

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

時 澤 健^{*1}, 岡 龍 雄^{*2}, 安 田 彰 典^{*3}
田 井 鉄 男^{*4}, ソン スヨン^{*1}, 澤 田 晋 一^{*1}

暑熱環境における作業は体温上昇をまねき、熱中症の発症を誘発する。作業中には身体冷却の方法が制限されることや、作業による筋活動の熱産生を抑えることは難しいことから、作業前や休憩中に身体冷却を行い、体温を低下させておくことが重要となる。我々は、労働現場で実施することが可能な実用的で簡便な方法による身体冷却について最近研究を行ってきた。従来、実験的な身体冷却方法は冷水への全身浸漬であり、大量の冷やした水とバスタブが必要であった。これは少数人に施す前提で大きな装置を必要とし、身体への寒冷ストレスが大きいというデメリットがあった。したがって、労働現場において多くの作業者が限られたスペースで実施でき、さらに寒冷ストレスがマイルドな身体冷却方法を考案する必要があった。本文では、扇風機とスプレー、少量の水による手足の浸漬とクールベストの着用の組み合わせによる身体冷却方法が、深部体温をどの程度減少させ、作業中の暑熱負担を軽減させるかについて我々の研究成果を中心に述べる。

キーワード: 暑熱環境, 深部体温, 防護服

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日以上の上り休業者は616名に上った¹⁾。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。したがって、作業前や作業間の時間を利用して、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²⁾、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^{2,3)}。例えば、運動前に身体冷却を行う実験においては、10~20°C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³⁾。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、扇風機とスプレーを用いた方法であり、もう一つは、クールベストの着用および手足を水に浸漬させる方法である。どちらの方法も、ある程度空調が整った休憩室を想定して実施した。また作業中の暑熱負担の評価については、防護服を着用し酷暑環境で歩行を行った際の生理学的および心理学的指標を測定した。

2 扇風機とスプレーによる身体冷却

扇風機とスプレーによる身体冷却効果については、Mitchell et al.⁴⁾が運動前に実施した報告がある。22°Cの環境下において、スプレーで全身を濡らしながら4m/sの風を20分間当てた後、最大有酸素能力下での走運動を疲労困憊まで行っている(約6分間)。その結果、運動終了時の深部体温の上昇は、身体冷却を行わなかった時と比べて約1°C抑えられている。我々はこの方法で、1時間の歩行時の暑熱負担の軽減効果を検証した。また効果的かつ効率的に実施するための扇風機の風速とばく露時間についても検証した⁵⁾。

1) 身体冷却方法

服装はショーツのみとし、室温28°Cおよび相対湿度40%の環境において実施した。図1に示すように、上下に2つの扇風機(羽直径45cm)を配置し、座位姿勢の頭から足まで身体の前面に風が当たるようにする。扇風機とヒトとの距離は50cmとした。風速4m/sで30分間送風を行う間、スプレーを用いて全身を濡らした。室温に置いた水を用い、見た目に水滴がなくなる度に(2~3分ごとに)噴霧した。コントロール試行は同じ条件で冷却だけを行わなかった。

2) 身体冷却後の暑熱負担の軽減効果

上記身体冷却を行った後、身体の水を拭き取り防護服を着用する。室温37°Cおよび相対湿度40%の暑熱環境

原稿受付 2014年11月13日 (Received date: November 13, 2014)

原稿受理 2015年4月2日 (Accepted date: April 2, 2015)

