ファン付き作業服と作業時間帯が建設作業員の生理・心理反応に及ぼす影響

建設現場における実態調査 その2

EFFECT OF VENTILATED WORK WEAR AND WORKING SCHEDULE ON PHYSIOLOGICAL AND PSYCHOLOGICAL RESPONSES OF CONSTRUCTION WORKERS

No.2 Actual investigation at active construction sites

栗原 浩平^{*1}, 山崎 慶太^{*2}, 菅 重夫^{*3},
小林 宏一郎^{*4}, 濱田 靖弘^{*5}, 高橋 直^{*6}

*Kouhei KUWABARA, Keita YAMAZAKI, Shigeo SUGA,
Koichiro KOBAYASHI, Yasuhiro HAMADA and Nao TAKAHASHI*

We investigated the relationship between the thermal environment at a construction site and the physiological and psychological responses of workers wearing/not wearing ventilated work wear (VWW). The overall, chest and forearm skin temperatures of the workers not wearing VWW were significantly higher than those of workers wearing VWW. To clarify the effects of VWW and working schedules on body weight loss (BWL), the rate of BWL was simulated based on the evaporation rate according to a regression formula of measured data in an artificial chamber. Increased BWL during the late compared with the early shift causes dehydration in the afternoon.

Keywords : *Ventilated work wear, Construction worker, Skin temperature, Evaporative rate, Rate of body weight loss, Working schedule*

ファン付き作業服, 建設作業員, 皮膚温, 蒸発密度, 体重減少密度, 作業時間帯

1. はじめに

近年、暑熱対策として冷却服の利用が拡大している。冷却服には、氷冷式¹⁾やPCM式²⁾の冷却ベスト、強制換気式の冷却服³⁾などいくつかのタイプがあり、主に人工気候室での被験者実験やサーマルマネキンを利用した実験⁴⁾により、その有効性が検証されてきた。建設現場では、それらの中でも軽量性と持続性に優れた強制換気式冷却服であるファン付き作業服 (Ventilated Work Wear; 以下VWWと称す) の利用が急拡大している。Chanら⁵⁾は、PCMとファンを組み合わせたハイブリッド冷却ベストを開発し、実際の建設現場でその有効性を検証しているが、実際の現場における冷却服の有効性に関する研究はまだ少ないようである。

著者らは、2016年7~8月に屋内外の建設現場において実測を行い、ファン付き作業服 (VWW) や作業時間帯等の要因が作業員 (屋内: 内装工・配管工、屋外: 型枠大工・鉄筋工) の生理・心理反応に及ぼす影響を評価した⁶⁾。心理反応ではVWWの効果が認められたが、温熱環境の日・時変動と、職種毎・個人毎に活動量の差が異なることもあり、生理反応におけるVWWの効果は、4パラメータ

のみ (屋外: 平均皮膚温、耳内温、歩行作業、屋内: ボード・配管作業) で認められた。また、屋外工事の作業員の平均皮膚温は、午後の方が有意に高値を示すのに対し、屋外のMRTは午後に有意に低かったため、パス解析による型枠大工の「暑さ感」が午後に増すのは、温熱環境の影響ではないと考えられた。脱水等の影響が考えられるが、発汗量は測定しなかったため、評価できなかった。

次に気温・活動量・服装の条件を統制した条件下でのVWWの効果の評価のために、2017年5~6月に人工気候室を用いて被験者実験を行った⁷⁾。現場を想定した環境 (気温29, 34℃, 相対湿度50%) で、被験者 (鉄筋工・型枠大工) に模擬作業を行わせ、VWW着用、非着用時の生理・心理反応を測定した。現場で測定されなかった裸体時体重減少量と着衣時体重減少量、両者の差から着衣残留汗量を算出した。その結果、気温34℃では、VWWが平均皮膚温を約0.4℃、舌下温を約0.1℃抑制し、着衣残留汗量と心拍数も有意に低値を示した。一方、蒸発した汗、呼吸に含まれる水分と捉える着衣体重減少量にはVWWの有無で有意な差がなかった。この結果から、「VWWの有無と気温に依存して着衣残留汗量が有意に変化し、心拍

^{*1} 釧路工業高等専門学校 准教授・博士 (工学)

^{*2} ㈱竹中工務店技術研究所 部長付・博士 (工学)

岩手大学理工学部 客員教授

^{*3} ㈱竹中工務店東京本店安全環境部 グループリーダー

^{*4} 岩手大学理工学部 教授・博士 (工学)

^{*5} 北海道大学大学院工学研究院 教授・博士 (工学)

^{*6} 千村ネイチャー倶楽部 監事・博士 (社会学)

Assoc. Prof., Dept. of Creative Engineering, National Institute of Technology, Kushiro College, Dr.Eng.

Assist. to General Manager, Takenaka Research & Development Institute, Dr.Eng. / Visiting Prof. of Iwate University

Takenaka Corporation, Head Office, Tokyo, Safety and Environment Dept.

