

効果的な身体冷却に関する検証（第2報）

鈴木 峻*, 清水 祐二*, 玄海 嗣生**

概 要

消防隊員を防護するための装備は、火炎防護性や化学物質耐透過性に優れている一方、体温調節のための熱放散を阻害してしまうため、消防隊員は過酷な暑熱環境下での活動を強いられる。現在、夏季の活動においては、熱中症の未然防止を目的として冷却剤を積極的に活用することが当庁の消防活動基準で示されている。昨年度の検証では防火衣を着装した20分程度の運動と、その後30分間の休息において、冷却剤の融点は0℃、冷却部位は上背部、側胸部、大腿部が身体冷却に効果的であることが示唆された。しかし、冷却剤の冷え感は持続しないことが危惧されており、長時間使用による効果については明らかになっていない。

そこで、本検証では毒劇物防護衣を着装した長時間運動における効果的な身体冷却方法を明らかにすることを目的とし、冷却ベストの有効性を確認するとともに、冷却剤及び冷却部位を変更した際の効果を検証し、夏季における消防活動中の身体的負担の軽減及び熱中症の予防対策に資するものとした。

検証の結果、45分程度の運動には冷却部位に関わらず融点0℃の冷却剤が効果的であったことや冷却剤の表面温度と被験者が感じている冷え感には差異があることが示唆された。

1 はじめに

消防隊員を防護するための装備は、火炎防護性や化学物質耐透過性に優れている一方で、体温調節のための熱放散を阻害してしまうため、消防隊員は過酷な環境下での活動を強いられる。現在、夏季の活動において、熱中症の未然防止の目的で、冷却剤を積極的に活用することが活動基準等で示されている¹⁾。

昨年度実施した検証²⁾では、防火衣を着装し、消火活動と同等の身体負担で20分程度の運動を実施させ、その後30分間の休息をとらせた。その結果、冷却剤は融点0℃、冷却部位は上背部、側胸部、大腿部が身体冷却に効果的であることが示唆された。しかし、活動が長時間に及ぶ場合、冷却剤の効果は持続せず、活動時に暑熱感が緩和されないことが危惧され、昨年の検証では冷却剤の長時間使用による効果について明らかになっていない。

そこで、本検証では毒劇物防護衣を着装した長時間運動における効果的な身体冷却方法を明らかにすることを目的とし、冷却ベストの有効性を確認するとともに、冷却剤及び冷却部位を変更した際の効果を検証し、夏季における消防活動中や訓練中の身体的負担の軽減及び熱中症の未然防止対策に資するものとする。

2 検証方法

恒温恒湿室試験室で暑熱環境を再現し、毒劇物防護衣を着装した被験者に対してトレッドミルで一定負荷の

運動後、30分間の休息をとらせた。身体冷却条件は冷却ベストの着用なしを含む5種類とし、運動中及び休息中の生理的、主観的指標を評価した。各被験者には全ての身体冷却条件について、順不同で検証を実施させた。なお、本検証は東京消防庁技術改良検証倫理審査専門部会の承認を得て実施した。

(1) 被験者

健康診断による就業区分が「W1」（通常勤務可）に属する消防技術安全所の男性消防吏員のうち、本検証を実施するにあたり、検証の目的及び危険性について十分な説明を行い、被験者となることの同意を得られた者（7名）を被験者とした。表1に被験者の身体特性を示す。

表1 被験者の身体特性

	年齢（歳）	身長（cm）
平均	34.3	173.0
標準偏差	5.9	10.3

(2) 実施期間

平成30年7月9日（月）から同年9月20日（水）

(3) 場所

東京消防庁 消防技術安全所2階 運動学実験室

(4) 環境条件

恒温恒湿室（三菱重工冷熱社製）にて、試験室は室温30℃、湿度60%とした。これは、東京の2015～2017年の7・8月の日最高気温の平均値30.6℃を参考にした

3)。また、湿度は太陽近似光照射装置（反射型メタルハライドランプ）CMR360・L/BU-N・D-TYW（GS ユアサライティング社製）が点灯可能範囲で最も高湿度環境である60%とし、太陽近似光照射装置を用いて照射した。この装置はランプ中央から直下 1.4mで設定値となるが、本検証ではトレッドミル上の各被験者の頭部の位置で真夏日の日射量である 900 W/m^2 となるように、太陽近似光照射装置を部分点灯させ、調整した。前室は被験者の検証前の環境を統一にするため、室温を 25°C 、湿度 60%とした。これは夏日と言われる日最高気温が 25°C 以上であり、試験室との差異を室温のみにするため、試験室と同湿度とした。なお、試験室は壁一面から給気されており、被験者が運動するトレッドミル上はほぼ無風である。

(5) 運動条件

ア 運動負荷

トレッドミル INTDX（LifeFitness 社製）上で時速 3.5km の歩行を、面体無しで 20 分間実施後、面体着装のために 2 分間中断した。2 分間で面体を着装させた後、歩行を再開し 23 分間実施、合計 45 分間の運動負荷とした（写真）。これは消防活動の身体的負荷に関する研究⁴⁾を参考にし、予備検証を実施したうえで決定した。



写真 運動の様子

イ 運動中止基準

次の基準に達した場合、運動を中止させた。

- (ア) 自己申告があった場合
- (イ) 測定者が中止を判断した場合
- (ウ) 空気ポンプの残圧がなくなった場合
- (エ) 以下の 3 つの基準のうち 2 つ以上満たした場合

外耳道温度が 38.0°C に到達した時点、VAS 値が 80 を超えた時点（被験者には一定値と説明）、心拍数が 180bpm 前後を超えた時点

(6) 着衣条件

執務服の上から冷却ベスト、毒劇物防護衣、空気呼吸器、保安帽の順で着装した。また、毒劇物防護衣の着装から現着までを想定し、運動開始 10 分前に着装するものとした。

(7) 休息条件

ア 休息時間

予備検証を行った際の体温の回復状況や冷却剤の持続時間、実災害時の休息時間等を踏まえて、運動終了直後から 30 分間とし、椅子に座位とした。

イ 休息中の冷却剤

運動終了後も冷却剤の交換は実施せず、運動開始から休息終了まで同一のものを継続して使用した。

ウ 休息中の水分補給

摂取量は、体格による体温への影響を考慮し、被験者の「運動前の体重 $\times 1\%$ 」のスポーツドリンクとした。これを 3 等分し、休息開始時、10 分後、20 分後に摂取させた。なお、飲料による清涼感等がストループ検査に影響を与えないように、休息開始時の水分補給はストループ検査後とした。

エ 休息中の着衣条件

運動終了直後に保安帽、空気呼吸器、毒劇物防護衣を離脱させ、執務服、冷却ベストは着用したままとした。

(8) 冷却ベスト等

本検証で使用した各冷却ベストの諸元・性能を表 2 に示す。以下、冷却ベストの着用なしの条件を「ベストなし」、現行の冷却ベストを着用する条件を「低融点ベスト」、融点 14°C の冷却剤を使用した冷却ベストを着用する条件を「中融点ベスト」、融点 28°C の冷却剤を使用した冷却ベストを着用する条件を「高融点ベスト」、冷却部位を変更した冷却ベストを着用する条件を「部位ベスト」という。各冷却ベストは冷却剤を装填した状態で約 -15°C の冷凍庫に保管し、着装直前に取り出した。なお、部位ベストの場合、低融点ベストと冷却剤の個数を合わせるため、執務服下衣の左右の切り込みポケット⁵⁾に 1 個ずつ挿入し、大腿部も冷却した。

