

防護服着用時の暑熱負担軽減対策 —手足プレクーリングと水循環ベストの併用効果—

時澤 健*1, 岡 龍雄*2

防護服着用作業では、熱放散が抑制されるため暑熱負担が増大する。作業を行っている最中には作業に支障が出ない範囲で対策を行う必要があるため、作業前に身体を冷やすプレクーリングが実用的であることを報告してきた。しかしその効果にも限度があるため、作業中のクーリングと組み合わせて行うことで効果の増大が期待された。本研究では、すでに効果を検証した作業中の水循環ベストの着用および作業前の手足の冷却を組み合わせることによって、暑熱負担の軽減が増大するか否かを検証した。室温 33℃・相対湿度 60%の環境において防護服着用歩行を1時間行くと深部体温(直腸温)は $0.8 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 上昇したのに対して、水循環ベスト着用では $0.6 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 、水循環ベストと手足プレクーリングの併用は $0.2 \pm 0.1^\circ\text{C}$ と、併用により抑制効果は増大した。局所発汗率や体重減少率も同様の抑制が見られ、脱水への効果も確認された。温熱感覚には併用効果は認められなかった。以上のことから、防護服を着用し作業を行う暑熱負担が増大するような状況では、作業前から身体冷却を行い、さらに引き続き作業中にも冷却処置を続けることで、加算的に負担軽減につながり熱中症予防に寄与する可能性が示唆された。

キーワード: 暑熱環境, 深部体温, クールベスト

1. はじめに

職場における熱中症の死傷病者数は近年増加しており、猛暑の年であった2012年には、死亡者47名、休業4日以上以上の休業者は616名に上った。また、東日本大震災以降、放射線量の高い現場において防護服を着用して作業を行う場面が多くなり、作業中の暑熱負担を軽減させる対策が必要となっている。

防護服の着用時のみならず、多くの作業場面において、作業中に身体冷却を行うことは、衣服と作業性の問題から制限が多い。作業前や休憩時間を利用して、衣服や作業の制限がない状態で身体冷却を行うことが実情に即した方法である。特に作業前の身体冷却については、有酸素性運動時の暑熱負担を和らげ、暑熱環境における運動パフォーマンスを向上させるとの報告があることから¹⁾、暑熱環境下の作業においても有効な手段と考えられる。

身体冷却方法を検討した先行研究の多くは、熱中症の救急処置や過酷なスポーツ活動を想定しており、制限のない形で様々な装置を使用し介入している。例えば、運動前に身体冷却を行う実験においては、10~20℃に冷やした水をバスタブに張り、肩から下を浸漬させる方法を用いている²⁾。労働現場において、大量の水を冷やした状態で用意することは非常に難しく、また限られたスペースで多くの作業者に適用することもこの方法では困

難である。加えて、冷水に身体を浸けることは震えを伴うほどの寒冷ストレスであり、鍛えられたスポーツ選手や高体温になった状況でなければ実施不可能と考えられる。

我々は、労働現場で実施可能な実用的かつ簡便な身体冷却方法について最近研究を行ってきた。一つは手足を水に浸漬させる方法である。手足の浸漬は、数リットルの水(18℃または28℃)をバケツに張り実施する。30分間浸漬し冷却した後、防護服着用歩行を1時間暑熱下で行ったところ、水温に関わらず深部体温の上昇は $0.3 \sim 0.4^\circ\text{C}$ 抑制された³⁾。もう一つはベストタイプの水循環スーツである。水が流れるチューブが縫い付けられた水循環スーツは、冷水を供給するポンプと冷却器が必要となり、暑熱負担の行動が制限されたものが多かった⁴⁾。またチューブがあることで動き難いという問題もあった。しかし、ポンプと冷却器の軽量化でバックパックに収まり、防護服の中に着用することが可能となる製品が発売された。さらに水循環スーツを全身タイプではなくベストタイプとなり、動きの改善も期待された。その製品の暑熱負担軽減効果を検証したところ、深部体温の上昇を約 0.2°C 抑制した⁵⁾。それぞれの身体冷却をより改善する方法も考えられるが、両者は異なるタイミングで行われるため、併用することが可能である。したがって本研究では、手足のプレクーリングと水循環ベストの併用が防護服着用時の暑熱負担を軽減するか否かを検討した。

