

## 防護服着用作業における暑熱負担等の軽減策に関する研究

Improvements of heat and other strains in workers wearing protective clothing.

時澤 健\*1, 齊藤宏之\*1, 岡 龍雄\*2, 井田浩文\*3, 横田真一\*4, 引田重信\*5, 高津 衛\*6,  
内海夕香\*7, 香村勝一\*7, 篠崎大祐\*7, 城戸克也\*7, 土基博史\*8, 志牟田 亨\*8

人間工学研究グループ\*1 研究推進・国際センター\*2 (株)東京電力\*3 (株)東京パワーテクノロジー\*4 (株)日立パワーソリューションズ\*5 帝国繊維(株)\*6 シャープ(株)\*7 (株)村田製作所\*8

■ TOKIZAWA Ken, SAITO Hiroyuki, OKA Tatsuo, IDA Hirofumi, YOKOTA Shinichi, HIKITA Shigenobu,  
TAKATSU Mamoru, UTSUMI Yuka, KAMURA Masakazu, SHINOZAKI Daisuke, KIDO Katsuya, TSUCHIMOTO  
Hirofumi and SHIMUTA Toru

職場における熱中症死傷者数は近年減る傾向になく、新たな対策が求められている。有害物質に対応した防護服の着用は、着用することにより熱放散を大きく抑制することから暑熱負担が増し、作業による熱中症発症リスクを高める恐れがあるが、近年、原発復旧作業や感染症対応、また廃棄物取扱いや塗装など多くの作業に用いられている。本研究では、暑熱負担を軽減するための実用的な身体冷却方法の開発、および暑熱負担をリアルタイムにモニタリングするためのウェアラブル深部体温計の開発に取り組んだ。まず、防護服内に装備可能な水循環ベストの評価、および手足のブレーキングとの併用効果を検証し、加算的な暑熱負担の軽減効果となることを明らかにした。さらに実用的な手足の冷却方法として、12°Cの融解温度となる相転移型蓄冷材料の効果を検証し、水による冷却と同等の効果を確認した。最後に、暑熱負担モニタリングに必須となるウェアラブル深部体温計を、胸部におけるパッチ型センサとして開発し、双熱流法を改良した新たな深部体温推定アルゴリズムによって推定した。作業着または防護服着用時の暑熱下作業における深部体温を食道温と直腸温でモニターし、推定値との誤差を算出した結果、 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ の標準偏差内に収まった。

### 1 研究の背景・目的

有害物質に対応した防護服は、近年では原発復旧作業や感染症対応、また廃棄物取扱いや塗装など多くの作業で用いられている。それらの作業には、暑熱負担増加に伴う夏季の熱中症発症の危険性、さらに作業能及び動作性の低下等の身体的負担を生じる。しかしながら、その実態は十分に把握されておらず、具体的な対策は取られていない。特に暑熱負担については、近年の地球温暖化の影響もあり、職場の熱中症死傷者は減る傾向にない。現在行われている対策では、暑さ指数(WBGT)による環境面での取組みに限られており、新たな対策が求められている。

本研究では、実用的な身体冷却による暑熱負担の軽減策およびリアルタイムに暑熱負担をモニターするためのウェアラブル深部体温計の開発に取り組んだ。具体的には1) 手足のブレーキングと水循環ベストの併用効果では、作業前および作業中と引き続いて身体冷却を行うことで、それぞれの相乗効果を明らかにすること、2) 実用的な冷却方法として、融解温度を12°Cとした相転移型蓄冷材料(Phase-Change Materials, PCM)を用いた手足冷却による暑熱負担軽減効果を検証すること、3) 胸部パッチ型センサによる深部体温の推定の妥当性を侵襲測定による深部体温との比較から明らかにすること、以上を目的とした。

### 2 研究の概要

#### 1) 手足のブレーキングと水循環ベストの併用効果

予備実験の結果から、ベスト型の送風装置の効果は小さいことが予測されたため、水循環型のクールベストの効果検証に絞って実験を実施した。防護服を着用しての暑熱下歩行の暑熱負担を下記の3条件で比較した: 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ブレーキングとして手足の冷却、顔への送風、および水循環ベストの着用を行い、さらに歩

\*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  
\*3 (株)東京電力 経営技術戦略研究所  
\*4 (株)東京パワーテクノロジー  
\*5 (株)日立パワーソリューションズ  
\*6 帝国繊維(株)  
\*7 シャープ(株)材料・エネルギー技術研究所  
\*8 (株)村田製作所  
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

行中にも水循環ベストを着用する試行 (PC+VEST) . 深部体温 (直腸温) の上昇は, 歩行終了時にCONが  $0.8 \pm 0.1$  °Cであったのに対し, VESTは  $0.5 \pm 0.1$  °Cと有意に減少し (33%減), PC+VESTは  $0.2 \pm 0.1$  °Cとさらに減少した (73%減) . 全身平均皮膚温, 胸部で測定した発汗率, 歩行前後の体重減少率, そして心拍数も同様に抑制効果が認められた. 温度感覚, 温熱的不快感, および疲労感の Visual Analog Scaleスコアは, CONと比較しVESTおよびPC+VESTで有意に低かったものの, VESTとPC+ VESTの間で差は認められなかった. 以上の結果から, 水循環ベスト単独使用でも深部体温の上昇, 脱水, 心理学的な暑熱負担を抑制する効果が認められた. プレクーリングを追加すると生理学的な暑熱負担は加算的に抑制されたが, 心理学的な暑熱負担には効果がなかった.