J-STAGE Advance published date: June 26, 2015

*1 (独) 労働安全衛生総合研究所 人間工学・リスク管理研究グループ

*2 (独) 労働安全衛生総合研究所 有害性評価研究グループ

*3 (独) 労働安全衛生総合研究所 健康障害予防研究グループ

*4 (独) 労働安全衛生総合研究所 作業条件適応研究グループ

連絡先: 〒214-8585 神奈川県川崎市多摩区長尾6-21-1

(独) 労働安全衛生総合研究所 人間工学・リスク管理研究グループ 時澤 健

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

doi: 10.2486/josh.JOSH-2015-0002-KE

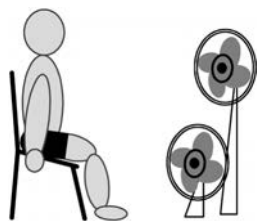


図1 扇風機の配置

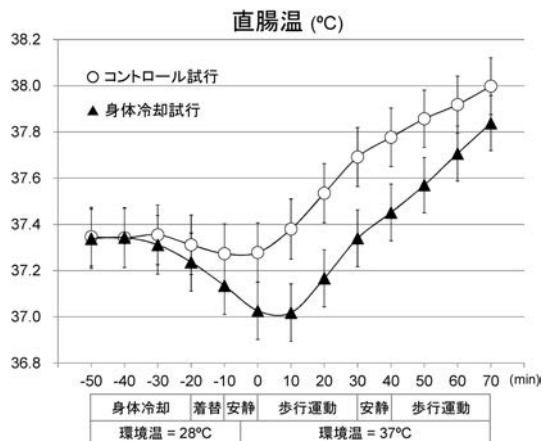


図2 防護服着用による暑熱下歩行時の深部体温の変化。コントロール試行では身体冷却を行わず安静にした。

へ移動し、2.5km/時のスピードでの歩行運動を60分間、間に10分の休憩を挟んで実施した(図2下部にタイムスケジュールを示す)。その際の深部体温(直腸温, サーミスタセンサー, 701J, 日機装サーモ)の応答を図2に示す。

身体冷却を行っている間に深部体温の低下は見られなかったが、身体冷却終了10分後から有意に減少し始め、歩行開始直後に最低値を示した(約 -0.4°C)。歩行に伴い深部体温は上昇したが、コントロール試行と比較して、歩行終了まで有意に低値を示した(終了時の差は 0.2°C)。

深部体温への効果以外に、歩行前後の体重減少率の有意な抑制も確認された(コントロール試行: $1.56 \pm 0.13\%$, 身体冷却試行: $1.22 \pm 0.07\%$)。これは発汗量が抑制されたことを示唆するが、発汗は深部体温の上昇に応じた反応を示すことから⁶⁾、身体冷却試行の深部体温上昇の抑制が関与しているものと考えられる。また、心拍数(心拍計, Polar RS800CX)は歩行の前半に、身体冷却試行の方で有意に低値を示した。この要因にも深部体温の上昇が抑制されたことが関与していると考えられ、熱放散のための皮膚血流がコントロール試行と比べて少なく済むことで、中心循環の負担が低くなったものと考えられる。一方で、4段階のDigital Scaleで評価した温度感覚、温熱的不快感、さらに疲労感といった心理学的な暑熱負担については、身体冷却の効果は認められなかった。

3) 効果的な風速の検討

扇風機とスプレーを用いた身体冷却により上記のような暑熱負担の軽減効果が認められたが、深部体温が約

1°C 減少する全身浸漬による身体冷却の効果³⁾と比べると、その効果は半分くらいであり十分とは言えない。したがって、より効果的かつ効率的な風速とばく露時間の検討を行った。上記の条件は風速 4m/s であったが(家庭用扇風機の「強」レベルに相当)、工場扇と呼ばれる扇風機の中には 8m/s の風速を出せるものもあることから、より強い風を当てたときの効果を検証した。一方で、多数の作業者が休憩室に集まるような場合には、1人1台扇風機を使用することは難しく、わずかな弱い風を受けることしかできないことも考えられる。そこで、家庭用扇風機の「弱」レベルに相当する 2m/s の風速でも検討を行った。

環境および服装は上記と同様に、室温 28°C および相対湿度 40% で、ショーツのみとした。また扇風機とスプレーによる身体冷却の方法も同様とし、風速を 2m/s , 4m/s , 8m/s のいずれかに設定し30分間実施した。終了後はそのまま座位で1時間安静にした。

深部体温(直腸温)は、身体冷却終了1時間後に最低値を示し、身体冷却前の値からの変化量は、 2m/s の試行で $0.4 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 、 4m/s の試行で $0.5 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 、 8m/s の試行で $0.5 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ と、試行間に有意な差は認められなかった。したがって、扇風機とスプレーによる身体冷却において、風速の影響はほとんどなく、風速 2m/s の弱い風であっても全身に風が当たることで対流と蒸散による熱放散を促し、深部体温の低下を引き起こすことが示唆された。

身体冷却を作業前に行う際には、冷却負荷が過度にならないことに注意することが必要である。作業中や作業後には、深部体温が上昇しているため、冷却を快適に感じるが、作業前は正常体温の範囲にあるため、冷却を不快に感じてしまう。Visual Analog Scaleによる寒さ感覚および温熱的不快感を評価したところ、 $0 \sim 10$ のスコアにおいて(10が最大に寒い・寒くて不快)、いずれの風速の身体冷却中においても $2 \sim 3$ の範囲内にあった。風速による違いは認められなかった。また血圧の変化も観察されなかった。したがって、身体冷却の負荷の程度としてはそれほど強くないものと考えられる。

4) 効果的なばく露時間の検討

上記までの扇風機とスプレーによる身体冷却において、ばく露時間は30分としていたが、作業前や休憩時間を考慮すると、ばく露時間が短い場合と長い場合の効果をそれぞれ検証し、必要最低限のばく露時間や最大限の効果を引き出すばく露時間を明らかにする必要があった。そこで、風速 4m/s において上記の方法で、15分、30分、45分のばく露時間を設定し効果を検証した。

