

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25560026

研究課題名(和文)防護服着用により、作業者の暑熱ストレスはどの位増加するか？

研究課題名(英文)How to evaluate physiological strains of workers while wearing protective clothing?

研究代表者

栃原 裕 (TOCHIHARA, Yutaka)

九州大学・芸術工学研究科(研究院)・名誉教授

研究者番号：50095907

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：暑熱ストレス評価基準(WBGT)許容値に付加すべき衣服補正係数(CAFs)を多数検討。基準(綿素材作業服)に対する補正係数は、作業服0、単層SMSポリオレフィン製つなぎ服0.5、ポリオレフィン製つなぎ服1、フード1、単層不織布ポリオレフィン製つなぎ服2、単層 Tyvek 1422A 製つなぎ服2、単層 NexGen製つなぎ服2.5、2層布製つなぎ服3、Saratoga ハンマー防護服3、長袖長丈溶剤保護エプロン4、Microporous製つなぎ服6、単層溶剤保護つなぎ服(フード 無)10、単層溶剤保護つなぎ服(フード 有)11、単層溶剤保護つなぎ服とNP 呼吸器(フード 有)12等である。

研究成果の概要(英文)：This paper focuses on a clothing adjustment factor (CAF). The adjustment to the WBGT value measured in an environment to account for the effects of clothing that has different thermal properties from that of standard work clothing.  
Work clothes: 0, Cloth coveralls (cotton and Nomex): 0, Non-woven SMS coverall as a single layer: 0, Full-face negative pressure respirator: 0.3, SMS nonwoven polypropylene coveralls: 0.5, Polyolefin coveralls: 1, Hood\*: 1, Non-woven polyolefin coveralls as a single layer: 2, Tyvek 1422A coveralls as a single layer: 2, NexGen coveralls as a single layer: 2.5, Double-layered woven clothing: 3, Saratoga hammer protective clothing ensemble: 3, Vapour-barrier apron with long sleeves and long length over cloth coveralls: 4, Microporous coveralls: 6, Vapour-barrier coveralls as a single layer (without hood): 10, Vapour-barrier coveralls as a single layer (with hood): 11, Vapour-barrier over cloth coveralls without hood and with NP respirator: 12

研究分野：衣・住生活学

キーワード：暑熱ストレス 防護服 WBGT 生理負担

### 1. 研究開始当初の背景

暑熱ストレスの評価法として、多くの指標 (ET, OT, DI, ET\*, P4SR, HIS, PSI・・・) が考案されてきたが、世界的に最も広く利用されている指標が、WBGT (Wet Bulb Globe Temperature、湿球黒球温度) 指数である。

国際標準規格では、ISO7243 (Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index) が 1989 年に制定されている。さらに、我が国でも申請者が主査となり、その翻訳版を JIS Z 8504 (WBGT (湿球黒球温度) 指数に基づく作業者の熱ストレスの評価) として公表した (1999 年)。日本産業学会、日本スポーツ協会、日本生気象学会等でも広く WBGT 指標による基準値が熱中症予防指針として使用されている。

ところが WBGT 基準値の適用範囲は「夏の軽作業服」を着用した場合に限られ、防護服等を使用した場合には、解釈が非常に難しくなる。JISZ8504 では、留意事項で「一般に水蒸気を透さないような衣服の場合には、基準値を下げる (厳しくする) 必要がある。また一方では、熱を反射する衣服の場合には基準値を上げる (緩くする) こともある。修正を行うことが困難である場合、つまり標準的な作業着から明らかに異なる特殊な衣服の組み合わせのときには、専門家に相談する事が望ましい」との記述がある。生活科学の被服衛生の専門家は、この質問に答える必要がある。

### 2. 研究の目的

防護服着用により、作業者の暑熱ストレスはどの位増加するか？

新しい有害化学物質やウイルスの発現、原子力関連事故の発生により、作業員が防護服の着用を強いられることが多くなっている。さらには、地球温暖化による夏季の気温上昇により、防護服を着用することによる、作業者の熱中症の多発が社会的に問題となり、被服衛生学者は、防護服を着用することにより、どの程度暑熱ストレスが増すかに対して、回答が求められている。