Prof., Dept. of Systems Innovation Engineering, Iwate University, Dr.Eng.

Prof., Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ., Dr.Eng.

Chimura Nature Club, Ph.D. in Sociology

数が増減する。」という有意なパスモデルを作成した。しかし、人工気候室内は日射のない静穏状態であることや、移動が少ないため作業量も実際よりも少ないと考えられ、実際の建設現場での体重減少量を測定し、VWWの有効性を検証する必要があると考えられる。

そこで本研究では、人工気候室実験で確認されたVWWが平均皮膚温、部位別皮膚温に及ぼす効果を実際の現場で検証すること、前報⁹⁾の建設現場では測定できなかった体重減少量を測定し、VWWや作業時間帯等の要因が体重減少量に及ぼす影響を検討することを目的とする。まず気温と平均皮膚温や部位別皮膚温の関係、平均皮膚温と心理反応の関係について、VWWが及ぼす影響について検討する。さらに、人工気候室実験でVWWの効果が顕著に確認された着衣残留汗量⁷⁾を含みかつ現場では測定が困難な裸体時体重減少量(発汗量+不感蒸散量)を、人工気候室実験から得られた回帰式を用いて、着衣時体重減少量と飲水量から推定する。推定された体重減少量について、気温をパラメータとしてVWWの効果を検証するとともに、舌下温、平均皮膚温、心拍数、活動量がVWW有無と時間帯により変動するかを二要因の分散分析を用いて評価する。既報⁹⁾で提示された課題である、実際の建設現場で、作業員の熱ストレス、脱水状態が時間帯に依存するか詳細に検証する。

2. 実測・解析方法

2.1 実測方法と場所

2.1.1 実測場所・日時と被験者・作業内容

実測日時・実測場所をTable 1に示す。本実測は、東京都新宿区小川町のRC造8階建ての建設現場で、2017年8月3~8日のうち5日間実施した。夏季の作業現場の実例として、屋外の建設現場で実際に作業を行っている鉄筋工や型枠大工等を対象とした実測を行った。鉄筋工、型枠大工の作業状況をFig.1に示す。(a)に示すように型枠大工は6階での柱・梁型枠建て込み作業、(b)に示すように鉄筋工は地上での梁配筋作業に従事していた。被験者属性をTable 2に示す。被験者は健康な男性10名である。各日5名にVWWを着用させ、残り5名は非着用とした。この際、薦職以外は同日に各職種で必ず着用・非着用の両状態が用意できるようにVWWを分配した。以降、着用日と非着用日を交互に設けた。

本研究は、岩手大学の人を対象とする医学系研究倫理審査委員会の承認(第201703号、平成29年6月19日付)を得て実施した。被験者には、実験前に予め実験内容を説明し、承諾を得ている。

2.1.2 温熱環境と人体の生理・心理反応

(a) Form worker

(b) Rebar placer

Fig.1 Working condition of each construction worker

温熱環境と人体の生理反応の測定項目・測定機器をTable 3に示す。環境側・人体側の測定共にそれぞれの計測間隔は1分とした。温熱環境測定機器は、建設作業に支障が無いように、鉄筋工が主に作業する地上では作業域の端に、型枠大工が主に作業する6階では作業域のほぼ中心位置に設置した(Fig.2)。地上、6階共に温湿度1点(床1.5m)、風速(熱線式1点、三杯式1点(同2m))、灰グロブ温1点(同1m)を測定し、温湿度センサは小型自然通風シエルター内に固定し、センサへの熱放射を防いだ。6階測定点では床1.5mの日射計により水平面日射量を、地上測定点では床1mの黒色と白色のグローブ温度計の計測値よりグローブに到達する日射量を測定した。6階の測定点は、実測初日の3日は見通しのきく風通しの良い場所であったが、2日目以降周囲の壁が建て込まれ、7日、8日は外気が遮断され風通しが悪くなった。

朝の作業開始前に、被験者には心電計(胸バンド)、ボタン型温度ロガー(4点:前腕、胸、大腿前面、下腿前面)、リストバンド型ライフレコーダー(左手首)⁹⁾、心拍計(右手首)を装着させた。現場での作業は基本的に8~17時に行われ、休憩を挟んで午前2回(AM1: 8:00~10:00、AM2: 10:30~12:00)、午後2回(PM1: 13:00~15:00、PM2: 15:30~17:00)の4回に分けられている。着衣時体重、飲水量、舌下温、主観申告記入を各作業開始前後に計8回行った。作業中の飲水量はスポーツドリンクを用意し、その減少量を記録した¹⁰⁾。平均皮膚温はRamanathanの4部位に基づき、胸部×0.3+前腕部×0.3+大腿部×0.2+下腿部×0.2として算出した。主観評価として、暑さ感、快適感、口渴感を作業開始時と終了時に申告させた¹¹⁾。

