

相転移型蓄冷材料を用いた手足冷却

時澤 健*1, 岡 龍雄*2

手足を冷却する方法として、水以外で簡便に行える技術を検証した。一般的な保冷剤では、0°C以下の温度で凍らせるため、冷却刺激として強すぎるデメリットがあった。そこで12°Cの融解温度となる相転移型蓄冷材料(PCM)を用いて作業前に手足を冷却し、その後に防護服を着用し、暑熱環境下で1時間の歩行を行った。作業前の冷却がない場合には深部体温(直腸温)が0.9°C上昇したのに対して、PCMで作業前冷却を行うと0.5°Cの上昇を抑えられた。これは手足を浸水させる冷却方法と同程度の効果であった。したがって、水の代わりにPCMを用いた手足冷却でも暑熱負担軽減効果があることが示唆された。

キーワード: 暑熱環境, 深部体温, 冷却剤

1. はじめに

防護服着用作業における暑熱負担軽減策については、これまでの基盤的研究などの成果において、「作業前身体冷却(プレクーリング)」を中心としたものが存在する¹⁾。これらの研究の結果、防護服に着替える前の段階において、手足を浸水冷却する方法によって、その後の暑熱下作業時の深部体温の上昇や脱水の進行を半減させる効果があることを確認している。しかし水の取り扱いに煩雑な部分があるため、いわゆる保冷剤を用いることで実用性を高める可能性があるものの、一般的な保冷剤では温度が低すぎること及び低温管理に問題があった。そこで本研究では、融解温度を12°Cとした相転移型蓄冷材料(Phase-Change Materials, PCM)を用いて適度な定温冷却を実現させ、プレクーリングとして手足に適応した場合に、水と同様の効果が得られるか否かを検証した。

2. 方法

1)対象

健康成人男性8名(年齢:36.0 ± 9.6歳,身長:171.7 ± 4.0cm,体重:64.3 ± 8.4kg)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計4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ランダムに実施した。①冷却なし試行(CON),②プレクーリングとして手足(手首・足首より先)を20°Cの水に浸ける試行(WAT),③プレクーリングとして冷蔵庫で冷やした融解温度12°Cの蓄冷材料を手足に巻く試行(PCM),④プレクーリングとして冷凍庫で冷やした保

冷剤で手足を覆う試行(FRO)。プレクーリング3試行の冷却部皮膚温が同等になることは予備実験において確認した。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。

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し、プレクーリングを行う3試行では30分間それぞれの冷却を行い、CON試行は同時間座位安静を保った。その後、すべての試行において、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。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37°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3km/hのスピードで30分間行い、10分間座位安静をはさみ、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,前腕,手背,大腿,下腿,および足背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。プレクーリング中のみ、手背部および足背部の皮膚血流量をレーザードップラー法で測定し、平均血圧で除することにより皮膚血管コンダクタンスを算出した。

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にて評価した。

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の承認を得ている。

3. 結果

*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

図1に直腸温の変化を示した。CON 試行と比較しプレクーリングを行った3試行すべてにおいて、歩行開始10分前から歩行終了まで直腸温は有意に低値を示した。WATとPCM試行ではFRO試行と比較し同時間有意に低値を示した。

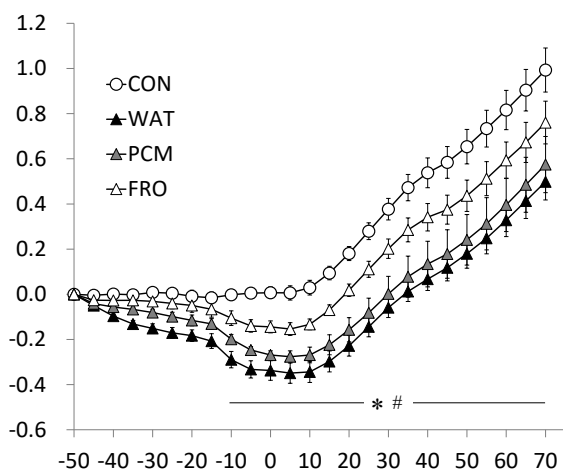


図1. 直腸温(°C)の変化。横軸は時間(分)を示し、WAT, PCM, および FRO 試行では-50~-20 分の間にプレクーリングを行い、すべての試行で0分から歩行開始、30~40分は休憩、40~70分に歩行を行った。

*: $p < 0.05$, CON vs. WAT, PCM, FRO

#: $p < 0.05$, FRO vs. WAT, PCM

全身平均皮膚温、手背部皮膚温、および足背部皮膚温の変化を図2に示した。全身平均皮膚温はプレクーリング中において、CON試行と比較しプレクーリングを行った3試行すべて有意に低値を示した。歩行中においてはWATとPCM試行はCONおよびFRO試行と比較し有意に低値を示した。

手背部皮膚温は、プレクーリング中から歩行終了までCON試行と比較しプレクーリングを行った3試行すべて有意に低値を示した。足背部皮膚温は、プレクーリング中から歩行開始後15分目まではCON試行と比較しプレクーリングを行った3試行すべて有意に低値を示した。WATとPCM試行はCONおよびFRO試行と比較し、プレクーリング中から歩行開始後30分目まで有意に低値を示した。