## 2) 相転移型蓄冷材料を用いた手足冷却

プレクーリングによる暑熱負担軽減策において, 水を使用せず安価で且つ適度な寒冷刺激となるような手足冷却方法の開発のため, 候補となる相転移型冷却剤 (Phase-Change Materials, PCM) について, シャープ材料・エネルギー技術研究所との共同で研究を開始した. 20°C程度の水で手足を冷却した場合が最適な効果を発揮することを以前確認しているため, PCMを12°Cの融解温度に設定することで皮膚温をコントロールした. また皮膚への密着性を考慮し, PCMと皮膚の間にゲルの緩衝剤を挟んだ. プレクーリングとして両手足に, PCMを取り付ける条件, 20°Cの水へ浸水させる条件, そして医療用ミトン・スリッパ型保冷剤を着用させる条件のいずれかで30分間冷やした後に, 防護服を着用しての暑熱下歩行を1時間行った. 歩行中の深部体温 (直腸温) の上昇は, 冷却を行わなかったコントロール条件と比較して, 冷却を行った3条件の方が有意に低かったが, ミトン・スリッパ型保冷剤の条件より, PCMおよび水の条件の方がさらに低かった. したがって, PCMによるプレクーリングが水の代替方法として活用できる可能性が示された.

## 3) ウェアラブル深部体温計の開発

低侵襲連続体温測定機器 (ウェアラブル深部体温計) の開発および評価について村田製作所と共同研究を行い, 胸部パッチ型センサによる深部体温の推定値と侵襲測定である食道温・直腸温との誤差検証を行った. 室温35°Cにおいて作業服着用条件と防護服着用条件に分け, 1時間の中程度歩行を行った. 推定値は食道温に似た反応を示し, 誤差は  $0.01 \pm 0.18$  °C (作業服), および  $-0.19 \pm 0.23$  °C (防護服) であった. この標準偏差は, 有線型で前額部において測定する熱流補償法の誤差よりも小さい. 防護服の条件で推定値が食道温より約 0.2°C低くなる原因は不明であるが, 直腸温より高い値であり, 深部体温として過小評価するレベルとは言えないと考えられる. 今後室温および体格の影響を検証し, 推定アルゴリズムの改良を行う.

本研究プロジェクトの開始前の計画では, 身体冷却の対策を現場へ導入し, 実証実験を行う予定であった. しかし, 暑熱負担を評価するための深部体温を耳で測定することが作業への障害となり実施が困難となった. 現在のところ作業員へ負担なく装着できるウェアラブル機器は心拍数や作業強度の測定であり, 暑熱負担を現場で正しく評価するものはない. 本研究の最後に新たに開発したパッチ型センサはそれらの問題を解決する上に, 暑熱負担のリアルタイムモニタリングによって, 作業中の熱中症リスクを管理するツールとして役立つ可能性がある.

身体冷却について, 現場での実用性の問題から現在ではクールベストやファン付き作業服などが主に用いられている. しかしこれまでの多くの先行研究で, それらの効果には限界があることがわかっており, 休憩中などにも積極的に身体冷却を行う必要がある. 12°Cの相転移型蓄冷材料は, 冷凍庫ではなく冷蔵庫で凝固し, さらに定温時間も長いことから, 現場で扱いやすい冷却素材として期待される. 今後は, 手足を冷却する形状を工夫し製品化へとつなげたい.

