステープで包んで製作した。冷却ベストの製作には、針孔が開かないようにミシンを使用せず、すべて耐水接着剤を用いた。なお、着用者の人体寸法範囲を広くするために、前後見頃の脇に上辺8 cm、下辺10 cmの台形のパワーネットを挿入した。



図1 冷却ベストの外観  
(---: 耐水接着剤塗布箇所, ○: 吸水口)

表1 実験用着衣

記号	着衣形態
T	Tシャツのみ
TV	Tシャツ+冷却ベスト
TVA	Tシャツ+冷却ベスト+小型ファン付きウェア

## 2.2 着用実験

### (1) 実験に供した着衣形態

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、綿100%のひざ丈スカートおよびアンクル丈の靴下を基本着衣とし、これに加えて、表1に示す3種の着衣を用いて実験を行った。着衣Tは綿100%の半袖Tシャツである。着衣TVはTシャツの上に冷却ベストを着用した場合、着衣TVAはTシャツの上に冷却ベストを着用し、さらに両脇下部の左右に2台の小型ファンがついたブルゾン（以降、ファン付きウェアとする）を着用した場合とした。

なお、冷却ベストは実験直前にバットに入れられた蒸留水に15分間浸漬した。この時、冷却ベストに設けられた孔より吸水され、約500ml 含水した。これは、中綿がもつ吸水能力の約半分程度であった。

### (2) 被験者およびプロトコル

20歳代女性8人を被験者とした。被験者の身体特性は、年齢 $24.13 \pm 2.80$ 歳、身長 $155.94 \pm 4.69$ cm、体重 $49.49 \pm 7.47$ kg、体脂肪率 $27.41 \pm 4.20\%$ 、BMI  $20.40 \pm 2.68$ であり、平均的な20歳代女性に対して痩せ〜標準であった<sup>12)</sup>。

被験者は28℃に設定された前室にて各種センサを貼付し、着衣Tで20分間椅座位安静とした後に測定を開始し、10分間椅座位安静を維持した。その後、37℃40%RH（WBGT30℃）に設定した人工気象室に入室し、着衣Tで15分間—着衣TVで15分間—着衣Tで10分間—着衣TVAで10分間—着衣Tで10分間、椅座位安静状態を維持した。着用実験プロトコルを図2に示す。

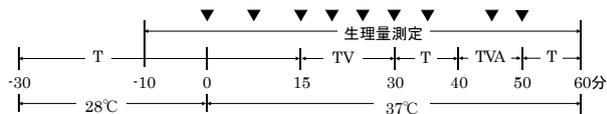


図2 着用実験プロトコル（▼は主観評価を示す）

なお、設定した温湿度は日本の夏季の高温多湿に比べるとやや低いですが、WBGTでは嚴重警戒に相当する。本学ではこの条件に設定できる実験室がないため、大阪産業技術研究所にて人工気象室を借用して実験を行った。そのため借用日数を長くできなかったこと、また被験者の安全を確保する必要性から各着衣時間を短時間とした。

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2019-17）。被験者に対しては、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。

### (3) 測定項目

測定項目を発汗量、衣服内（最内層）温湿度、皮膚温、口腔温、心拍数、主観評価とした。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。発汗計については測定する環境下で5分程度の調整時間を要するため、37℃の人工気象室入室5分後からの測定となっている。衣服内温湿度は、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（高精度8チャンネルデータロガ（日機装サーモ(株)製））として、胸部、背部の2か所で測定した。皮膚温は、熱電対型温度センサ（安立計器(株)製）を用いてインターバル2秒で、ラマナサン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。口腔温は、サーミスタ型温度センサを用い、インターバル2秒（高精度8チャンネルデータロガ（日機装サーモ(株)製））で測定した。心電図測定はGPSマルチスポーツウォッチ（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。暑熱感、自覚的発汗状態、湿潤感の各主観評価については、プロトコルに示したように、37℃の実験室入室直前および入室後5分毎、最後の着衣Tでは実験終了直前にSD法7段階評価にて行った。暑熱下での環境であるため、暑熱感については、どちらでもない（1点）から非常に暑い（7点）までとした。自覚的発汗状態は、発汗していない（1点）から非常に汗が流れている（7点）、湿潤感は、乾いている（1点）から非常に濡れている（7点）とした。