深部体温(直腸温)はばく露終了1時間後にいずれのばく露時間でも最低値を示し、その変化量は15分で $0.3 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 、30分で $0.5 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 、45分で $0.6 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ と時間に依存して低下した(図3)。したがって、最低限のばく露時間を決めることはできないが、作業前や休憩時間のできるだけ長い時間実施することが推奨される。深部体温の低下に違いがみられたものの、Visual Analog

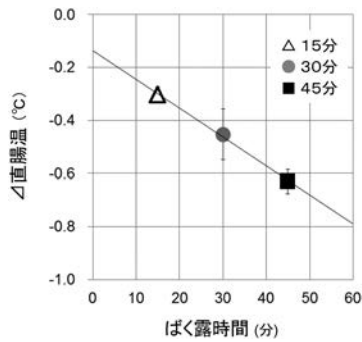


図3 扇風機とスプレーによる身体冷却のばく露時間と深部体温の変化量の関係

Scaleによる寒さ感覚および温熱的不快感のスコアにばく露時間の影響はみられず、いずれも2~3の範囲内であった。血圧の変化も観察されなかった。

3 手足の浸水による身体冷却

手と足は体積当たりの表面積が大きく、また動脈吻合と呼ばれる特殊な血管構造を持っていることから、熱放散に適した部位である⁷⁾。近年、その特性に注目した身体冷却方法で、手に陰圧をかけながら血流を促し、その上で手を冷やす製品が米国で使用されるようになった。主にスポーツ活動中に用いられ、その効果については、歩行中に用いることで深部体温の上昇が抑えられたり⁸⁾、筋力トレーニングの合間に用いることで、総仕事量が増えることが報告されている⁹⁾。製品を用いることや作業中に実施することは現実的に困難であることから、作業前や休憩中に手足を水に浸ける方法で、暑熱負担を和らげる効果があるか否かを検証した。

1) 身体冷却方法

服装はショーツのみとし、室温28°Cおよび相対湿度40%の環境において実施した。図4に示すように、座位姿勢において、両手と両足を8Lの水に浸けた。手は片手ずつ、足は両足を1つのバケツに浸けた。水の温度は28°Cと18°Cに設定し30分間実施した。手足を浸けることで水の温度上昇がみられるが、30分で1°C程度であった。水の温度は低ければ低いほど熱伝導は大きくなるものの、痛覚を生じないレベルとして18°Cに設定し、また水を冷やす手立てがない場合として、夏場の平均的な水道水の温度である28°Cも合わせて検証した。またどちらの場合も、体幹部分も合わせて冷やすためクールベストを着用した。

2) 身体冷却後の暑熱負担の軽減効果

上記身体冷却を行った後、手足の水を拭き取りクールベストを脱いだ上で、防護服を着用した。その後は上記2-2)と同様のプロトコルで暑熱下歩行を行った。その際の深部体温(直腸温)の変化を図5に示す。

身体冷却を行った28°Cと18°Cの浸水の両方で、身体冷却を行わなかったコントロール試行と比較して、深部体温は有意に低値を示した。歩行開始から終了まで約0.4°Cの差が認められた。28°C浸水の方が18°C浸水と比べてやや高いが試行間に有意な差はなかった。



図4 手足の浸水とクールベストによる身体冷却

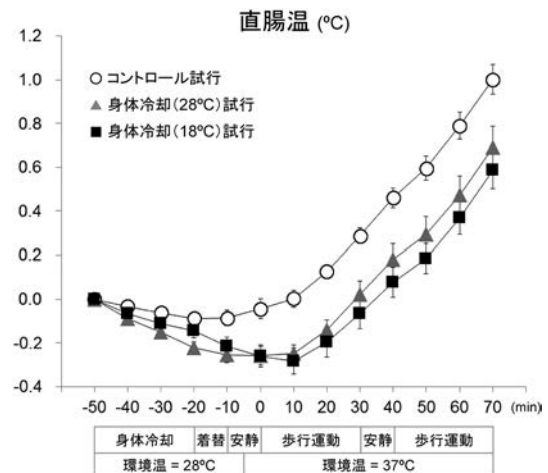


図5 防護服着用による暑熱下歩行時の深部体温の変化。コントロール試行では身体冷却を行わず安静にした。

深部体温への効果以外に、歩行前後の体重減少率の有意な抑制も確認されたが、18°C浸水の方が大きく抑制された(コントロール試行: $1.25 \pm 0.13\%$, 28°C浸水試行: $1.12 \pm 0.10\%$, 18°C浸水試行: $1.01 \pm 0.11\%$)。また心拍数の上昇が18°C浸水試行のみ有意に抑制された。さらに心理学的な暑熱負担についても軽減され、28°C浸水試行では、Visual Analog Scaleで評価した温熱的不快感、身体的および精神的疲労感において、コントロール試行と比較して、有意に低値を示した。18°C浸水試行ではこれらに加えて、温度感覚、衣服内の蒸れ感についても有意に低値を示した。