(9) 測定項目

ア 推定発汗量

推定発汗量は検証開始前と検証終了後に体組成計 innerScan DUAL（タニタ社製）で裸体重を測定し、「検証開始前の体重－（検証終了後の体重－休息時の水分摂取量）」で算出した。

イ 運動時間

運動時間はストップウォッチ S035-4000（セイコー社製）を使用し、運動開始から運動終了までを測定した。

ウ 外耳道温度

外耳道温度は高機能温度計 LT-2（グラム社製）を使用し、測定した。耳栓型センサー LT-2N-13（グラム社製）のプローブを被験者の右耳孔に挿入し、測定は検証中経時的に実施した。外耳道温度は高機能温度計のデジタル画面に表示され、その画面を恒温恒湿室試験室内で測定者が随時観察した。

エ 心拍数

心拍数は心拍数計 RS800CX（ポラール社製）を使用し、測定した。測定器 WearLink w.i.n.d（ポラール社

表2 各冷却ベストの諸元・性能

条件	ベスト外観	冷却剤外観	融点	サイズ（１個）	冷却部位	総重量
低融点ベスト			0℃	130 mm×200 mm 約 200g	胸部 2 個 背部 3 個	約 1160g
中融点ベスト			14℃	150 mm×180 mm 約 280g	胸部 2 個 背部 2 個	約 1220g
高融点ベスト			28℃	70 mm×130 mm 約 85g	胸部 6 個 背部 10 個	約 1680g
部位ベスト			0℃	130 mm×200 mm 約 200g	上背部 1 個 側胸部 2 個 大腿部 2 個	約 1220g

製)を装着したバンドを被験者の胸部に装着し、測定は検証中経時的に実施した。心拍数データは腕時計型受信機へ無線により伝送され、恒温恒湿室試験室内で測定者が随時観察した。

オ 冷却剤の表面温度

冷却剤の表面温度は温湿度ロガー・ハイグロクロン（KNラボラトリーズ社製）を使用し測定した。ハイグロクロンの温度測定面を冷却剤に接触させ、サージカルテープで固定し、検証中経時的に測定を実施した。測定した冷却剤は右肩甲骨に位置する冷却剤で統一した。

力 毒劇物防護衣内の温湿度

毒劇物防護衣内の温湿度は温湿度ロガーハイグロクロンを使用し測定した。測定箇所は他の資器材との干渉や冷却剤の衣服内への影響を考慮し、執務服外側の胸部に設定し、運動中経時的に測定した。

キ 暑さに関する主観的評価

暑さに関する主観的評価は Visual Analogue Scale (以下「VAS」という。)法にて、運動中は開始時、開始から5分毎、終了時に、休息中は開始時及び10分毎に測定した。VASは記録用紙に水平100mmの直線が予め記されており、この直線の左端を「全く感じない」、右端を「耐えられない」とし、測定時に被験者が感じた暑さの程度を直線上に印を記させるものである(図1)。

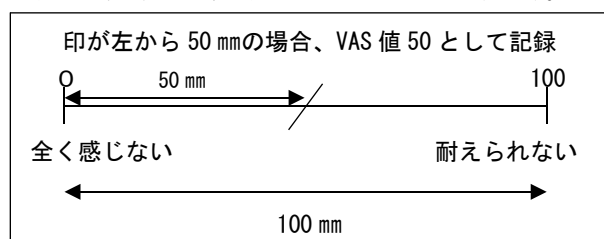


図 1 VAS の例

直線上に記された印の位置を左端からの距離 (mm) で求め、この数値 (0~100) を VAS 値といい、主観的評価として用いた。

ク 認知機能の評価

認知機能の評価には、新ストループ検査Ⅱを使用した。ストループ干渉は言語的妨害（不適切な文字からの妨害）、逆ストループ干渉は視覚的妨害（インクの色からの妨害）のことである⁶⁾。この検査は、以下の4種類の課題から構成されるマッチング方式の検査である（図2）。

課題 1 : 左の言葉が表すインクの色を選ぶ。

く					
ろ					✓

課題 2 : 左の言葉が表すインクの色を選ぶ。

く					
ろ				✓	

課題 3 : 左のインクの色に当たる言葉を選ぶ。

	きいろ	あ お	みどり	く✓ろ	あ か
--	-----	-----	-----	-----	-----

課題 4 : 左の言葉が書かれているインクの色に当たる言葉を選ぶ。

あ か	みどり	く✓ろ	あ か	あ お	きいろ
-----	-----	-----	-----	-----	-----

図2 新ストループ検査Ⅱの課題例

課題 1 では、黒インクで書かれた文字が意味する色をその右側の 5 種類（赤、青、緑、黒、黄）の色パッチの中から選び、印をつけることが求められる（逆ストループ干渉統制課題）。課題 2 は、色と色名が不一致な語が意味する色をその右側の 5 種類（課題 1 と同様）の色パ

ッチの中から選び、印をつけることが求められる（逆ストループ干渉課題）。課題3は、色パッチのインクの色に対応する色名語を5種類（あか、あお、みどり、くろ、きいろ）の中から選び、印をつけることが求められる（ストループ干渉統制課題）。課題4は色と色名が不一致な語の印字しているインクの色に対応する色名語を5種類（課題3と同様）の中から選び、印をつけることが求められる（ストループ干渉課題）。各課題は練習試行10試行、本試行100試行から構成され、課題の遂行時間は練習試行では10秒、本試行では60秒である。なお、実際の検査用紙はカラー印刷されている。

ケ 血糖値

血糖値は採血用穿刺器具ナチュラレットEZ（アークレイマーケティング社製）を使用し、指尖部に自ら穿刺し、血糖測定器Acuu-Chek Aviba（ロシュDCジャパン社製）で測定した。測定は運動前、運動後、休息後に実施した。

コ 血中乳酸値

血中乳酸値は採血用穿刺器具ナチュラレットEZを使用し、指尖部に自ら穿刺し、血中乳酸測定器ラクテートプロ（アークレイ社製）で測定した。測定は血糖値測定と同様とした。

(10) 統計に基づく分析

各項目の平均値を比較するため、統計ソフト（IBM SPSS Statistics Version21）を使用した。分析に使用した統計検定法を表3に示す。以下、表及び図中のn.s.は有意差なし、*は5%水準で有意を表し、†は10%水準で有意傾向を表す。

表3 使用した統計検定法

検定項目	検定法
推定発汗量	
運動時間	一要因分散分析（対応あり） 多重比較はBonferroni法
外耳道温度	
心拍数	
冷却剤表面温度	
毒劇物防護衣内 温湿度	
暑さに関する 主観的評価	二要因分散分析（対応あり・あり） 多重比較はBonferroni法
認知機能	
血糖値	
血中乳酸値	

3 結果

各項目の測定結果については、被験者7名のデータの平均値とする。なお、各項目の平均値の比較にあつては、冷却剤の効果と冷却部位の効果を明確にするため、着用なし、低融点ベスト、中融点ベスト及び高融点ベストの4条件（以下「冷却剤別」という。）と着用なし、低融