*1 労働安全衛生総合研究所 人間工学研究グループ

*2 労働安全衛生総合研究所 研究推進・国際センター

連絡先: 〒214-8585 神奈川県川崎市多摩区長尾 6-21-1

労働安全衛生総合研究所人間工学研究グループ 時澤健*1

E-mail: tokizawa@h.jniosh.johas.go.jp

2. 方法

1)対象

健康成人男性 7 名 (年齢: 36.1 ± 12 歳, 身長: 172.0 ± 7.0 cm, 体重: 65.3 ± 7.9 kg) を対象とした。

2) 実験プロトコル

被験者は 1 週間の間隔をあけて 3 日間実験に参加した。それぞれの日に下記のいずれかの試行を実施した。
①冷却なし試行 (CON), ②歩行中に水循環ベストを着用する試行 (VEST), ③プレクーリングとして手足の冷却および水循環ベストの着用を行い, さらに歩行中にも水循環ベストを着用する試行 (PC+VEST) であり, 実施の順序はランダムとした。実験は午前か午後に行うものとし, 同一被験者の実験はすべて同じ時間帯に実施した。

水循環ベストは, ベストに縫い込まれたチューブに冷水が流れ体幹部を冷やす方法であり, 冷水の供給は循環用のポンプと冷却用の保冷剤をリュックに収納することによって行われる。

被験者は実験室に入室後, 室温 25°C, 相対湿度 40% の環境で安静を 30 分間維持した。その後, センサー等の取り付けおよび下着用の長袖長ズボンへの着替えを実施し, CON 試行および VEST 試行ではそのまま 30 分間安静, PC+VEST 試行では, 水循環ベストを着用し, 両手足にミトン型およびスリッパ型の保冷剤を着用するプレクーリングを 30 分間実施した。

その後, すべての試行において, 被験者は防護服, 全面マスク, ヘルメット, 安全靴, 綿手袋の上にゴム手袋を二重にして装着した。その際に, VEST 試行では水循環ベストの着用を開始し, PC+VEST 試行では, プレクーリングで着用した水循環ベストをそのまま着用し続けた。以上の着替えを 10 分間で済ませ, 5 分間座位安静を保った後に, 室温 33°C, 相対湿度 60% の暑熱環境へ移動した。暑熱環境で 5 分間座位安静を保った後, トレッドミルでの歩行を 3 km/h のスピードで 30 分間行い, 10 分座位安静をはさみ, 再び 30 分間同スピードで歩行した。

3) 測定項目

深部体温の指標として, 直腸温をサーミスタプローブを用いて測定した。また皮膚温として, 前額, 腹, 背, 前腕, 手, 大腿, 下腿, および足のそれぞれの部位にサーミスタプローブを用いて測定し, 表面積による補正值を用いた全身平均皮膚温を算出した。局所発汗の指標として胸部の発汗率を, 換気式カプセルを用いて測定した。また全身の発汗指標として歩行前後の体重減少率を算出した。さらに心拍数および血圧の測定も行った。

また, 心理的な暑熱負荷の指標として, 温度感覚, 温熱的不快感, 身体的・精神的疲労感, 口渇感, および衣服内蒸れ感を, Visual Analog Scale (10 cm の線に感覚の程度をチェック) にて評価した。

統計解析として, 試行および時間の二要因の分散分析を行い, 同一時間の試行間の検定には Bonferroni の多重比較を行った。

インフォームドコンセントは実験開始前に口頭および書面で実施した上で同意を得た。本研究は独立行政法人

労働安全衛生総合研究所研究倫理委員会 (当時) の承認を得ている。

3. 結果

図 1 に直腸温の変化を示した。CON 試行と比較し VEST 試行では歩行開始後から終了まで有意に低値を示した。CON 試行の上昇値を 100% とした場合の減少率は 24% であった。PC+VEST 試行においては, プレクーリング中から歩行終了まで CON 試行と比較し有意に低値を示し, 74% の減少率であった。

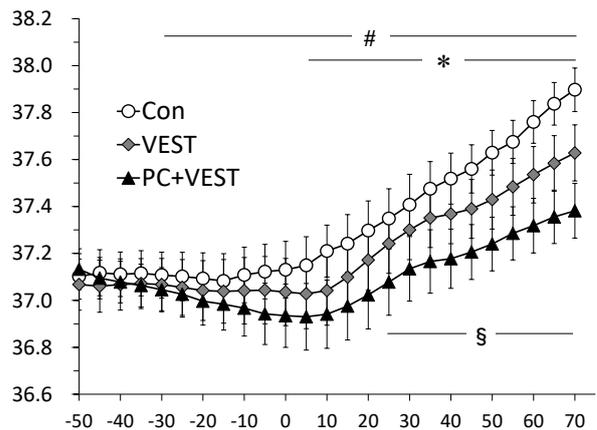


図 1. 直腸温 (°C) の変化. 横軸は時間 (分) を示し, PC+VEST 試行では -50 ~ -20 分の間にプレクーリングを行い, すべての試行で 0 分から歩行開始, 30 ~ 40 分は休憩, 40 ~ 70 分に歩行を行う。