### 2.3 統計処理

着衣形態による測定結果の有意差検定は、対のある t 検定とした。最初の着衣 T では37℃の人工気象室に入室直前の1分間の平均値と、着用終了直前の1分間の平均値間で有意差検定を行った。次に、着衣 TV に更衣直前の1分間の平均値と着用終了直前1分間の平均値間で有意差検定を行うなど、順次、有意差検定を実施し、各着衣が身体に及ぼす影響を検討した。なお、発汗量については、前述のように、測定機の関係で37℃の人工気象室に入室5分後の測定値を用いた。また、結果の図は、すべて被験者平均とし、5分毎に標準誤差を表記した。

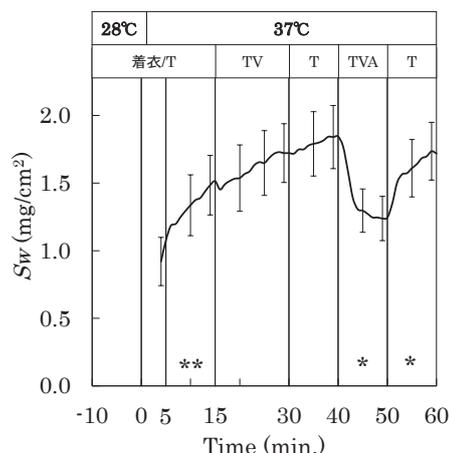


図3 発汗量 ( $S_w$ ) の変化挙動  
(\*\* :  $p < 0.01$ , \* :  $p < 0.05$ )

## 3. 結果

### 3.1 発汗量への影響

局所発汗量  $S_w$  の経時変化を図3に示す。着衣 T では37℃の人工気象室に入室後、時間経過とともに有意に  $S_w$  が増加した。着衣 TV に更衣後も増加傾向がみられ、その後の着衣 T でもさらに増加傾向がみられた。しかし、着衣 TVA では、更衣した直後から  $S_w$  が急激に減少し、直前の着衣 T との間に有意差がみられ、その後の着衣 T で再び有意に増加した。

の人工気象室に入室すると、 $T_{cl}$  が有意に上昇した。その後、胸部において、着衣 TV および TVA で有意に  $T_{cl}$  が下降し、着衣 T において有意に上昇することがわかった。胸部においても背部と類似した変化挙動がみられたが、有意差は認められなかった。

一方、衣服内湿度  $H_{cl}$  は、前室から実験室に入室後に急上昇した。特に、胸部で有意に上昇し、着衣 TV に更衣後にさらに上昇した。背部においても類似の変化挙動がみられたが有意ではなかった。