点ベスト及び部位ベストの3条件（以下「冷却部位別」という。）に分けて、分析した。

(1) 推定発汗量

検証中の1分あたりの推定発汗量を図3、図4に示す。冷却剤別の比較で、ベストなしと低融点ベストに有意傾向が認められた。また、冷却部位別の比較でベストなしと低融点ベスト及び部位ベストに有意な差が認められた。

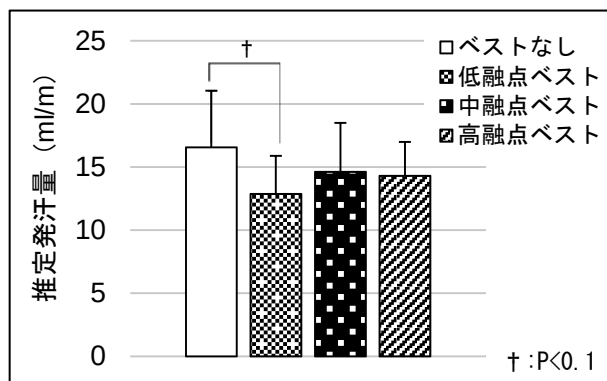


図3 冷却剤別の推定発汗量

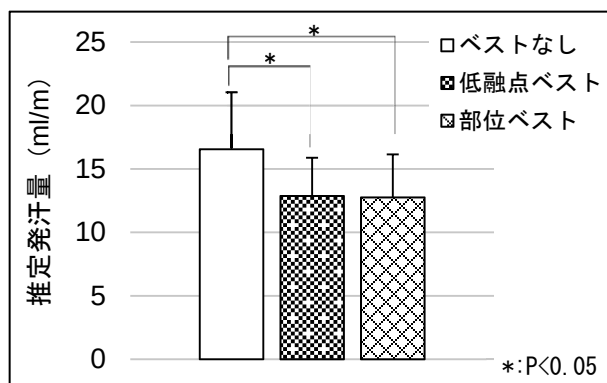


図4 冷却部位別の推定発汗量

(2) 運動時間

全条件の運動時間を図5に示す。冷却剤別及び冷却部位別の比較で条件間に有意な差は認められなかった。

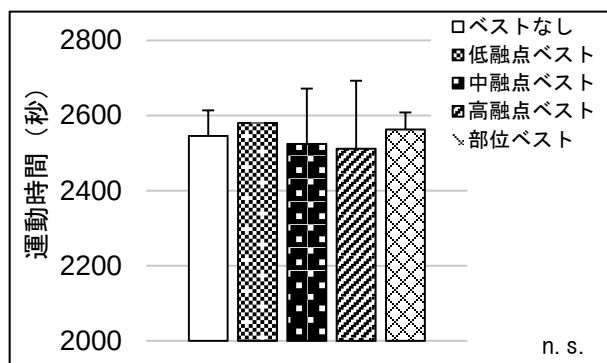


図5 各条件の運動時間

(3) 外耳道温度

運動開始から運動終了までの外耳道温度の上昇値を図6、図7に示す。冷却剤別の比較で、ベストなしと低融点ベスト、中融点ベスト及び高融点ベストに有意な差が認められた。冷却部位別の比較で、ベストなしと低融点ベスト及び部位ベストに有意な差が認められた。

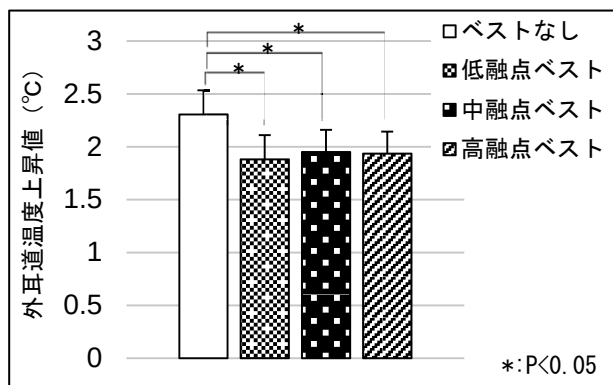


図6 冷却剤別の外耳道温度上昇値（運動中）

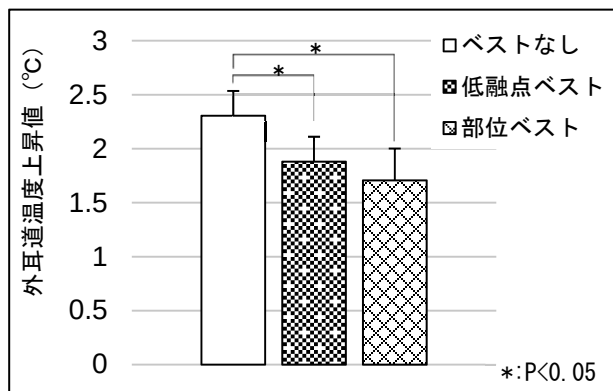


図7 冷却部位別の外耳道温度上昇値（運動中）

(4) 心拍数

相対評価するため、式（1）及び式（2）により心拍増加率及び心拍減少率を算出した。この心拍増加率は酸素摂取量と極めて高い相関を有する指標の1つである⁷⁾。

$$\text{心拍増加率 (\%)} = \frac{(\text{測定時心拍数} - \text{安静時心拍数})}{(\text{実測最高心拍数} - \text{安静時心拍数})} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{心拍減少率 (\%)} = \text{心拍増加率} - 100 \quad (2)$$

ア 運動中

全条件の心拍増加率を図8、図9に示す。冷却剤別及び冷却部位別の比較で、条件間に有意な差は認められなかった。

イ 休息中

心拍減少率を図10、図11に示す。冷却剤別の比較で、ベストなしと中融点ベスト及び高融点ベストに有意な差が認められた。冷却部位別の比較で、ベストなしと部位ベストに有意な差が認められた。