なお、本報の分析には型枠大工4名(A, B, C, D)と鉄筋工3名(O, P, Q)のデータのみを使用することとした。これは、被験者R(薦職)の作業が多岐にわたり他の職種と作業時間帯が大きく異なっていたことと、被験者E, O(土工)の作業場所は屋内が多く温熱環境が鉄筋工・型枠大工とは異なっていたためである。VWWの着用と非着用日はTable 5の通りである。VWW着用は延べ18名、

(a) 03/08/2018

(b) 08/08/2018

(a) On the 6th floor for form worker

(b) On the ground for rebar placer

Fig.2 Equipments for measuring thermal environment

VWW 非着用は延べ 17 名のデータを使用する。温熱環境は、午前・午後 2 データずつとなるように当該時間帯の平均値を計算した。

2.2 解析方法

黒色と白色のグローブ温から環境グローブ温と人体に到達する日射量を算出する⁸⁾。環境グローブ温とは、気温と長波長放射の影響を考慮したグローブ温を表し、以下の式(1)で算出される。また人体に到達する日射量は、式(2)で算出される。

$$t_{gle} = \frac{\alpha_b t_{gl,w} - \alpha_w t_{gl,b}}{\alpha_b - \alpha_w} \quad (1)$$

$$I_{sun,gl} = \frac{(t_{gl,b} - t_{gle}) h_{gl}}{\alpha_b} \quad (2)$$

ここで、 t_{gle} :環境グローブ温度[°C]、 $t_{gl,b}$ 、 $t_{gl,w}$:黒色、白色グローブ温度[°C]、 α_b 、 α_w :黒色、白色グローブ温度計の表面日射吸収率(=0.96,

Table 1 Schedule and place

Schedule	3rd, 4th, 5th, 7th and 8th, August, 2017
Place	Shin-ogawacho, Shinjuku-ku, Tokyo RC, 8F, Building construction field

Table 2 Human subjects

No.	Age	Height [m]	Weight [kg]	Type of occupation
A	68	1.68	66	Form worker
B	51	1.70	62	Form worker
C	20	1.60	49	Form worker
D	50	1.70	82	Form worker
E	32	1.72	73	Earth worker
O	66	1.76	72	Rebar placer
P	24	1.70	51	Rebar placer
Q	28	1.68	66	Rebar placer
R	30	1.72	79	Scaffold worker
S	16	1.68	84	Earth worker

Table 3 Measuring instruments

Electrocardiogram	WHS-1 (Union Tool Corp.)
Skin temp.	Thermoclon SL (KN Lab.)
METs	Life Recorder (A & D Corp.)
Pulse rate	A360 (Polar Electro)
Sublingual temp.	Electronic Thermometer (Terumo Corp.)
Weight、 water intake	GP-100K (T&D Corp.)
Air temp.	TR-72 (T&D Corp.)
Relative Humidity	
Wind velocity	6533 (Kanomax Japan Inc.) 200-WS01B (Field Pro)
Solar radiation	SP-110 (Apogee Inst.)
Globe temp.	150mmφ (Black and White) 40mmφ (Gray)

Table 4 Sensations^{注2)}

	Thermal sensation	Comfort sensation	Thirsty Sensation
3	Very hot	Very uncomfortable	Very thirsty
2	Hot	Uncomfortable	Thirsty
1	Slightly hot	Slightly uncomfortable	Slightly thirsty
0	Neural	Neutral	Not thirsty
-1	Slightly cold	Slightly comfortable	
-2	Cold	Comfortable	
-3	Very cold	Very comfortable	

Table 5 Schedule of subjects with and without VWW.

	8/3	8/4	8/5	8/7	8/8
With VWW	A, B O, P	C, D Q	A, B O, P	C, D Q	A, B O, P
Without VWW	C, D Q	A, B O, P	C, D Q	A, B O, P	C, D Q

0.21)[n.d], $I_{sun,gl}$:人体に到達する日射量[W/m²], h_{gl} :グローブ温度計の総合熱伝達率[W/(m²·K)]。

各作業員の皮膚表面積[m²], 作業時間[min], 作業時間帯前後に測定した着衣時体重減少量[g]、各作業時間帯中の飲水量[g]から、下式(3)を用いて蒸発密度[g/(h・m²)]を求めた。なお、現場での着衣時体重減少量には尿量も含まれている。各時間帯の飲水密度[g/(h・m²)]も、同様に式(4)から求めた。

$$\text{蒸発密度} = \frac{\text{着衣時体重減少量} + \text{飲水量}}{\text{皮膚表面積} \times (\text{作業時間} / 60)} \quad (3)$$

$$\text{飲水密度} = \frac{\text{飲水量}}{\text{皮膚表面積} \times (\text{作業時間} / 60)} \quad (4)$$

作業時間帯と VWW の有無を独立変数、生理反応（蒸発密度、舌下温、平均皮膚温、心拍数）を従属変数とし、VWW と時間帯によって各生理量が変動するか、二要因の分散分析を用いて評価した。心拍数、平均皮膚温は作業終了前の 30 分間の平均値、活動量は作業時間帯の平均値とした。