### 3.2 衣服内温湿度への影響

衣服内温度  $T_{cl}$  および衣服内湿度  $H_{cl}$  の結果を図4に示す。胸部、背部ともに28℃の前室から37℃

### 3.3 皮膚温への影響

身体各部における皮膚温  $t_s$  の経時変化を図5に示す。実験室に入室した直後に、上腕部、大腿部、

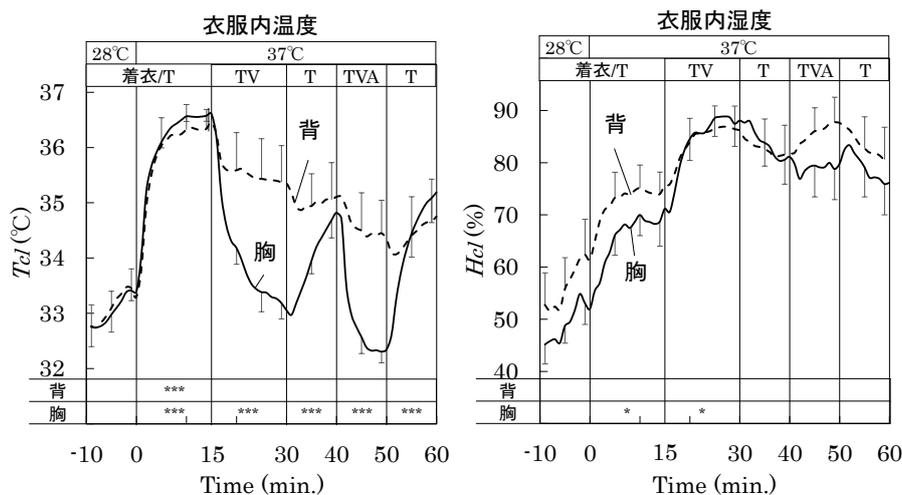


図4 衣服内温度 ( $T_{cl}$ ) および衣服内湿度 ( $H_{cl}$ ) の変化挙動  
(\*\*\* :  $p < 0.001$ , \*\* :  $p < 0.01$ , \* :  $p < 0.05$ )

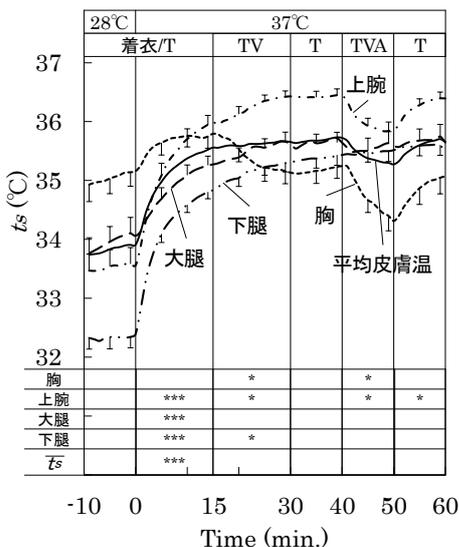


図5 皮膚温 (ts) の変化挙動

(\*\*\*:  $p < 0.001$ , \*\*:  $p < 0.01$ , \*:  $p < 0.05$ )

下腿部ともに有意に  $t_s$  が上昇した。着衣 TV に更衣すると、胸部においてのみ有意に  $t_s$  が下降したが、他の部位では下降はみられなかった。着衣 TVA では、胸部・上腕部で有意に下降した。しかしながら、大腿部や下腿部ではほとんど変化はみられなかった。

また、次式のラマナサンの4点法により算出した平均皮膚温  $\bar{t}_s$  を同図中に示している。

$$\bar{t}_s = 0.3(t_{s\text{胸}} + t_{s\text{上腕}}) + 0.2(t_{s\text{大腿}} + t_{s\text{下腿}})$$

着衣 TV では変化はみられなかったが、着衣 TVA では  $\bar{t}_s$  が約0.5°C 下降した。

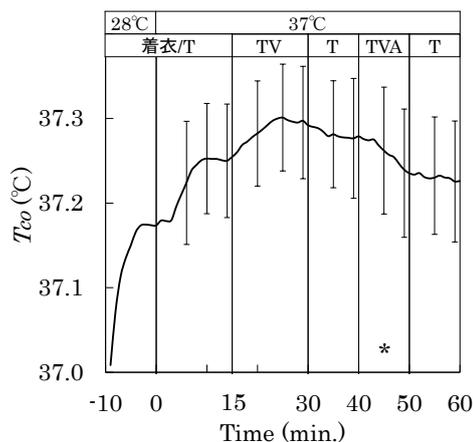


図6 口腔温 (Tco) の変化挙動 (\*:  $p < 0.05$ )

### 3.4 心拍数および口腔温への影響

心拍数においては、どの着衣形態においてもほとんど変化がみられなかった。口腔温の結果を図6に示す。着衣 TVA でのみ下降する傾向がみられたが、各着衣の着用時間が10~15分と短く、人体生理量に及ぼす影響は少なかった。

### 3.5 主観評価への影響

主観評価については、基準の取り方が被験者ごとに異なったため、被験者ごとに平均値を0、標準偏差を1とする基準値を算出した。結果を図7に示す。暑熱感に着衣 T で有意に上昇し、着衣 TV ではほとんど変化がなかったが、その後の着衣 T でさらに有意に高くなり、着衣 TVA で有意に低く評価された。自覚的発汗状態でも暑熱感とほぼ同様の傾向がみられた。湿潤感では、実験室に入室後有意に高