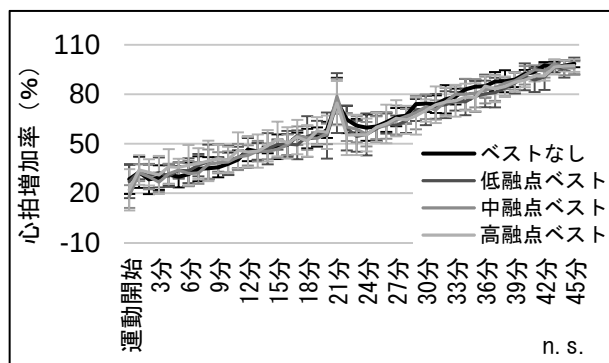


図8 冷却剤別の心拍増加率（運動中）

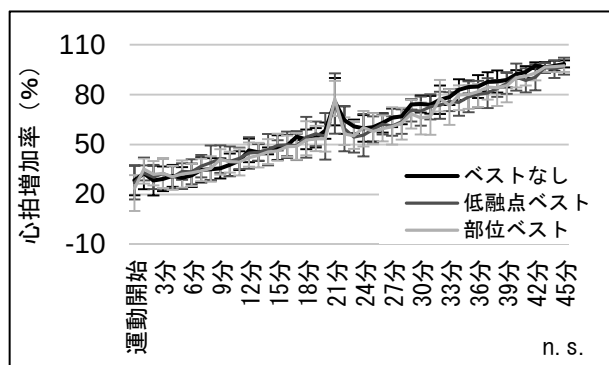


図9 冷却部位別の心拍増加率（運動中）

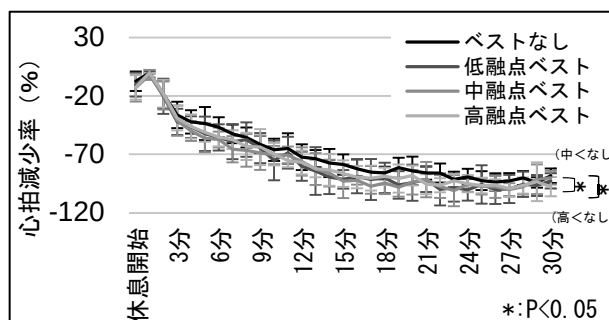


図10 冷却剤別の心拍減少率（休息中）

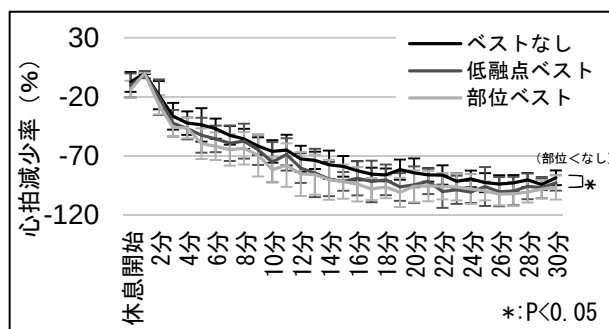


図11 冷却部位別の心拍減少率（休息中）

(5) 冷却剤の表面温度

本検証では融点の異なる3種類の冷却剤を使用しているため、低融点ベスト、中融点ベスト、高融点ベストにおいて運動中の冷却剤の表面温度を比較した。冷却剤の

表面温度を図 12 に示す。なお、図中の●は主観的な冷え感が消失した時間をアンケート調査し、その平均値である。有意な交互作用が認められ、単純主効果も認められた。多重比較検定の結果、運動中はいずれの時間においても低融点ベストと中融点ベスト及び高融点ベストに有意な差が認められた。また、5分以降において、中融点ベストと高融点ベストに有意な差が認められた。

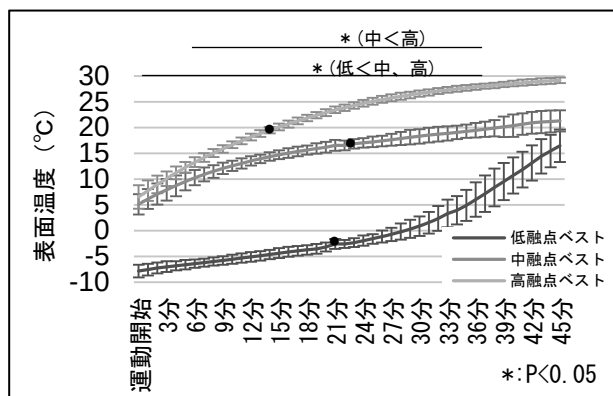


図 12 冷却剤の表面温度

(6) 毒劇物防護衣内の温湿度

ア 温度

毒劇物防護衣内の温度を図 13、図 14 に示す。冷却剤別の比較で、有意な交互作用が認められ、単純主効果が認められた。多重比較検定の結果、運動中はいずれの時間においてもベストなしと低融点ベスト、中融点ベスト及び高融点ベストに有意な差が認められた。また、25分以降において、中融点ベストと高融点ベストに有意な差が認められた。冷却部位別の比較で、有意な交互作用が認められ、単純主効果も認められた。多重比較検定の結果、運動中はいずれの時間においてもベストなし及び部位ベストと低融点ベストに有意な差が認められた。また、8～21分においてベストなしと部位ベストで有意な差が認められた。

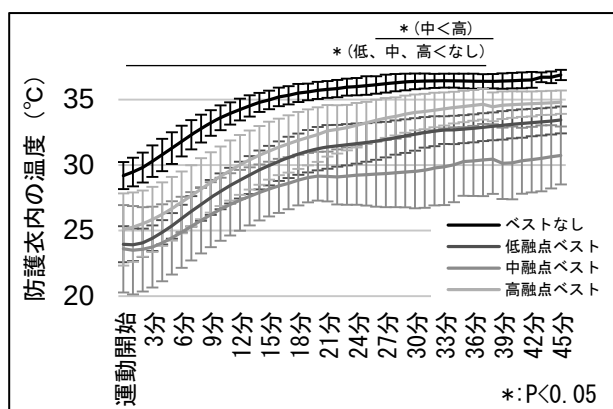


図 13 冷却剤別の毒劇物防護衣内温度

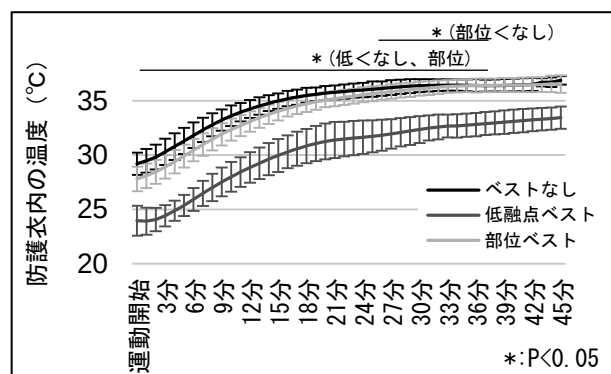


図 14 冷却部位別の毒劇物防護衣内温度

イ 湿度

毒劇物防護衣内の湿度を図 15、図 16 に示す。冷却剤別の比較で、条件間に有意な差は認められなかったが、2分以降において運動開始時と有意な差が認められた。冷却部位別の比較で、有意な交互作用が認められ、単純主効果も認められた。多重比較検定の結果、有意な差は認められなかった。

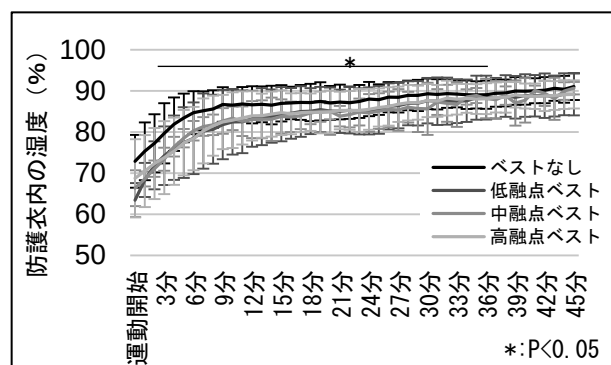


図 15 冷却剤別の毒劇物防護衣内湿度

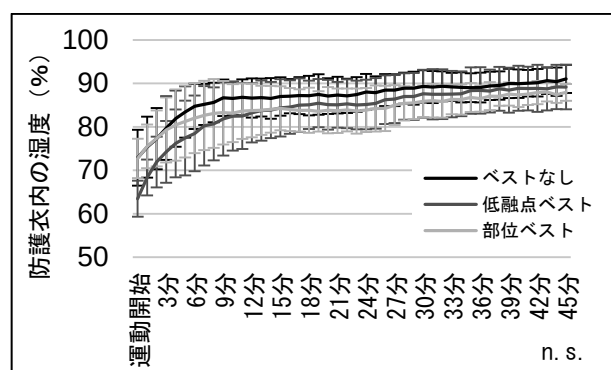


図 16 冷却部位別の毒劇物防護衣内湿度

(7) 暑さに関する主観的評価

ア 運動中

運動中の暑さに関する主観的評価を図 17、図 18 に示す。冷却剤別の比較で、条件間に有意な差は認められなかった。冷却部位別の比較で、ベストなしと低融点ベ

ト及び部位ベストに有意な差が認められた。

イ 休息中

休息中の暑さに関する主観的評価を図 19、図 20 に示す。冷却剤別の比較で条件間に有意な差は認められなかった。冷却部位別の比較で、有意な交互作用が認められ、単純主効果も認められた。多重比較検定の結果、運動開始時にベストなしと部位ベストに有意な差が認められた。