分析にあたり、午前 2 回・午後 2 回を分析対象とした。鉄筋工は 3 名（4 回×3 人×5 日=のべ 60 名）、型枠大工は 4 名（4 回×4 人×5 日=のべ 80 名）で分析対象者は合計のべ 140 名であったが、測定機器の故障などで不具合が生じた型枠大工の 2 回を除いたため、有効な分析対象者は鉄筋工のべ 60 名、型枠大工のべ 78 名、合計のべ 138 名となった。ただし、心電計（胸バンド）は、作業中に胸部が圧迫された際にスイッチが切られるなどしてさらに不具合が生じた型枠大工の 15 回、鉄筋工 14 回をそれぞれ除いたため、有効な分析対象者は鉄筋工のべ 46 名、型枠大工のべ 65 名、合計のべ 111 名となった。温熱環境と生理・心理反応の関係について、回帰直線の差の検定を行った。傾きの平行性の検定を行い、平行であれば切片の相等性の検定を行った。結果の p 値は切片の有意差を表す。

さらに、現場の測定対象となった職種（型枠大工・鉄筋工）が、人工気候室での実験の職種と一致しているので、人工気候室実験の結果から、VWWの有無で蒸発密度と裸体時体重減少密度の関係を求めた。回帰式を用いて、現場の蒸発密度の実測値から、現場では実測が困難な裸体時の体重減少密度（発汗密度＋不感蒸散密度）を予測し、VWWの効果と時間帯の影響を評価することを試みる。

3. 結果

3.1 温熱環境の実測結果

Fig.3に、地上での温熱環境の実測結果を示す。

Fig.3(a)は、気温の実測結果である。本実測では、8月3、4日が気温30℃以下であり、5日以降は30℃を超える環境であったことがわかる。Fig.3(b)に、環境グローブ温度の実測結果を示す。気温と環境グローブ温にほとんど差は見られないが、PM2の時間帯は環境グローブ温よりも気温の方が高い。グローブ温度計の設置場所が影響していると考えられる。8日のみAM2～PM2は気温よりも環境グローブ温のほうが1.5～2.7℃高い傾向が示された。Fig.3(c)に人体に到達する日射量の実測結果を示すが、8日は日射量が多いため、地表面の温度が上昇していることが原因と推察される。また本実測期間中は、AM2の時間帯で到達日射量が最も多いことがわかる。Fig.3(d)に風速、Fig.3(e)に絶対湿度の結果を示す。風速は午後に弱くなる傾向にあり、絶対湿度について3、4日は午後にかけて上昇、5～8日はほぼ一定の値を示している。

3.2 平均皮膚温と部位別皮膚温

気温と平均皮膚温の関係をFig.4(a)に、気温と部位別皮膚温の関係をFig.4(b)～(e)に示す。平均皮膚温は、VWWありよりもVWWなしの方が、高い値を示していることがわかる。回帰直線の差の検定を行った結果、回帰直線は平行であり、気温に関係なくVWWなしの方が有意に0.57℃高いことが示された（ $p<0.001$ ）。

部位別に見ると、ファンの影響がある胸部では、VWWなしの方が有意に1.61℃高く（ $p<0.001$ ）、同じくファンの影響がある前腕部でもVWWなしの方が有意に0.41℃高いことが示された（ $p=0.041$ ）。人工気候室実験⁷⁾では、胸部では同じくVWWなしの方が有意に高く（29, 34℃）、前腕部皮膚温の差は見られなかったが、現場実測では有意な差がみられた。これは、ファン付き作業服を着用することによる日射遮蔽の影響が考えられる。大腿部（ $p=0.202$ ）と下腿部（ $p=0.141$ ）においては、回帰直線の差は見られなかった。

3.3 平均皮膚温と心理反応の関係

Fig.5(a)に、平均皮膚温と作業終了時の暑さ感の関係を示す。VWWの有無で回帰直線の差の検定を行ったが、有意な差は見られなかった。本現場作業での平均的な作業量は約2.2METs(1.77met)^{注3)}であり、Fangerによる快適時の平均皮膚温は約32.8℃と推定される。本実測結果を外挿すると、約31.8℃で暑さ感0を示しており、約1℃低い値を示した。また、平均皮膚温が概ね35.4℃で「非常に暑い」を申告することが予想された。

Fig.5(b)に、作業終了時の暑さ感と快適感の関係を示している。暑さ感は「非常に暑い」を申告していても、快適感は「やや不快」～「不快」程度であることがわかる。VWWの有無で、回帰直線の差の検定を行った結果、二直線は平行で、VWWなしの方は不快感が有意に0.35高いことが示された（ $p<0.05$ ）。VWWがあることに