本研究の目的は、防護服を含む各種衣服着用時に増大する暑熱ストレスを的確に評価するために、広く利用されている暑熱ストレス評価基準 (WBGT) の許容値に、付加すべき補正値を、被験者実験結果やサーマルマネキン測定結果から検討し、ISO7243 (Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index) の改訂作業を通じても考察を加える。

### 3. 研究の方法

平成 25 年 10 月 4 - 5 日に韓国ソウル国立大学生生活科学部衣類学科で開催された防護服に関する国際シンポジウムで、ソウル大学の Joo-Young Lee 教授、英国ラフバラー大学、Ken Parsons 教授、千葉工業大学の若林斉准教授と、防護服着用に伴う暑熱負担の増

加に関する検討を行った。さらに、その成果は、済州島で開催された、ISO (国際標準化機構) /TC159 (人間工学) /SC5 (環境人間工学) /WG1 (温熱環境) のセッションでも継続審議された。特に、ISO7243 「暑熱環境 WBGT 指数に基づく作業者の熱ストレス評価」では、この問題に関する活発な論議がなされた。本規格は、労働環境において作業者が受ける暑熱環境による熱ストレスの評価を簡便に行うことができ、また速やかな判断を可能にする方法を与える。WBGT 指数は、自然湿球温度 (tnw) と黒球温度 (tg) の 2 つのパラメーターの測定をし、そして乾球温度 (TA) の測定も行う。屋内もしくは屋外で太陽照射のない場合、屋外で太陽照射のある場合、基準値は、直腸温が 38 以上にならないように配慮して作成されたものである。作業強度は安静から極高代謝率までの 4 段階に区分され、各々に基準値が示され、さらに暑熱環境に順化した作業者と未順化の作業者に分けて基準値がある。論議のなかで特に防護服を着用した際の暑熱負担増を考慮した「衣服係数」についてのまとめが必要であることが確認された。具体的には、防護服の湿性熱抵抗から「衣服係数」を決定する方法を詳細に検討した。

平成 25 年度に続き、防護服着用時の暑熱負担に関する研究事例を収集し、海外の研究者からも情報を集めた。防護服については被験者実験を追加した。各種防護服の熱抵抗 (Clo 値) や蒸発熱抵抗の資料を収集し、不足するものはサーマルマネキンにより実測した。最終的に、相当数の各種防護服を着用した際の、暑熱ストレスを推定し、WBGT 指数による許容基準に補正すべき補正値を決定する。共同研究者の深沢や、ISO/TC159/SC/WG1 のメンバーから防護服着用時の生体負担についての知見を得ることができた。

### 4. 研究成果

WBGT を使う目的は暑熱環境で作業者が衣服を着用した時の熱ストレスをスクリーニングことである。ばく露の予想持続時間の範囲が 30 分を超えない場合、WBGT は排除されなければならないが、作業者の生理指標を測定する個人モニタリングは進められている。ここでは、ISO7243 とその中でも衣服補正因子と WBGT 基準値の限界に関して検討し、WBGT 測定時に適用する衣服補正係数に関して考察した。

### 6 つの用語とその定義

#### clo

着衣の保温力を示す単位である。1 clo =  $0.18^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{kcal}^{-1} = 0.155^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ 。Clo 値は保温力を表現する単位で、室内で成人の作業者が衣服を着用し快適を感じる環境の保温力を示す。

### 着衣の熱抵抗 ( $I_{cl}$ )

着衣の固有熱抵抗で、有効熱抵抗は ( $I_{cl} + I_a$ ) で、 $I_a$  は環境の熱伝導と同値なものである。一般的に ( $I_{cl} + I_a$ ) は、サーマルマネキンの表面からの熱生産量をマネキン表面積で割ったもので分けられた環境温度までの温度勾配で測定する [ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ ]。これは clo 値で示される場合もある。