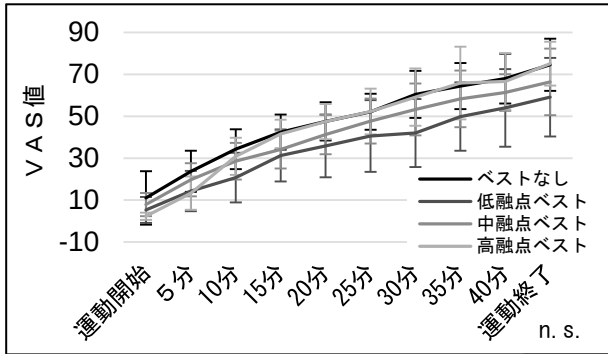


図 17 冷却剤別の VAS 値（運動中）

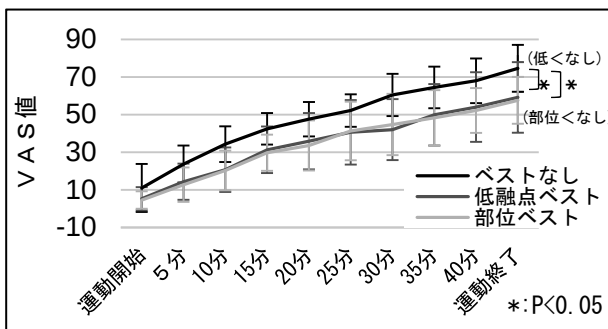


図 18 冷却部位別の VAS 値（運動中）

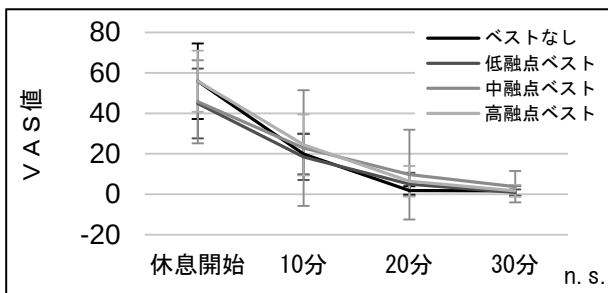


図 19 冷却剤別の VAS 値（休息中）

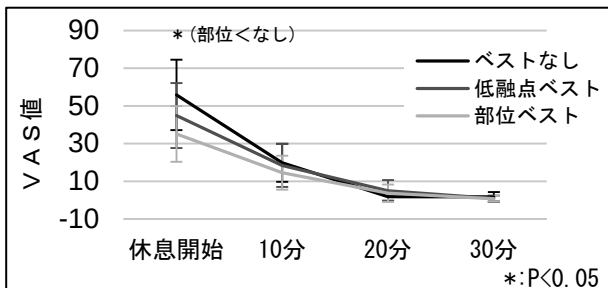


図 20 冷却部位別の VAS 値（休息中）

(8) 認知機能

ア 合計達成数

課題 1～4 のそれぞれの達成数を条件ごとに合計し、比較した。合計達成数を図 21、図 22 に示す。冷却剤別及び冷却部位別の比較で、条件間に有意な差は認められなかったが、運動前と運動後及び休息後に有意な差が認められた。

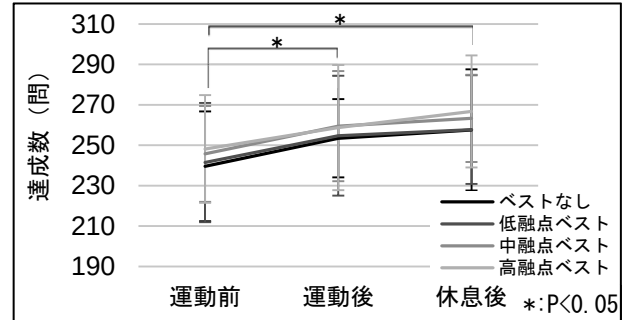


図 21 冷却剤別の合計達成数

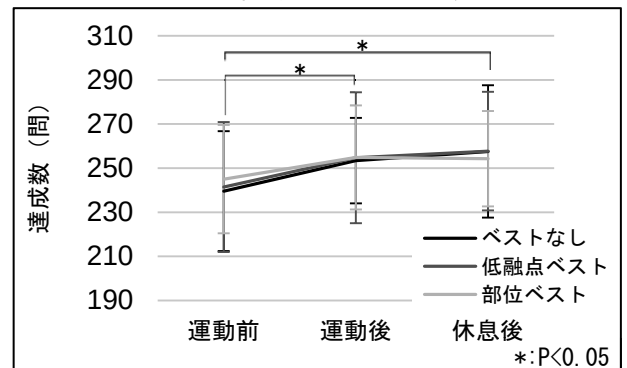


図 22 冷却部位別の合計達成数

イ 正答率の変化率

課題 1～4 の合計達成数と合計正答数から式 (3) により正答率を算出した。

$$\text{正答率 (\%)} = \frac{\text{全正答数}}{\text{全達成数}} \times 100 \quad (3)$$

また、運動前の正答率を 100 とし比較するため、式 (4) により正答率の変化率を算出した。

$$\text{正答率の変化率 (\%)} = \frac{\text{運動後正答率 or 休息後正答率}}{\text{運動前正答率}} \times 100 \quad (4)$$