Fig.3 Thermal environment at construction site

より同じ暑さ感でも不快感はやや軽減されることが明らかとなった。

Fig.5(c)は、平均皮膚温と作業終了時の口渇感の関係を表している。概ね平均皮膚温が上昇するほど、口渇感も上昇する傾向が見える。

VWWの有無で、回帰直線の差の検定を行った結果、切片に有意な差はなく、同一直線で表せることが明らかとなった。

3.4 作業時間帯とVWWが生理量に及ぼす影響

Fig.6に、VWWと作業時間帯を独立変数とし、飲水密度、蒸発密度を従属変数とした二要因の分散分析を行った結果を示す。

(a)飲水密度では、VWWと作業時間帯で有意な差は見られなかったが、各時間帯でVWWありはVWWなしより若干小さく、時間帯ではPM2の飲水密度 $132\text{g}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ が、概ね $100\text{g}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ の他の時間帯より大きい傾向が認められた。休憩時間を除いた作業時間中の飲水量は、一人平均約 $1,300\text{g}/\text{day}$ であった。

(b)蒸発密度では、作業時間帯とVWWの交互作用はなく、作業時間帯の主効果が有意であり ($F(1, 3)=5.910, p<.01$)、VWWには主効果は認められなかった。そのため、作業時間帯に関してTukeyのHSD法(5%水準)による多重比較を行った結果、AM1 ($256.8\text{g}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$)とPM2 ($315.2\text{g}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$)、AM2 ($242.5\text{g}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$)とPM2の間に有意な差が認められた。

Fig.7に、VWWと作業時間帯を独立変数とし、舌下温、平均皮膚温、心拍数、活動量を従属変数とした、二要因の分散分析を行った結果を示す。

(a)舌下温では、作業時間帯とVWWの交互作用はなく、作業時間帯の主効果が有意であり ($F(1, 3)=2.837, p<.05$)、VWWには主効果は認められなかった。そのため、作業時間帯に関してTukeyのHSD法(5%水準)による多重比較を行った結果、AM1とPM1の間に有意な差が認められた。PM1 (36.64°C)の舌下温は、AM1 (36.38°C)より有意に高値を示した。有意差は認められなかったが、PM2 (36.61°C)もPM1と同等に高かった。

(b)平均皮膚温では、作業時間帯とVWWの交互作用はなく、時間帯の主効果が有意であり ($F(1, 3)=3.899, p<.05$)、VWWにも主効果が認められた ($F(1, 1)=11.977, p<.001$)。TukeyのHSD法(5%水準)による多重比較を行った結果、AM1 (33.30°C)の平均皮膚温は、PM1 (34.05°C)、PM2 (33.91°C)より有意に低値を示した。また、VWWあり (33.47°C)は、VWWなし (34.05°C)より有意に低値を示した。

(c)心拍数では、作業時間帯とVWWの交互作用はなく、VWWには主効果が認められた ($F(1, 1)=10.135, p<.01$)。VWWあり (92.8bpm)は、VWWなし (101.6bpm)より有意に低値を示した。有意差は認められなかったが、PM1 (99.9bpm)、PM2 (99.7bpm)の心拍は、AM1 (93.5bpm)、AM2 (96.4bpm)より高い傾向にあった。

(d)活動量では、作業時間帯、VWWとも有意な差は見られなかったが、PM2の平均 2.34Mets は他の時間帯に比べて5%程度高かった。一日の目標の作業量を完了するために、活動量が増えたと推定される。鉄筋工、型枠大工の作業時間中の平均活動量は、それぞれ 2.19Mets 、 2.36Mets で、人工気候室の模擬作業のそれぞれ 2.08Mets 、 2.00Mets と比較すると高かった。また型枠大工の方が鉄筋工より活動量が多かった理由として、型枠大工の作業場所が6階で、主に地上での作業が多かった鉄筋工より、歩行が多かったことが挙げられる。

Fig.4 Mean and local skin temperatures

4. 考察

4.1 蒸発密度と裸体時体重減少密度の回帰式

現場での体重減少密度を推定するために、文献7の人工気候室実

(a) Mean skin temperature vs. thermal sensation

(b) Thermal sensation vs. comfort sensation

(c) Mean skin temperature vs. Thirsty sensation

Fig.5 Relation between physiological and psychological responses

験で得られた蒸発密度（文献 7 では着衣体重減少量）と裸体時体重減少密度（文献 7 では裸体体重減少量）の関係を、VWW の有無で直線近似した結果を示す（Fig.8）。蒸発密度と裸体時体重減少密度の相関は高く、体重減少密度はそれぞれの回帰式を用いて、蒸発密度から概ね求まると想定した。VWW なしに比べて、VWW ありのデータはバラツキが小さく、近似直線の傾きが小さい。同じ裸体時体重減少密度でも、VWW ありの蒸発密度は大きいことがわかる。