### 衣服の蒸発熱抵抗

これは防水性と同意語で、二つの表面の間の蒸発熱抵抗は  $\text{m}^2 \cdot \text{kPa} \cdot \text{W}^{-1}$  で表現され、同量・同型の耐水性と見なされる。この熱抵抗は全身の表面積が均等に被覆された場合の現実的、あるいは均等ではない蒸気を通った同一な熱損失の結果である。

### WBGT (Wet Bulb Globe Temperature)

代謝とともに暑熱状況の潜在的な熱ストレスの可能性を評価する簡便な環境指標である。WBGT 指標は 2 つのパラメータ湿球温度 ( $t_{nw}$ ) と黒球温度 ( $t_g$ ) から計算できる。センサーは屋内と屋外どちらでも太陽から直接あたる入射放射に影響を受けるし、黒球の係数は環境温度 ( $t_a$ ) の増加により減少する。

屋内と屋外の関係なく放射があれば、黒球温度係数は減少し、乾球温係数は増加する (式 1 and 2)。すなわち、夏の屋外作業者または、製造工場のかまどの中での作業者のためには [式. 2] が使われる。しかし、夕方の屋外作業シフトでは、WBGT 計算のため [式. 1] が適用される。放射線防護服を着用する場合には、[式. 1] の使用が適切である。

Without solar load,  $\text{WBGT} = 0.7t_{nw} + 0.3t_g$   
--- [式. 1]

With solar load,  $\text{WBGT} = 0.7t_{nw} + 0.2t_g + 0.1t_a$   
--- [式. 2]

### 衣服補正係数 (Clothing Adjustment Factor : CAF)

測定された WBGT に普通の作業服に比べ異なる温熱特性を持つ衣服の影響を補正するものである。

### 実効 WBGT Effective WBGT ( $\text{WBGT}_{eff}$ )

WBGT 値を衣服の影響のため補正したものである。実効 WBGT は、基準になる衣服着用と比べ、実際の作業服を着用する時に同様な WBGT 環境が提供できるようにする (断熱指標  $I_{cl} = 0.6 \text{ clo}$ ,  $i_m = 0.38$ )。

### 実効 WBGT と関連がある 6 項目

#### WBGT<sub>eff</sub> 値とその限界は?

時間加重平均 実効 WBGT は時間加重で計測された WBGT 値を衣服要因に合わせ補正を行ったものである。この値は暑さに順応した群と順応していない群を 5 つのレベルの代謝によって分類できる。もともと、WBGT 基準値は最高直腸温  $38^{\circ}\text{C}$  を許容値とすることで決められている。WBGT 基準値を考慮するには 2

つの方法がある。1) もし実効 WBGT 値が実効 WBGT 基準値の以下であれば、それ以上の行動は必要ではない。2) 実効 WBGT 値が実効 WBGT 基準値より大きい場合にはさらなる対策が必要になる。

### 対象者の基準は?

まず、実効 WBGT は作業時、身体上に問題がない健康な成人に適用される。また、対象者の基準としては体表面積が  $1.8 \text{ m}^2$  である成人とする。WBGT の限界は体表面積に伴う熱損失に基づく。代謝量 ( $W$ ) は体表面積が  $1.8 \text{ m}^2$  に等しい成人を基準にしている。たとえば、平均体表面積が  $1.5 \text{ m}^2$  で、代謝量が  $200 \text{ W}$  であるとしたら、 $240 \text{ W}$  が実効 WBGT 基準の限界になる ( $1.5 \text{ m}^2 : 200 \text{ W} = 1.8 \text{ m}^2 : 240 \text{ W}$ )。

次に、評価の前に少なくとも 1 週間の熱暴露を行い、熱環境に順応された人を基準とする。

最後に、対象者は綿素材の長袖 シャツと長ズボンを着用する ( $0.6 \text{ clo}$ )。  $0.6 \text{ clo}$  以上の衣服を着用する場合、衣服補正係数によって WBGT は補正されなければならない。

### 衣服補正係数と WBGT の測定は?

基準値は綿素材の作業服 ( $0.6 \text{ clo}$ ) を基準としている。衣服補正係数は測定された WBGT 値を実際の作業現場での着衣環境による熱ストレスを表す実効 WBGT を算出するため使われる。