正答率の変化率を図 23、図 24 に示す。冷却剤別及び冷却部位別の比較で、条件間に有意な差は認められなかった。

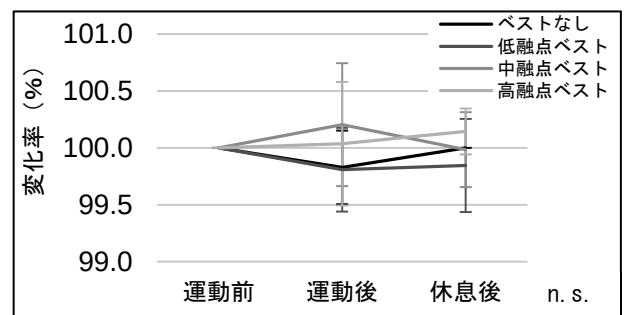


図 23 冷却剤別の正答率の変化率

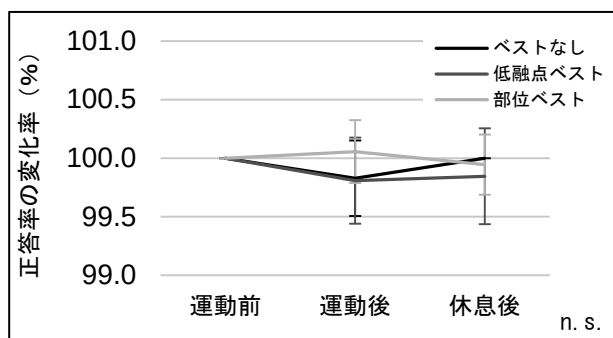


図 24 冷却部位別の正答率の変化率

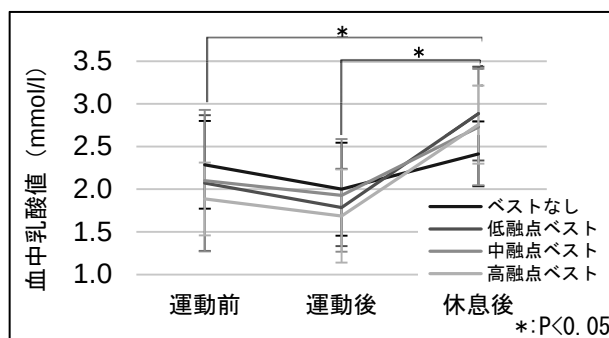


図 27 冷却剤別の血中乳酸値

(9) 血糖値

血糖値を図 25、図 26 に示す。冷却剤別及び冷却部位別の比較で条件間に有意な差は認められなかったが、冷却剤別では運動前及び運動後と休息後、冷却部位別では運動前と運動後、運動前及び運動後と休息後に有意な差が認められた。

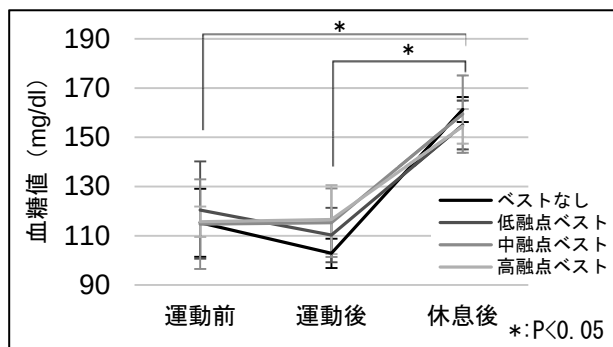


図 25 冷却剤別の血糖値

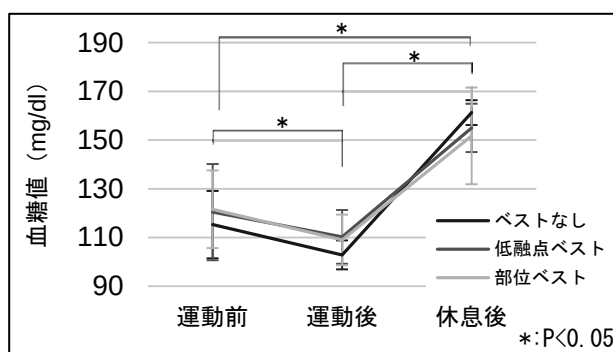


図 26 冷却部位別の血糖値

(10) 血中乳酸値

血中乳酸値を図 27、図 28 に示す。冷却剤別及び冷却部位別の比較で、条件間に有意な差は認められなかったが、運動前及び運動後と休息後に有意な差が認められた。

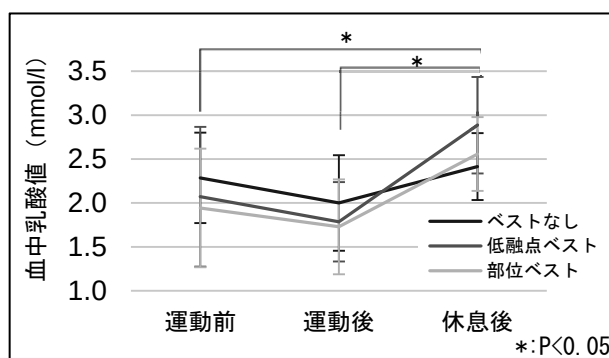


図 28 冷却部位別の血中乳酸値

4 考察

(1) 推定発汗量

冷却剤別の比較で、ベストなしより低融点ベストで推定発汗量を抑制する傾向であった。また、冷却部位別の比較で、ベストなしより低融点ベスト及び部位ベストで推定発汗量を抑制した。冷却ベストは運動中の皮膚温度を低く保つことにより、発汗開始を遅延させ、運動中の発汗量抑制の一要因であることが示唆されている⁸⁾。本検証では皮膚温度及び発汗開始時間を測定していないが、ベストなしより低融点ベスト及び部位ベストで皮膚温度を低く保ったことにより、発汗開始を遅延させ、発汗量を抑制したと考えられる。また、発汗量を抑制することで脱水を防止し、熱中症未然防止対策として効果があると考えられる。

(2) 運動時間

冷却剤別及び冷却部位別の比較で、条件間に有意な差は認められなかった。運動を中止した者（以下「運動中止者」という。）はベストなしで2名、中融点ベスト、高融点ベスト及び部位ベストで1名ずつとなった。ベストなしの運動中止者2名のうち1名と中融点ベスト及び高融点ベストの運動中止者の計3名は運動中止基準(エ)のうち、外耳道温度とVAS値が基準値を超えたため運動を中止させた。運動中止者以外にも外耳道温度が38℃を超えた者はいたが、中融点ベストおよび高融点ベストは低融点ベストと比較して、冷却剤の温度は高く、皮膚温度との温度差が小さいことから、冷え感が弱くVAS値が

上昇したと考えられ、それに伴い運動時間も短縮したと考えられる。他の運動中止者2名は、空気ボンベの残圧がなくなったため運動を中止させた。運動中において、面体からの空気漏洩を確認しており、運動時間に影響したと考えられる。

(3) 外耳道温度

運動中における冷却剤別及び冷却部位別の比較で、ベストなしより低融点ベスト、中融点ベスト、高融点ベスト及び部位ベストで外耳道温度の上昇抑制がみられた。消防活動における熱中症予防対策の研究⁹⁾において防火衣着用時の冷却ベストの体温上昇抑制効果が示唆されたが、毒劇物防護衣着用時でも冷却ベストの有効性が確認できた。また、外耳道温度上昇値と推定発汗量の関係を検討した結果、相関係数 $r=0.449$ で有意な中程度の関係が認められた。外耳道温度上昇値と推定発汗量には正の相関があり、外耳道温度上昇値が高いほど、推定発汗量が多くなることが分かった。

(4) 心拍数

ア 運動中

冷却剤別及び冷却部位別の比較で条件間に有意な差は認められなかったが、本検証の運動において、条件によって冷却ベストの総重量や融点は異なるが心拍増加率はほぼ同じ推移であった。この心拍増加率は安静時心拍数と実測最高心拍数の範囲の割合で示したものであり、運動時間がほぼ同程度であったことから、ほぼ同じ推移であったと考えられる。しかし、実測値で検討すると、安静時心拍数と実測最高心拍数の差の平均値はベストなしが最も大きかった。心拍数は運動強度やエネルギー消費量に比例して高まること¹⁰⁾や心拍数の増加の主な要因は運動中の体内の水分不足によること¹⁰⁾とされている。本検証では運動強度がほぼ同程度であり、推定発汗量の結果から、ベストなしより冷却ベストを着用した方が、エネルギー消費量や発汗量を抑制し、心拍数の上昇抑制に効果があると考えられる。