4.2 現場の裸体時体重減少密度における時間帯、VWW の影響

4.1 の回帰式を用いて、式(3)により求めた現場での蒸発密度から、裸体時体重減少密度を推定した。

Fig.9 に、VWW と時間帯を独立変数、裸体時体重減少密度を従属変数とした二要因の分散分析を行った結果を示す。時間帯と VWW の交互作用はないが、時間帯の主効果が有意であり（ $F(1, 3)=5.977$, $p<.001$ ）、VWW にも主効果が認められた（ $F(1, 1)=35.852$, $p<.001$ ）。Tukey の HSD 法(5%水準)による多重比較を行った結果、AM1 と PM2、AM2 と PM2 の間に 5%水準で有意な差が認められた。PM2（ $435.0\text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ ）の体重減少密度は、AM1（ $355.5\text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ ）、AM2（ $347.6\text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ ）より有意に高値を示した。VWW あり（ $332.0\text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ ）は、VWW なし（ $445.6\text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ ）より有意に低値を示した。

4.3 現場の気温と裸体時体重減少密度、蒸発密度の関係、裸体時

(a) Mean rate of water intake at each working schedule

(b) Mean evaporative rate at each working schedule

Fig.6 Comparisons of mean rate of water intake, and evaporative rate with and without VWW between schedules

重減少密度と飲水密度の関係における VWW の効果

Fig.10 に、気温と裸体時体重減少密度、気温と蒸発密度、体重減少密度と飲水密度の関係を VWW の有無でプロットした結果を示す。

(a) 気温と体重減少密度の関係では、同じ気温で、VWW ありの体重減少密度は、VWW なしより概ね低い値に分布しており、VWW の効果が確認できた。発汗量の増大は皮膚温と深部体温の影響で決まるので、平均皮膚温を VWW が下げている分、裸体時体重減少密度が少なくなったと推定される。

(b) 気温と蒸発密度の関係では、(a) と異なり同じ気温の蒸発密度の VWW の有無で混在して分布しており、人工気候室実験結果 と同様に、蒸発密度には VWW の効果は認められなかった。

(c) 体重減少密度と飲水密度の関係では、VWW なしは、体重減少密度に対する飲水密度の割合が、VWW ありに比べて小さい $1/2 \sim 1/3$ の領域に分布しており、VWW なしは、VWW ありに比べて脱水症状を起こしやすいと想定できる。また、一作業時間帯の飲水密度は平均 $110\text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ 程度で、平均的な体表面積 1.8m^2 では、約 $200\text{g}/\text{h}$ 摂取しているのに対し、VWW なしでの体重減少密度は平均 $445.6\text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ で、その 4 倍の約 $800\text{g}/\text{h}$ の水分を損失している。休憩時間の飲水で、作業時間中に失った水分量の補填が重要になる。

気温 34°C の人工気候室の実験では、VWW により、着衣残留汗量と心拍数が有意に低値を示す一方、裸体体重減少量と着衣体重減少量には VWW の有無で有意な差がなかった。それに対し今回の現場実測では、 $24 \sim 35^\circ\text{C}$ の気温の範囲で、着衣残留汗量が含まれた裸体時体重減少量（Fig.9）と心拍数（Fig.7(c)）が VWW ありで有意に低くなるのに対し、蒸発密度（Fig.6(b)）には VWW の効果が顕著に認められず、人工気候室の実験と同様な結果が得られた。

本実測結果より、VWW が平均皮膚温の上昇を抑制した結果、発汗量が抑制され脱水を予防する可能性が示唆された。しかし、午後の作業時間、特に夕方に近い最終の PM2 の裸体時体重減少密度（Fig.9）は、午前の AM1、AM2 に比べて有意に高く、脱水状態に

(a) Mean sublingual temperature at each working schedule

(b) Averaged mean skin temperature at each working schedule

(c) Mean heart rate at each working schedule

(d) Mean activity at each working schedule

Fig.7 Comparisons of mean sublingual, skin temperatures, heart rates measured at chest and mean activity with and without VVW between schedules

なりやすいと想定される。その影響で心拍数も PM2 は AM1 より 6bpm 程度高くなっていると、文献 7 のバスマodelからも推定できる。この要因として、Fig.7 に示したように平均皮膚温では PM1 が 0.7°C、PM2 が 0.6°C、それぞれ AM1 に比べて高く ($F(1,3)=3.899$, $p<0.05$)、舌下温でも、PM1 と PM2 が、AM1 に比べて 0.3°C 程度高くなっていることが挙げられる ($F(1, 3)=2.837$, $p<0.05$)。これには、午後に気温が高く、風速が弱まる傾向 (Fig.1) や、PM2 で作業量がやや高め (Fig.3(d)) になることが寄与していると推定され、今後は現状の一日を通じてほぼ一定な活動量を、午後の PM2 で小さくしていく等の対策が必要と考えられる。

Fig.8 Relation between evaporative rate and rate of body weight loss with and without VVW measured in artificial climate chamber at two fixed temperatures (29, 34°C) .