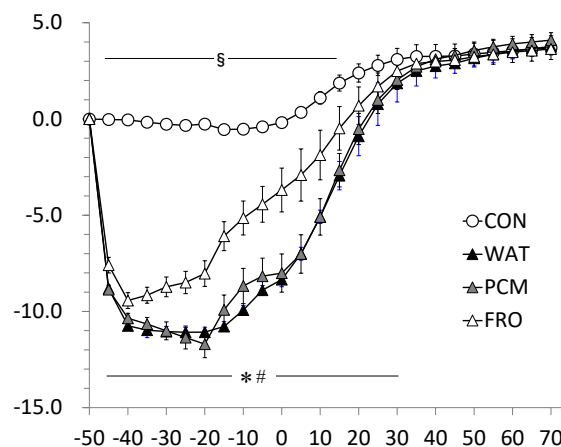
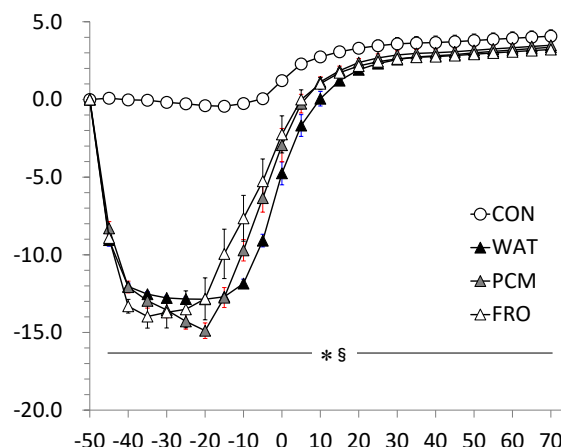
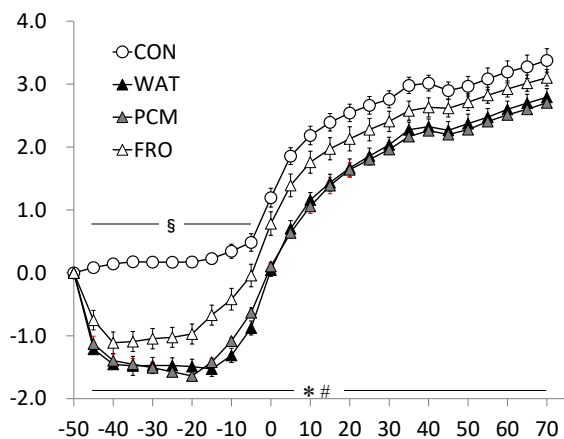


図2. 全身平均皮膚温(°C, 上), 手背部皮膚温(°C, 中), および足背部皮膚温(°C, 下)の変化。横軸の表示は図1と同じとする。

*: $p < 0.05$, CON vs. WAT, PCM

#: $p < 0.05$, FRO vs. WAT, PCM

§: $p < 0.05$, CON vs. FRO

胸部発汗率において、WATとPCM試行は、歩行後半にCON試行と比較し有意に低値を示した。体重変化率は、WATとPCM試行は、CON試行と比較し有意に高値を示した(CON, $-1.14 \pm 0.13\%$; WAT, $-0.94 \pm 0.18\%$; PCM, $-0.87 \pm 0.16\%$; FRO, $-1.08 \pm 0.15\%$)。

全身の温度感覚および温熱的不快感について、プレクーリング中にFRO試行においては、温度感覚および温熱的不快感はCON試行と比較して有意に低値を示した。歩行中においては、後半にWATとPCM試行はCON試行と比較し温熱感覚は有意に低値を示し、温熱的不快感は有意に高値を示した。

冷却部位である手および足の温度感覚について、プレクーリング中において冷却を行った3試行すべてにおいてCON試行と比較して有意に低値を示した。冷却20分目および30分目においては、WATとPCM試行と比較してFRO試行の方で有意に低値を示した。歩行中、試行間に有意な差は認められなかった。

身体的および精神的疲労感について、歩行中の後半にWATとPCM試行はCON試行と比較し有意に低値を示した。

プレクーリング中の冷却部位である手背部および足背部の皮膚血管コンダクタンスは、プレクーリングを行った3試行

すべてで有意に低下したが、WATとPCM試行はFRO試行と比較し有意に高値を示した。

プレクーリング中の冷材温度の変化は、WAT試行において $19.8 \pm 0.1^{\circ}\text{C} \sim 20.7 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ (手) および $19.4 \pm 0.1^{\circ}\text{C} \sim 21.4 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ (足)、PCM試行において、 $10.2 \pm 0.1^{\circ}\text{C} \sim 14.2 \pm 0.7^{\circ}\text{C}$ (手) および $11.0 \pm 0.3^{\circ}\text{C} \sim 14.2 \pm 0.8^{\circ}\text{C}$ (足)、FRO試行において、 $-12.3 \pm 0.8^{\circ}\text{C} \sim 14.0 \pm 0.8^{\circ}\text{C}$ (手) および $-4.5 \pm 1.1^{\circ}\text{C} \sim 16.5 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ (足) であった。

4. 考察

作業前の手足冷却による暑熱負担軽減対策において、これまでの水を用いた冷却方法に代わる方法を検討した。いわゆる保冷剤は、冷凍庫で保管して冷やすため氷点下の温度となり冷却刺激が強すぎる。実際に本研究で行ったFRO試行はその方法であり、手足に強い冷感をもたらし、手足の皮膚血管に強い収縮をもたらした。その結果として、冷えた血液を多く生み出せず、深部体温の上昇抑制が小さかったと考えられる。

それに対して、融点 12°C のPCMは、水と同程度の冷感や皮膚血管反応をもたらし、暑熱負担軽減効果もほとんど同じであった。PCMは冷蔵庫やクーラーボックスで冷却させ、繰り返し使用することができるため、水よりも取扱いが容易な場合が多いと考えられる。

PCMによる冷却の実用性を高めるために、PCMの重量を減らし、手掌、手背、足底、足背部位それぞれへのピンポイント冷却、また手足以外で熱放散特性が高い部位である前腕や下腿への適用を検討する必要がある。

謝 辞

PCMは、(株)シャープ材料・エネルギー技術研究所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) 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.