## 3 今後の展望

研究業績リスト

課題名：防護服着用作業における暑熱負担等の軽減策に関する研究

平成 28 年度 (2016 年)		
1	国内学術集会	時澤 健, ソン スヨン, 岡 龍雄, 安田彰典 (2016) 水循環ベストとブレイカーリングの併用による暑熱負担の軽減効果. 平成 28 年度温熱生理研究会, 要旨集, p22.
2	国内学術集会	時澤 健, 岡 龍雄, 安田彰典, ソン スヨン, 井田浩文 (2016) 原発復旧作業における熱中症対策. 第 71 回日本体力医学会大会, 要旨集, p167.
3	国内学術集会	時澤 健, ソン スヨン, 岡 龍雄 (2016) 運動前および運動中の身体冷却による暑熱負担の軽減効果. 第55回日本生気象学会大会, 日生気誌53(3), S69.
4	国際学術集会	Ken Tokizawa, Su-young Son, Tatsuo Oka, Akinori Yasuda (2016). Combined cooling applications before and during exercise additively reduce core temperature elevation in the heat. 6th International Conference on the Physiology and Pharmacology of Temperature Regulation, Book of Abstracts, p.147.
平成 29 年度 (2017 年)		
1	国際学術集会	Ken Tokizawa, Su-young Son, Tatsuo Oka, Akinori Yasuda (2017) Effects of combined practical cooling prior to and during exercise on thermoregulatory responses. The FASEB Journal, Vol. 31, No.1 Suppl 1085.1.
2	国際学術集会	Ken Tokizawa, Su-young Son, Tatsuo Oka, Akinori Yasuda (2017). Effects of combined cooling applications before and during exercise on heat strain while wearing protective clothings. 17th International Conference on Environmental Ergonomics, Book of Abstracts, p.142.
3	国内学術集会	時澤 健, 岡 龍雄, 安田彰典, 篠崎大祐, 城戸克也, 香村勝一, 内海夕香 (2018) 手足への異なる冷却方法による暑熱下運動時の深部温上昇抑制の比較, 第 95 回日本生理学会, The Journal of Physiological Sciences, Vol.68, Supp.1, p.181.
4	その他の専門家向け出版物	時澤 健(2017) 「熱中症対策の新技术—実用志向と未来志向—」. 労働安全衛生研究, Vol. 10, No. 1, p. 63-67, 東京, 独立行政法人労働安全衛生総合研究所
5	その他の専門家向け出版物	時澤 健(2017) 「現場応用可能な熱中症対策」. 全登協ニュース, Vol. 2, p. 8-9, 東京, 一般社団法人全国登録教習機関協会
6	その他の専門家向け出版物	時澤 健(2017) 「防護服着用作業時の暑熱負担軽減対策」. セイフティダイジェスト, Vol. 63, No. 5, p. 26-27, 東京, 公益社団法人日本保安用品協会
7	その他の専門家向け出版物	時澤 健(2017) 「建設業における熱中症の実態とその実用的な対策 (2) ~昼寝の効果と身体冷却の方法について~」. 建設の安全, Vol. 534, p. 10-11, 東京, 建設業労働災害防止協会
8	その他の専門家向け出版物	時澤 健(2017) 「労働現場における熱中症の実態とその実用的な対策 (後編) ~実用的な身体冷却とその効果について~」. Jitsu・Ten 実務&展望, Vol. 298, p. 34-37, 東京, ボイラ・クレーン安全協会
平成 30 年度 (2018 年)		
1	国内学術集会	時澤 健, 岡 龍雄, 土基博史, 志牟田 亨 (2018) パッチ型センサを用いた暑熱下作業時の高体温検知システムの試み. 日本生理人類学会第 77 回大会, 要旨集, p42
2	国内学術集会	時澤 健, 岡 龍雄, 土基博史, 志牟田 亨 (2018) パッチ型センサによる暑熱下運動時の深部体温推定法の検討. 平成 30 年度温熱生理研究会, 要旨集, p22
3	国内学術集会	時澤 健, 岡 龍雄, 篠崎大祐, 城戸克也, 香村勝一, 内海夕香 (2018) 融解温度 12℃の蓄冷材料を用いた暑熱負担軽減効果. 第 73 回日本体力医学会, 要旨集, p122.
4	国内学術集会	時澤 健 (2018) 労働環境での新しい熱中症対策—実用的クーリングとウェアラブル体温計—. 第32回運動と体温の研究会, 要旨集, p9.
5	国際学術集会	Ken Tokizawa, Tatsuo Oka, Hirofumi Tsuchimoto, Toru Shimuta (2018) Estimation of core temperature by a modified dual-heat-flux method that uses wearable patch-type sensors. 7th International Conference on the Physiology and Pharmacology of Temperature Regulation, Book of Abstracts, p.39.
6	国際学術集会	Ken Tokizawa, Tatsuo Oka, Hirofumi Tsuchimoto, Toru Shimuta (2019) Estimation of core

		temperature by a modified dual-heat-flux method that uses wearable patch-type sensors. 9th Federation of the Asian Oceanian Physiological Societies, Digital Book of Abstracts, 2P-508.
7	その他の専門家向け出版物	時澤 健(2018) 「職場における熱中症の実態と睡眠不足と熱中症の関係」. 労働衛生コンサルタント, Vol. 38, No. 127, p. 46-53, 東京, 日本労働衛生コンサルタント会
8	その他の専門家向け出版物	時澤 健(2018) 「異分野技術を活用した新しい熱中症予防対策」. 産業保健 21, Vol. 94, p. 26, 東京, 独立行政法人労働者健康安全機構