Fig.9 Comparisons of mean rate of body weight loss with and without VVW between schedules

5. まとめ

本研究では、実際の建設現場において VVW や作業時間帯が皮膚温や体重減少量等に及ぼす影響を検証することを目的として現場実測を行った。実測期間 5 日間のうち、8 月 3, 4 日は気温が 30°C 以下、5, 7, 8 日は気温が 30°C を超える環境であった。

気温と皮膚温の関係について、回帰直線の差の検定を行った。平均皮膚温、胸部温、前腕温は、VVW ありよりも VVW なしの皮膚温の方が有意に高くなった。既報の諸条件が統制された人工気候室の 34°C の環境でも、平均皮膚温、胸部温については、VVW ありが VVW なしより有意に低かったが、前腕温は、VVW なしと VVW ありで有意差が見られなかった。これは、現場での VVW を着用することによる日射遮蔽の影響に起因すると考えられた。

一方、平均皮膚温と暑さ感の関係は、検定の結果、VVW の有無で有意差は見られなかった。暑さ感と快適感の関係では、有意な差が見られ、VVW があることにより同じ暑さ感でも不快感はやや軽減されることが明らかとなった。

気温と蒸発密度の関係では、蒸発密度には VVW の効果は認められなかった一方、気温と裸体時体重減少密度の関係では、同じ気温でも、VVW ありの体重減少密度は、VVW なしより概ね低い値に分布しており、VVW の効果が確認できた。以上のように、皮膚温、蒸発密度・体重減少量等の発汗量についての諸条件を統制して得られた人工気候室での実験結果は、現場の実測によりほぼ妥当性が検証され、現場でも適用できると考えられた。しかし、上記パラメータにおける VVW の効果は、現場では 24°C~35°C のほぼ全体の気温の範囲で認められたのに対し、人工気候室での実験では気温 34°C でしか認められなかった。この要因としては、実際の現場の作業員の活動量が、模擬作業の実験室の活動量より高めで、かつ作業員が、

(a) Relation between air temperature and rate of body weight loss

(b) Relation between air temperature and evaporative rate

(c) Relation between body weight loss and rate of water intake

Fig.10 Verifications on effect of VWW on rate of body weight loss, evaporative rate and rate of water intake.

人工気候室と異なり、温度が上昇した地物面と日射を含めた熱放射の影響を受けていたことが原因と推察される。

午後の作業時間、特に夕方に近い最終の PM2 の裸体時体重減少密度は、午前と比べて有意に高く、脱水状態になりやすいと推定され、その影響で心拍数も午後は AM1 より高くなっている。また、平均皮膚温や舌下温も午後も、AM1 に比べて高くなっている。これは、午後に温熱環境が悪化することや、PM2 でやや高めの作業量になっていることが寄与していると推定され、現状の一日を通じてほぼ一定な活動量を、午後の PM2 で小さくしていく等の対策が必要と考えられる。

謝辞

実験にご協力頂きました被験者の皆様、現場実測にご協力頂きました株式会社竹中工務店東京本店作業所の皆様と株式会社竹中工務店技術研究所の北村岳氏、現場実測とデータの解析にご協力頂きました大前裕紀氏（研究当時北海道大学大学院工学院修士課程）、金内遥一朗氏（北海道大学大学院工学院修士課程）、小林明生氏（研究当時岩手大学理工学部生）に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Nishihara, N., Tanabe, S., Hayama, H., Komatsu, M.: A Cooling Vest for Working Comfortably in a Moderately Hot Environment. *Journal of PHYSIOLOGICAL ANTHROPOLOGY and Applied Human Science*, Vol. 21, No. 1, pp. 75–82, 2002. 1
- 2) Gao, C., Kuklane, K., Holmér, I.: Cooling vests with phase change material packs: the effects of temperature gradient, mass and covering area. *Ergonomics*, Vol. 53, No. 5, pp. 716–723, 2010. 5
- 3) Zhao, M., Gao, C., Wang, F., Kuklane, K., Holmér, I., Li, J.: A study on local cooling of garments with ventilation fans and openings placed at different torso sites. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 43, No. 3, pp. 232–237, 2013. 5
- 4) Miura, K., Takagi, K., Ikematsu, K.: Evaluation of two cooling devices for construction workers by a thermal manikin. *Fashion and Textiles*, Vol. 4, Issue. 1, 23, 2017. 11
- 5) Chan, A.P.C., Zhang, Y., Wong, F.F.K., Chan, D.W.M., A field study of the effectiveness and practicality of a novel hybrid personal cooling vest worn during rest in Hong Kong construction industry. *Journal of Thermal Biology*, Vol. 70, Part A, pp. 21–27, 2017. 12
- 6) Yamazaki, K., Suga, S., Takahashi, N., Kuwabara, K., Kobayashi, K.: The Psychological and Physiological Effects of Air-conditioned Wear and Other Functions on Construction Workers, No.1 Actual Investigation at Active Construction Site. *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol. 83, No. 747, pp. 453–463, 2018. 5 (in Japanese)
山崎慶太, 菅重夫, 高橋直, 栗原浩平, 小林宏一郎: ファン付き作業服が建設作業員の生理・心理反応に及ぼす影響と他の要因に関する研究, 建設現場における実態調査その1, 日本建築学会環境系論文集, 第83巻, 第747号, pp. 453–463, 2018. 5
- 7) Yamazaki, K., Suga, S., Kuwabara, K., Hamada, Y., Syu, S., Nakano, R., Kobayashi, K. and Takahashi, N., Effect of Simulated Work in Artificial Climate Chamber on Physiological and Psychological Responses of Construction Workers with Air-Conditioned Wear, *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol. 83, No. 748, pp. 543–553, 2018. 6 (in Japanese)
山崎慶太, 菅重夫, 栗原浩平, 濱田靖弘, 朱楚奇, 中野良亮, 小林宏一郎, 高橋直, 人工気候室での模擬作業がファン付き作業服を着用した建設作業員の生理・心理反応に及ぼす影響, 日本建築学会環境系論文集, 第83巻, 第748号, pp. 543–553, 2018. 6
- 8) Kuwabara, K., Kubota, H., Hamada, Y. et al., Prediction of Mean Skin Temperature in Hot Outdoor Environment considering Sweat Efficiency and Wet Clothing, Vol. 34, No. 144, pp. 1–10, 2009. 3 (in Japanese)
栗原浩平, 窪田英樹, 濱田靖弘, 中村真人, 中谷則天, 雨宮智史, 長野克則, 無効発汗・着衣のぬれを考慮した屋外環境における平均皮膚表面温度の予測, 空気調和・衛生工学会論文集, Vol. 34, No. 144, pp. 1–10, 2009. 3
- 9) Nadel, E.R., Bullard, R.W., Stolwijk, J.A.J., Importance of skin temperature in the regulation of sweating. *Journal of Applied Physiology*, Vol. 31, No. 1, pp. 80–87, 1971. 7