*: p<0.05, Con vs. VEST

#: p<0.05, Con vs. PC+VEST

§: p<0.05, VEST vs. PC+VEST

全身平均皮膚温および背部皮膚温の変化を図 2 に示した。VEST 試行においては, CON 試行と比較し水循環ベストの着用後から全身および背中の皮膚温は有意に低値を示し, 歩行終了まで続いた。PC+VEST 試行においてはプレクーリング開始後から歩行終了まで, CON 試行と比較し有意に低値を示した。VEST 試行と PC+VEST 試行の間の差は, 全身平均皮膚温はプレクーリング中から歩行途中まで, 背部皮膚温はプレクーリング中のみ有意であった。

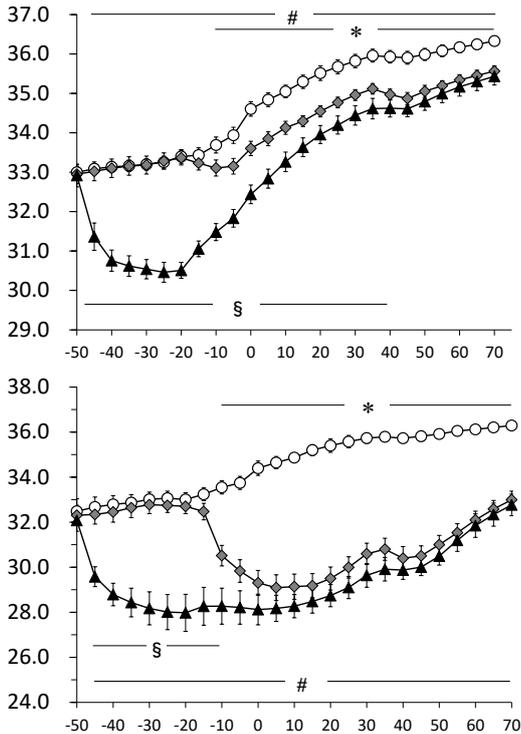


図2. 全身平均皮膚温(°C, 上)および背部皮膚温(°C, 下)の変化. 凡例, 横軸, および検定の表示は図1と同じとする.

図3に胸部発汗率の変化を示した. VEST 試行においては, 歩行後半に CON 試行と比較し有意に低値を示した. PC+VEST 試行においては歩行開始 10 分以降に CON 試行と比較し有意に低値を示した. 体重減少率は, CON 試行, VEST 試行, そして PC+VEST 試行の順に小さく ($-0.93 \pm 0.06\%$, $-0.72 \pm 0.05\%$, $-0.59 \pm 0.06\%$), すべての試行間に有意な差が認められた.

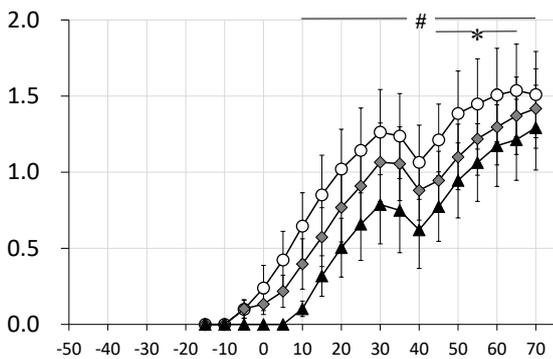


図3. 胸部発汗率(mg/cm²/min)の変化. 凡例, 横軸, および検定の表示は図1と同じとする.

心拍数の変化を図4に示した. CON 試行の上昇と比較し, VEST 試行は有意に低く, さらに PC+VEST 試行では低くなった. 血圧に有意な変化はすべての試行で認められなかった.

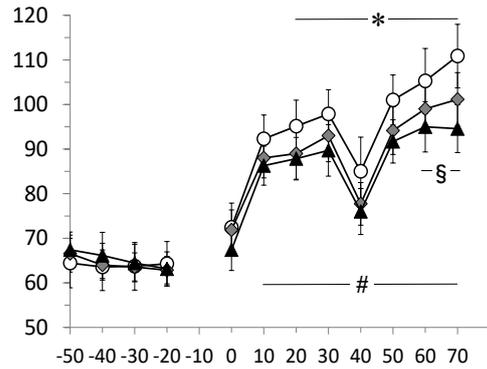


図4. 心拍数(拍/分)の変化. 凡例, 横軸, および検定の表示は図1と同じとする.

図5に温度感覚および温熱的不快感の変化を示した. PC+VEST 試行においては, ブレーキング中に「寒い感覚」が増した. 歩行中においてはすべての試行で「暑い感覚」および「暑くて不快な感覚」が増したものの, CON 試行と比較し VEST 試行および PC+VEST 試行では有意に低値を示した.

身体的および精神的疲労感の変化を図6に示した. すべての試行で増加したものの, PC+VEST 試行では CON 試行と比較し有意に低値を示した. 口渇感および衣服内の蒸れ感については, 試行間に有意な差は認められなかった.