いずれの条件でも、21分時に歩行を中断しているにもかかわらず、心拍増加率の20ポイント程度の急上昇が見られた。21分時は面体を装着している時分である。面体装着は2分間で装着しなければならず、被験者は毒劇物防護衣装着時の面体装着に対し、必ずしも技術的に長けているわけではない。精神的緊張が生じると交感神経が亢進し心拍数は高まるため¹⁰⁾、面体装着時の緊張感や焦燥感が生じ、一時的に心拍増加率が高まったと考えられる。

イ 休息中

冷却剤別の比較でベストなしより中融点ベスト及び高融点ベスト、冷却部位別の比較でベストなしより部位ベストで心拍減少率は低かった。いずれの条件も3分時までにはほぼ同じ推移であるが、それ以降は冷却ベストを着用した方が低く推移している。体内の水分量の不足が心拍数を高めること¹⁰⁾や、体温が低下すると皮膚血流量

も低下し中心静脈還流が増加することで心拍数が低下する¹¹⁾ことから発汗量を抑制することで体内の水分量を保持し、体温をいち早く低下させたため、心拍減少率が低下したと考えられる。実測値で検討しても、安静時心拍数と休息終了時の実測心拍数の差の平均値はベストなしが最も大きかったことから、ベストなしより冷却ベストを着用した方が早く安静時心拍数に近づけ、身体的負担は軽減されることが考えられる。

いずれの条件でも1分時に心拍減少率の10ポイント程度の急上昇が見られる。1分時は空気呼吸器や毒劇物防護衣等を離脱している時分である。休息開始直後可能な限り早く新ストループ検査Ⅱを実施できるように、早期の離脱を促したため、緊張感や焦燥感が生じ、一時的に心拍減少率が高まったと考えられる。

(5) 冷却剤の表面温度

低融点ベストが最も低く、次いで中融点ベスト、高融点ベストの順で低かった。それぞれのベストは装着直前まで冷凍庫で冷却しており、運動開始10分前に装着した。運動開始時には低融点ベストは $-7.8 \pm 1.2^{\circ}\text{C}$ 、中融点ベストは $5.1 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$ 、高融点ベストは $6.5 \pm 2.3^{\circ}\text{C}$ であり、低融点ベストとそれぞれのベストとの表面温度差は中融点ベストで 12.9°C 、高融点ベストで 14.3°C であった。それぞれの融点に達する時間は低融点ベストで約29分、中融点ベストで約13分、高融点ベストで約37分であり融点までの持続時間は高融点ベストが最も長かったが、融点が高い分、皮膚温度との差は小さく、冷え感も弱かったと考えられる。また、主観的な冷え感の持続時間をアンケート調査した結果、それぞれの平均値は低融点ベストで20分、中融点ベストで22.9分、高融点ベストで13分であった。低融点ベストの20分後の表面温度は -3.2°C であり、十分に温度は低い、主観的な冷え感は消失している。これは皮膚が冷却剤の温度に順応したため、冷え感が消失したと考えられる。

(6) 毒劇物防護衣内の温湿度

ア 温度

冷却剤別の比較で、ベストなしより低融点ベスト、中融点ベスト及び高融点ベストで毒劇物防護衣内の温度が低かった。また、25分以降においては高融点ベストより中融点ベストで毒劇物防護衣内の温度が低かった。冷却部位別の比較で、ベストなし及び部位ベストより低融点ベストで毒劇物防護衣内の温度が低かった。部位ベストは時間によってはベストなしより低かったが、ほぼ同程度であった。部位ベストは他のベストと異なり、胸部を冷却していない。温湿度ロガーを胸部に設定していたため、ベストなしと同程度であったと考えられる。

ベストなしとの温度差は中融点ベストで最も大きかったが、中融点ベストの冷却剤は溶けにくくさせるため、厚みがあり表面が湾曲しており、身体との接触面積が小さい。それに比べ、低融点ベストや部位ベストの冷却剤は表面温度が低く、形状も平らである。これらのことと

推定発汗量や外耳道温度等の結果から、身体に接触している冷却剤の温度や面積に比べ、毒劇物防護衣内の温度が身体に与える影響は小さいと考えられる。

衣服内気候（衣服と皮膚との間の微少な空間の温度、湿度、気流の総称）には快適域が存在し、温度：32±1℃、湿度：50±10%RH、風速：25±15 cm/sec と言われている¹²⁾。本検証では衣服と衣服の間の温湿度を測定しているが、この快適域を準用するならば、衣服内温度に関して、33℃以上で暑熱に対する不快感が高まることになる。運動中における各条件の毒劇物防護衣内の温度が33℃に達するまでの時間は、運動開始からベストなしで9分、低融点ベストで38分、高融点ベストで24分、部位ベストで12分、中融点ベストに関しては運動終了まで33℃に達しなかった。毒劇物防護衣内の温度に関して、冷却ベストを着用しなければ、運動開始から10分程度で快適域から逸脱してしまうことが分かった。

イ 湿度

冷却剤別及び冷却部位別の比較で、条件間に有意な差は認められなかった。前項で述べた快適域について、運動開始時に最も低かった低融点ベストの毒劇物防護衣内の湿度でも63.5±4.1%であり、いずれの条件も快適域から逸脱していた。本検証では試験室及び前室の湿度は60%であり、発汗や冷却剤の結露、毒劇物防護衣内の気流が乏しかったこと等から毒劇物防護衣内の湿度は上昇する一方であったと考えられる。

(7) 暑さに関する主観的評価

ア 運動中

冷却剤別の比較で条件間に有意な差は認められなかったが、冷却部位別の比較で、ベストなしより低融点ベスト及び部位ベストで暑さに関するVAS値が低かった。「暑さ」は体温が平熱よりも高い時に生じる不快感で、それは体温がさらに高くなる方向で変化する場合により強くなる¹³⁾。ベストなしより低融点ベスト及び部位ベストで外耳道温度を抑制させたことと、運動終了時の冷却剤の表面温度がVAS値に影響したと考えられる。

イ 休息中

冷却剤別の比較で条件間に有意な差は認められなかったが、冷却部位別の比較で休息開始時にベストなしより部位ベストでVAS値を抑制した。運動終了時にも有意に抑制していたことや冷却ベストの上半身を覆う面積が部位ベストで最も小さいことから、休息開始時にも抑制させたと考えられる。

(8) 認知機能

ア 合計達成数

冷却剤別及び冷却部位別の比較で、条件間に有意な差は認められなかったが、運動前より運動後及び休息後に合計達成数が向上した。15分間の歩行が脳の神経活動を活性化させ、認知機能に望ましい影響を及ぼす可能性が示唆されている¹⁴⁾。本検証でも支持する結果となった。

イ 正答率の変化率

冷却剤別及び冷却部位別の比較で、有意な差は認められなかった。高体温は脳波の反応実行系を亢進し、認知処理系を抑制する可能性があることから¹⁵⁾、合計達成数は向上し、正答率の変化率は低下する条件もあったと考えられる。