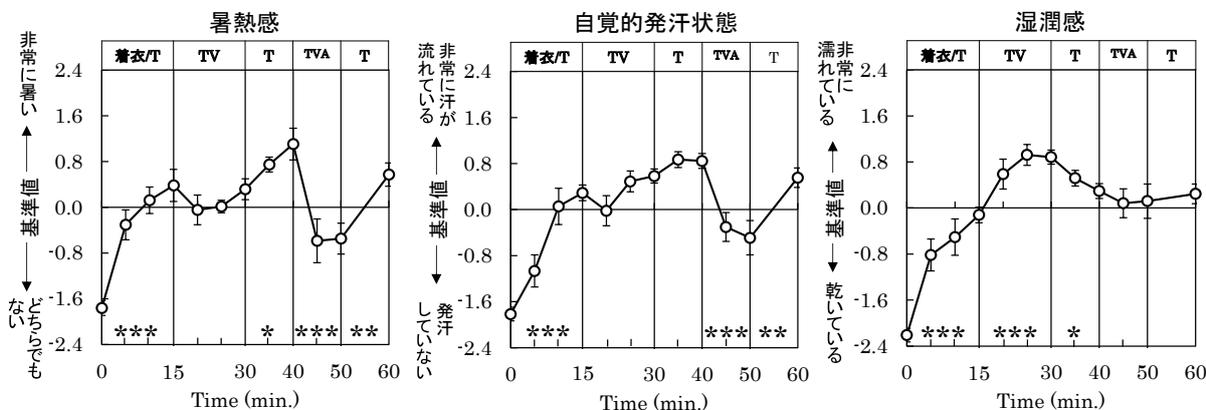


図7 主観評価における基準値の変化挙動

(\*\*\*:  $p < 0.001$ , \*\*:  $p < 0.01$ , \*:  $p < 0.05$ )

くなり、着衣 TV でさらに高くなったが、着衣 TVA ではやや低く評価された。

#### 4. 考察

筆者らは、熱中症を防御する方策として、透湿防水布と高吸水素材を用いて冷却ベストを作製した。この方法は、液体水で下着や皮膚を濡らさずに、含水衣服から直接水分を蒸発させることによって体温調節を図ることを目的としたものであり、潜熱移動に着目した冷却方法である。

潜熱移動に着目した冷却方法に関する研究はほとんどみられず、わずかに田中ら<sup>10)</sup>の研究のみである。田中らは、自己発汗式冷却下着と名付け、下着表面に取り付けたチューブの細孔から水を滲出させる方式と、チューブに取り付けた貫通糸を用いる毛管式を提案しており、毛管式でより高い冷却効果が認められたと述べている。しかし、冷却水を入れる保温ボトルや電動ポンプが必要であり、簡易とはいえない。また、下着にチューブを這わせることによる不快感や動作のしにくさも懸念される。

本研究においては、前報<sup>11)</sup>で試作した冷却ベストが、重力により水分が下方に溜まる傾向があった点を改良して実験を行った。

胸部の衣服内温度  $T_{cl}$  では、一時36℃超であったが、着衣 TVA において、一般的に快適温度域といわれている32℃にまで低下するなど大きな効果が認められた。また、胸部皮膚温  $t_s$  においても着衣 TVA で有意な低下が認められた。一方、胸部における発汗量  $S_w$  は着衣 TVA で有意に減少していることがわかり、 $T_{cl}$  の低下は発汗量の増大によるものでないことが明らかであった。すなわち、着衣 TVA は、冷却ベストからの水分蒸散により、かなり効果的に  $T_{cl}$  や  $t_s$  を低下させることが可能であり、暑熱感をも有意に低下させることがわかった。これは、前報<sup>11)</sup>の実験環境が32℃であったのに対して、37℃という体温とほぼ同温の暑熱環境下であっても試作ベストが十分な冷却効果をもつことを示している。