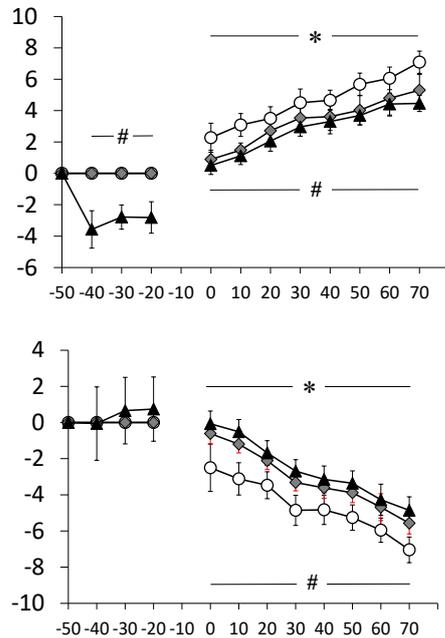


図5. 温度感覚(上)および温熱的不快感(下)の変化. 凡例, 横軸, および検定の表示は図1と同じとする.

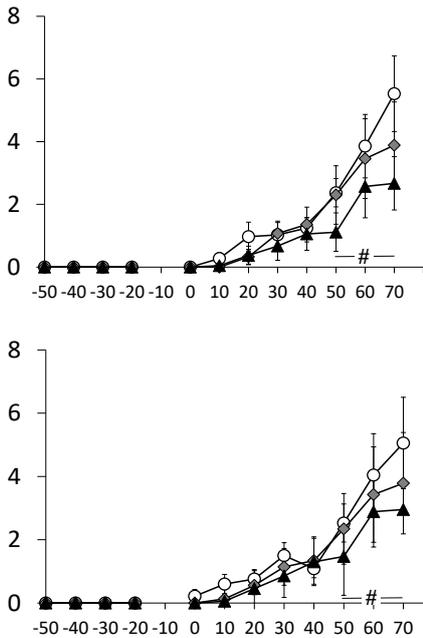


図6. 身体的疲労感(上)および精神的疲労感(下)の変化。凡例、横軸、および検定の表示は図1と同じとする。

4. 考察

熱中症対策として最も重要である深部体温の上昇を抑える効果として、プレクーリングに作業中の身体冷却である水循環ベストの着用を加えると、それぞれの効果が加算的になることが明らかとなった。本研究においては1時間の作業負荷であったが、実際の実験現場で行われる作業の最長時間は1回につき2時間である。対策を行わないCON試行では、1時間の歩行で深部体温は作業時の上限基準である38.0℃までほぼ到達していた。しかしPC+VEST試行では37.4℃であり、そのペースで上昇が続くと想定した場合、2時間経っても38.0℃に到達しないレベルであると推察される。

深部体温の他、脱水や心拍数の上昇にもプレクーリングと水循環ベスト着用の加算的効果が認められた。一方で心理学的な暑熱負担としては加算的にならなかったため、作業者の実感としては対策を重ねることの意味が分かりにくいかもしれない。しかし、熱中症への直接的な対策としては、生理学的な暑熱負担の方が重要であり、本研究の客観的データを用いて作業員へ説明を行い、プレクーリングと水循環ベスト着用の併用効果を理解してもらうことが必要であろう。

水循環ベストの着用により、リュックで背負うポンプと保冷剤の重さが懸念されたが、身体的および精神的疲労感は軽減される方向にあった。歩行という単純な動きであることが幸いした可能性もあるため、実際の作業現場での使用により、動作への支障がないかどうか確認する必要がある。

本論文の一部は、Industrial Healthに掲載された論文(文献5)の一部のデータを使用しており、掲載に関する承諾を得ている。

謝 辞

水循環ベストについては、(株)日立パワーソリューションズおよび(株)東京パワーテクノロジーの技術的なサポートを受けました。末筆ながらここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Ross M, Abbiss C, Laursen P, Martin D, Burke L (2013) Precooling methods and their effects on athletic performance: a systematic review and practical applications. Sports Med 43, 207-225.
- 2) González-Alonso J, Teller C, Andersen SL, Jensen FB, Hyldig T, Nielsen B (1999) Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. J Appl Physiol 86, 1032-1039.
- 3) 時澤健, 岡龍雄, 安田彰典, 田井鉄男, ソンスヨン, 澤田晋一 (2015) 暑熱負担を軽減する作業前の実用的かつ簡便な身体冷却方法. 労働安全衛生研究, 8, 1-4.
- 4) Yazdi MM, Sheikhzadeh M (2014) Personal cooling garments: a review. J Text Inst 105, 1231-50.
- 5) Tokizawa K, Son SY, Oka T, Yasuda, A Effectiveness of a field-type liquid cooling vest for reducing heat strain while wearing protective clothing. Ind Health, in press.