表 1. 衣服補正係数 (CAFs)

アンサンプル	衣服補正係数 ( $^{\circ}\text{C}$ -WBGT)
1 作業服	0
2 布製つなぎ服 (綿と Nomex <sup>®</sup> )	0
3 単層の布織布素材の SMS つなぎ服	0
4 Full-face negative pressure respirator	0.3
5 単層の SMS ポリオレフィン製つなぎ服	0.5
6 ポリオレフィン製つなぎ服	1
7 フード*	1
8 Non-woven polyolefin coveralls as a single layer	2
9 単層の Tyvek 1422A <sup>®</sup> 製つなぎ服	2
10 単層の NexGen <sup>®</sup> 製つなぎ服	2.5
11 2層の布製つなぎ服	3
12 Saratoga <sup>®</sup> ハンマー防護服	3
13 長そでおよび長い丈を持つ溶剤保護エプロン	4
14 Microporous 製つなぎ服	6
15 単層の溶剤保護つなぎ服 (フードなし)	10
16 単層の溶剤保護つなぎ服 (フードあり)	11
17 単層の溶剤保護つなぎ服と NP 呼吸器 (フードなし)	12

\*フードと呼吸器ない

$WBGT_{eff} = WBGT_{measured} + CAF$  --- [Eq. 3]  
 衣服補正係数は1から12までになっている(表1)。一般に、衣服補正係数は蒸発熱抵抗の増加や透過指数の減少とともに増加する。

従って、衣服補正係数は蒸発熱抵抗と湿度から大きく影響を受ける。衣服補正係数は完全密閉性服には適用できないし、数枚に重ねられた衣服にも使われない。衣服補正係数で表に記載されていないアンサンブルに関しては、類似な熱特性を持つ衣服を参照にする(ISO9920参照)。

例えば、熱順応した作業者の平均代謝率がレベル2であれば、WBGT基準値は28°Cである。作業者が長そでおよび長い丈を持つ溶剤保護エプロンを着用したとしたら(表1の13)、衣服補正係数は4°Cになる。従って、作業者の実効WBGTは34°Cになり、WBGT基準の限界である28°Cと比べ6°C高い値になる。この場合、作業現場ではWBGT6°Cを下げることを勧める(表2)。

表2. 衣服補正係数とWBGT 限界

パラメータ	
代謝率レベル	2
暑さになれている	Yes
着衣状況(表1)	#13
WBGT 測定値	30°C
衣服補正係数 (表1)	4°C
実効 WBGT	34°C (= 30+4°C)
WBGT 基準値限界	28°C

### 計算のために必要な測定時間は?

解析のためには1時間の測定インタバールが必要である。しかし、1時間の測定は恣意的で、厳しすぎるという意見もある。30分の運動と15分の回復の45分インタバール運動に調整することも可能である。しかし、数分程度の短時間の測定は認められない。

1時間以上の作業の場合には着衣または活動によって分けられている。“ $p$ ”パラメータの平均(たとえば、実効WBGT)はEq. 4の通りになる。測定の回数はパラメータの時間変化によって決められる。また、センサーの応答特性が使われるし、測定の精度が望ましい。

$$\bar{p} = (p_1 \times t_1 + p_2 \times t_2 \dots + p_n \times t_n) / (t_1 + t_2 + \dots + t_n) \text{ --- [式.4]}$$

$p_1, p_2, \dots, p_n$ は $t_1, t_2, \dots, t_n$ で得られたパラメータのレベルである。

$$t_1 + t_2 + \dots + t_n = T = 1 \text{ h --- [式.5]}$$

式4と5は同様に作業時の空間と時間の变化に従って適用できる。測定環境に時間と空間に変化がある場合、空間と時間を考慮したWBGTに補正した後に、衣服補正係数を考慮すべきである。