冷却負荷に関しては、身体冷却中にVisual Analog Scaleで評価した寒さ感覚および温熱的不快感のスコアに有意な変化は認められなかった。血圧の変化も観察されなかった。

以上のことから、手足の浸水およびクールベストによる身体冷却を作業前に行うことにより、作業中の暑熱負担の軽減がもたらされることが明らかとなった¹⁰⁾。28°C浸水の身体冷却でもある程度の軽減効果が認められたものの、可能な限り氷や保冷剤を用いて水温を下げた状態で実施した方が暑熱負担の軽減はより大きくなる。また、手足の浸水とクールベストの着用を併用したが、冷却中の体幹部の皮膚温低下率は小さかったため、暑熱負担の軽減効果の大半は手足の浸水によるものと考えられる。したがって、クールベストがない場合でも、水とバケツが用意できれば効果は十分に期待される。足の浸水では靴や靴下を脱いで行うことが煩雑ではあるが、高体温時の身体冷却を検証した先行研究では、手や

足単独の冷却より手と足両方の冷却の方が、深部体温の低下は大きいことが報告されており¹¹⁾、可能な限り手と足の両方で実施することが望ましい。

4 おわりに

作業前の簡便な身体冷却により、作業中の暑熱負担が軽減されることを示した。作業は酷暑環境における防護服着用での軽度歩行であったが、通常の作業着や中程度の作業強度でも同様の効果が予想される。扇風機とスプレー、手足の浸水とクールベストのそれぞれの組み合わせによる身体冷却を用いたが、後者の方法の方が持続的な深部体温の抑制と心理学的な暑熱負担の軽減をもたらした。作業現場の状況によって、扇風機や水の使用は制限されることもあるため、身体冷却は可能な方法で実施し、作業前や休憩時間内の可能な限り長い時間行うことが推奨される。

謝 辞

本研究の一部はJSPS科研費25293155の助成を受けて実行された。本研究を進めるにあたり、東京電力・技術開発センターの井田浩文氏、中山和美氏、和田潤氏よりご協力を賜った。

文 献

- 1) 厚生労働省. 平成25年の職場での熱中症予防対策の重点的な実施について (H25.5.21付け基安発0521第1号). <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r985200000323h1-att/2r985200000323lw.pdf>
- 2) Ross M, Abbiss C, Laursen P, Martin D, Burke L. Precooling methods and their effects on athletic performance: A systematic review and practical applications. *Sports Med.* 2013; 43: 207-225.
- 3) González-Alonso J, Teller C, Andersen SL, Jensen FB, Hyldig T, Nielsen B. Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *J. Appl. Physiol.* 1999; 86: 1032-1039.
- 4) Mitchell JB, McFarlin BK, Dugas JP. The effect of pre-exercise cooling on high intensity running performance in the heat. *Int. J. Sports Med.* 2003; 24: 118-124.
- 5) Tokizawa K, Sawada S, Oka T, Yasuda A, Tai T, Ida H, et al. Fan-precooling effect on heat strain while wearing protective clothing. *Int. J. Biometeorol.* 2014; 58: 1919-1925.
- 6) Shibasaki M, Wilson TE, Crandall CG. Neural control and mechanisms of eccrine sweating during heat stress and exercise. *J. Appl. Physiol.* 2006; 100: 1692-1701.
- 7) Taylor NA, Machado-Moreira CA, van den Heuvel AM, Caldwell JN. Hands and feet: physiological insulators, radiators and evaporators. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2014; 114: 2037-2060.
- 8) Grahn DA, Cao VH, Heller HC. Heat extraction through the palm of one hand improves aerobic exercise endurance in a hot environment. *J. Appl. Physiol.* 2005; 99: 972-978.
- 9) Kwon YS, Robergs RA, Kravitz LR, Gurney BA, Mermier CM, Schneider SM. Palm cooling delays fatigue during high-intensity bench press exercise. *Med. Sci. Sports Exer.* 2010; 42: 1557-1565.
- 10) Tokizawa K, Oka T, Yasuda A, Tai T, Son S, Wada J, et al. Practical precooling technique in occupational settings. *Proceedings of 20th International Congress of Biometeorology, 5C.2.*
- 11) DeGroot D, Gallimore RP, Thompson SM, & Kenefick RW. Extremity cooling for heat stress mitigation in military and occupational settings. *J. Therm. Biol.* 2013; 38: 305-310.