着衣 TV では、胸部  $T_{cl}$  および  $t_s$  で低下傾向がみられたが  $S_w$  において減少傾向はみられなかった。

このことは、ファン付きウェアからの強制対流による水分蒸散の促進が重要であることを示唆している。一方、室内においてのファン付きウェアの着用は、動作適応性の観点からは不向きと考えられる。室内での着用においては、扇風機などを併用する方法が考えられ、この方法による冷却効果については、今後検証する必要がある。

一方、背部をみると低下傾向はみられるものの有意差はなかった。この原因として、本研究で採用した被験者の体型がやや痩身タイプであり、背部でかなりのゆとりがあったことが効果を低下させた要因であると推察された。すなわち、身体表面と冷却ベストとの間隙をできるだけ少なくするために、ベスト寸法を再検討する必要があることが課題として残った。

衣服内湿度  $H_{cl}$  では、胸部、背部ともに着衣 T、TV、TVA のすべてで高かった。しかし、前述したように、発汗量が減少したことを受けて、自発的発汗状態の主観評価においては、着衣 TVA で有意に低く評価された。しかし、湿潤感においては有意な低下はみられなかった。これは、冷却ベストから多量の水分蒸散があったことを示している。また、ベストのパイピング部をニットにしていたことから、その部分の濡れが湿潤感を上昇させた大きな要因であり、このことは、被験者からも指摘された。今後は、パイピング素材を同様の透湿防水素材に変更する必要が認められた。

皮膚温  $t_s$  への影響については、胸部と上腕部に現れた。胸部では着衣 TVA で約2℃の低下が認められたが、大腿部や下腿部の  $t_s$  にはほとんど影響はなかった。そのため、平均皮膚温  $t_s$  においても着衣 TVA で低下傾向がみられるものの有意ではなかった。血液循環系によって脚部にまで影響を及ぼすには実験時間が短かったものと推察される。

また、口腔温では、着衣 TVA で低下傾向がみられたものの、心拍数では明確ではなかった。人工気象室の使用に時間的制限があったことに加えて、WBGT30℃という嚴重警戒域での実験であったため、被験者の健康への配慮から実験総時間を60分とし、着衣 TVA の着用時間が10分と短かったことが

原因の一つと考えられる。このことは、生体がホメオスタシスによって、生理的な恒常性を維持し続けた結果であり、健康を害しないように配慮された実験条件であったことを裏づけるものである。

以上のことから、いくつかの課題が残されたものの、本研究で提案した冷却ベストが発汗量や衣服内温度、皮膚温に及ぼす効果は大きく、夏季の日常における長時間着用を想定した場合には非常に有用な冷却効果を発揮し、熱中症予防に繋がると結論づけられた。

### 参考文献

- 1) 総務省消防庁資料2018年, 夏季の全国熱中症搬送者数(年間推移), [https://www.jiji.com/jc/graphics?p=ve\\_soc\\_medical-heatstroke-year](https://www.jiji.com/jc/graphics?p=ve_soc_medical-heatstroke-year) (2020/10 最終閲覧)
- 2) 気象庁2019年夏, 猛暑日, 真夏日等の日数ランキング, <https://weather.time-j.net/Summer/Ranking/2019> (2020/10 最終閲覧)
- 3) 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, p. 59 (2012)
- 4) 今田尚美, 平田耕造; 水漕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, 繊維消誌, 42(5): 330-339(2001)
- 5) 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)
- 6) 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)
- 7) 市ヶ谷弘司; 空調服開発のきっかけとビジネス展開, 繊維消誌, 59(6): 447-450(2018)
- 8) 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)
- 9) 時澤 健; 熱中症対策の新技術—実用志向と未来志向—, 労働安全衛生研究, 10(1): 63-67 (2017)
- 10) 田中邦彦, 西村直紀; 毛管現象を付与した自己発汗式冷却下着の開発と検証, デサントスポーツ科学, 41: 93-98(2020)
- 11) 諸岡晴美, 坂下理穂, 加藤礼菜, 中橋美幸; 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, デサントスポーツ科学, 41: 226-236 (2020)
- 12) 日本人の人体計測データ, 社団法人人間生活工学研究センター, (1997)