### どこで測定する?

作業者がパラメータの値が一定ではない環境にいる場合、頭部・腹部・足首高さの3つのポイントでWBGT指標を決定する必要がある。平均値は以下の式で得られる(Eq. 6)。

$$WBGT = (WBGT_{head} + 2WBGT_{abdomen} + WBGT_{ankles}) / 4 \text{ --- [式.6]}$$

WBGT指標の迅速決定のためには、熱ストレスが最大になるところで1回の測定を行うことでも十分である。身体の3つのポイントに個別の装置を持ったままで同時に測定しなければならないのでこの方法に関しては、少数の作業者しかできないという実用的な面からの疑わしい意見もある。ある研究者らはスクリーニング段階の正確さは認められていないことを考慮することであろう。

### 球体のサイズは?

一般的に直径150-mmの黒球(0.95の放射係数;20から120°Cまでの測定範囲)が使用される。しかし、多様な仕様の球体が使われている。球体の直径によって補正をする補正式もある(ISO 7243)。直径が大きい球体はより高い温度になる傾向があるが、その相関は明らかになっていない。球体のサイズの補正には、気流速度が求められる。

### <引用文献>

Parsons K (2014) Human thermal environments (3rd edition). pp 325, 345-346, 526. CRC Press (Taylor and Francis Group).

The impact of firefighter personal protective equipment and treadmill protocol on maximal oxygen uptake. Joo-Young Lee, Ilham Bakri, Jung-Hyun Kim, Su-Young Son, Yutaka Tochiara, Journal of Occupational and Environmental Hygiene 10(7): 397-407, 2013

Occupational stress and strain in relation to personal protective equipment of Japanese firefighters assessed by a questionnaire. Su-Young Son, Joo-Young Lee, Yutaka Tochiara, Industrial Health 51(2): 214-222, 2013

Effects of firefighters' self-contained breathing apparatus' weight and its harness design on the physiological and subjective responses. Ilham Bakri, Joo-Young Lee, Kouhei Nakao, Hitoshi Wakabayashi, Yutaka Tochiara, Ergonomics 55(7): 782-791, 2012.

原子力施設における防護服用時熱中症リスク管理のための鼓膜温に基づく直腸温推定法. 高橋直樹, Joo-Young Lee, 若林齊, 柘原裕, 保健物理 47(1): 54-65, 2012.

Validity of infrared tympanic temperature for the evaluation of heat

strain while wearing impermeable protective clothing in hot environments. Joo-Young Lee, Kouhei Nakao, Naoki Takahashi, Su-Young Son, Ilham Bakri, Yutaka Tochihara, Industrial Health 49(6): 714-725, 2011.

Physiological strains of wearing aluminized and non-aluminized firefighters' protective clothing during exercise in radiant heat. Chinmei Chou, Yutaka Tochihara, Mohamed Saat Ismail, Joo-Young Lee, Industrial Health 49(2): 185-194, 2011.

Bernard TE, Caravello V, Schwartz SW, Ashley CD (2008) WBGT clothing adjustment factors for four clothing ensembles and the effects of metabolic demands. Journal of Occupational and Environmental Hygiene 5, 1-5.

ISO 9920 (2007) Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble. The International Organization of Standardization.

Bernard, TE, Luecke CL, Schwartz SW, Kirkland KS, Ashley CD (2005) WBGT clothing adjustments for four clothing ensembles under three relative humidity levels. Journal of Occupational and Environmental Hygiene 2, 251-256.

IUPS Thermal Commission (2001) Glossary of terms for thermal physiology. The Commission for Thermal Physiology of the International Union of Physiological Sciences

ISO 7243 (1989) Hot environments -- Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature), The International Organization of Standardization.

## 5 . 主な発表論文等

### 6 . 研究組織

#### (1)研究代表者

栃原 裕 (TOCHIHARA, Yutaka)  
九州大学・芸術工学研究科・名誉教授  
研究者番号： 5 0 0 9 5 9 0 7

#### (2)研究分担者

深沢 太香子 (FUKAZAWA, Takako)  
京都教育大学・教育学部・准教授  
研究者番号： 9 0 4 2 3 5 7 4

#### (3)研究協力者

LEE, Joo-Young  
Department of Textiles, Merchandising and Fashion Design, Seoul National University, Korea