(9) 血糖値

冷却剤別及び冷却部位別の比較で、条件間に有意な差は認められなかったが、運動前及び運動後より休息後で血糖値が上昇した。これは休息中に摂取したスポーツドリンクが影響していると考えられる。また、空腹時の血糖値の正常値は70～110mg/dl、食後120分の血糖値の正常値は140mg/dl未満であり、休息後には各条件の平均値は150mg/dl以上であった。本検証で使用したスポーツドリンクは100mlあたり炭水化物6.2gであったが、糖質補給の観点でいえば体重×1%のスポーツドリンクの摂取は30分あれば充分吸収されることが分かった。

(10) 血中乳酸値

冷却剤別及び冷却部位別の比較で条件間に有意な差は認められなかったが、運動前及び運動後より休息後で上昇した。乳酸は糖分解の過程で産生されるエネルギー基質である。運動強度がより高くなった場合に、糖代謝活性がミトコンドリアの酸化活性よりも高くなり、ピルビン酸が過剰に産生され酸素があっても乳酸が蓄積する¹⁶⁾。しかし、分解の早い果糖を摂取することで、同様の状況となり、運動をしていないのに血中乳酸値が上昇する¹⁶⁾。本検証で飲用したスポーツドリンクには果糖ブドウ糖液糖が含まれている。果糖ブドウ糖液糖は果糖含有率（糖のうち果糖の割合）が50%以上90%未満のものをいう¹⁷⁾。休息中にスポーツドリンクを摂取することで、糖代謝が活性化しピルビン酸が過剰に産生されたため、血中乳酸値が上昇したと考えられる。

5 おわりに

(1) 外耳道温度の上昇抑制、推定発汗量の抑制及び毒劇物防護衣内温度の上昇抑制の点から、全ての冷却ベストについて熱中症未然防止対策に対する有用性が確認できた。

毒劇物防護衣内温度が最も低かった中融点ベストの冷却剤は、溶けにくくさせるため厚みがあり、表面が湾曲しているため身体との接触面積が小さく、身体に与える影響は小さかった。それに比べ、低融点ベスト及び部位ベストの冷却剤は表面温度が低く、形状は平らであり、身体と冷却剤の伝熱が効率良くなされていると考えられ、現行の融点0℃の冷却剤を使用し、身体との接触面積を大きくすることが熱中症未然防止対策としてより効果的であると考えられた。

具体例として、現行の冷却ベストの全ポケットを使用するほか、執務服下衣の左右の切り込みポケットや救助服下衣の左右の袋式ポケット¹⁸⁾にも現行の融点0℃の

冷却剤を挿入することが望ましいと考えられた。

(2) 被験者が感じている冷却剤の冷え感と実際の冷却剤の表面温度には、順応による差異が生じていることが分かった。被験者が冷え感を感じなくなった 20 分以降も、低融点ベストの冷却剤の表面温度は十分に低いため、使用の継続は身体冷却として効果的であると考えられた。しかし、運動開始から 45 分経過すると冷却剤の表面温度は 16℃を超え、その後は皮膚温度や外気温度に近づき上昇するため、運動開始から 45 分を目途に冷却剤の交換は必要であると考えられる。そのためには所属の冷却剤の配置数の増加、搬送手段や部隊運用に配慮すること等が必要であると考えられた。

6 謝辞

本検証の実施にあたり、救急救命東京研修所の田邊晴山教授より貴重な知見を賜りました。ここに感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 東京消防庁警防規程事務処理要綱 消防活動基準 一般火災災害現場における活動管理要領 別紙 3
- 2) 鈴木峻ほか 2 名：効果的な身体冷却に関する検証第 1 報、消防技術安全所報 55 号、pp. 48-56、2018
- 3) 国土交通省・気象庁ホームページ、<http://www.jma.go.jp>
- 4) 伊藤昌夫ほか 2 名：消防活動の身体的負担に関する研究、消防科学研究所報 35 号、pp. 110-118、1998. 9
- 5) 東京消防庁消防吏員服制 第 1 条 別表第 1
- 6) 箱田裕司ほか 1 名：新ストループ検査Ⅱ、株式会社トーヨーフィジカル、2005
- 7) 山田容三ほか 1 名：森林作業研究における心拍数評価法の統計的検討、日本森林学会誌 Vol. 79-1、pp. 1-8、1997
- 8) 長谷川博ほか 3 名、暑熱化運動中におけるクーリングジャケットの着用が体温調節反応および持久的運動能力に与える影響、体力科学 Vol. 51-6、p. 683、2002
- 9) 町田広重ほか 4 名：消防活動における熱中症予防対策の研究、消防科学研究所報 37 号、pp. 110-120、2000. 9
- 10) 山地啓司：こころとからだを知る心拍数、杏林書院、2013
- 11) 金野亮太ほか 2 名：暑熱環境下での自転車走行中における水かぶりが生理的・心理的、指標に及ぼす効果；大学生自転車競技選手を対象として、トレーニング科学 Vol. 22-4、pp. 357-365、2010
- 12) 原田隆司ほか 1 名：衣服の快適性と衣服内気候-衣服内の水分/熱移動現象のとらえ方-、繊維学会誌 Vol. 46-3、pp. 97-101、1990
- 13) 彼末一之監修：からだと温度の事典、朝倉書店、2012
- 14) 山本大誠ほか 5 名：身体運動が認知機能および脳の神経活動に及ぼす影響、神戸学院総合リハビリテーション研究 Vol. 2-2、pp. 37-42、2007
- 15) 柴崎学ほか 2 名：暑熱環境下における聴覚情報処理及び高次認知機能の評価、デサントスポーツ科学 Vol. 37、pp. 82-91、

2016

- 16) 八田秀雄：乳酸をどう考えたらよいか、体力科学 Vol. 59、pp. 8-10、2010
- 17) 農林水産省ホームページ <http://www.maff.go.jp>
- 18) 東京消防庁消防吏員服制 第 1 条 別表第 6

Study on the Effective Cooling of the Body (Second Report)

Syun SUZUKI*, Yuuji SHIMIZU*, Tsuguo GENKAI**

Abstract

Apparatuses for protecting firefighters have excellent flame protection performance and chemical resistance. On the other hand, firefighters are forced to work under a severe heat environment because the apparatus disturbs the heat dissipation for temperature control. At present, the operations standards of the Tokyo Fire Department indicate the proactive use of coolants in the activities in summer for the purpose of preventing heatstroke. The study conducted last year suggests that the coolant at a melting point of 0° C applied to the upper back, side chest, and thigh was effective for body cooling after about 20 minutes of exercise and 30 minutes of rest with a fire coat worn. However, there are serious concerns that the feeling of cooling of the coolant would not last. Furthermore, the effect of long-term use had not yet been clarified.

Therefore, this study aimed to clarify the effective method of body cooling in long-term exercise with a hazmat suit on, confirm the effectiveness of a cooling vest, and verify the effect of changing coolants and “coolant-applied” parts in order to contribute to the reduction of the physical burden on firefighters during firefighting activities in summer and achieve preventive measures against heatstroke.

The result of the study suggests that the coolant with a melting point of 0° C is effective regardless of the “coolant-applied” parts for the movement of about 45 minutes and that there is a difference between the surface temperature of a coolant and the coldness felt by the examinees.

*Operational Safety Section **Machida Fire Station