注

- 注1) 作業中の便所利用は記録しているが、尿量は測定していない。作業中のタオル使用も許可したが、タオルに含まれた汗量は測定していない。休憩中の飲水や食事に制限は設けず、作業員は主に 30℃以下に空調された休憩室で休憩・昼食を取り、一部は屋外で休憩していた。
- 注2) 実験時は、1 を非常に暑い、7 を非常に寒い等としていたが、本報では Table5 のように数値を-3～+3 に置き換えて示すこととした。
- 注3) 単位の METs は安静時の酸素摂取量 $V_{O_2}=3.5[\text{mL/kg/min}]$ を 1METs として、現在の作業が何倍に当たるかを表したものであるのに対し、単位 met は人体と環境との間の熱平衡式で用いられる椅座安静時の代謝量 $[58.15\text{W/m}^2]$ を 1met として、現在の作業が何倍に当たるかを表したものである。met の計算には V_{O_2} と呼吸商 R 、体表面積 A_{Du} が必要であるため、本報では $A_{Du}=1.8\text{m}^2$ (身長 1.7m, 体重 70kg), $R=0.92$ と仮定した場合の代謝量[met]を表している。

EFFECT OF VENTILATED WORK WEAR AND WORKING SCHEDULE ON PHYSIOLOGICAL AND PSYCHOLOGICAL RESPONSES OF CONSTRUCTION WORKERS

No.2 Actual investigation at active construction sites

*Kouhei KUWABARA^{*1}, Keita YAMAZAKI^{*2}, Shigeo SUGA^{*3},
Koichiro KOBAYASHI^{*4}, Yasuhiro HAMADA^{*5} and Nao TAKAHASHI^{*6}*

^{*1} Assoc. Prof., Dept. of Creative Engineering, National Institute of Technology, Kushiro College, Dr.Eng.

^{*2} Assist. to General Manager, Takenaka Research & Development Institute, Dr.Eng. / Visiting Prof. of Iwate University

^{*3} Takenaka Corporation, Head Office, Tokyo, Safety and Environment Dept.

^{*4} Prof., Dept. of Systems Innovation Engineering, Iwate University, Dr.Eng.

^{*5} Prof., Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ., Dr.Eng.

^{*6} Chimura Nature Club, Ph.D. in Sociology

To verify the effects of wearing ventilated work wear (VWW) on the physiological and psychological responses of construction workers (CWs), measurements were carried out on workers at an eight-story building in an RC construction in Tokyo from August 3–8, 2017. Air temperature, relative humidity, air velocity, and black and white globe temperatures were measured on the ground floor, while air temperature, relative humidity, air velocity, and solar radiation were measured on sixth floor. The heights of the thermo-hygrometer, anemometer, and globe thermometer were about 1.5, 2.0, and 1.0m off the ground, respectively. The study participants were four male form workers and three male rebar placers ranging in age from their 20s to 60s. Their work is basically carried out from 08:00 to 17:00 and is divided into four shifts split up by breaks as follows: AM1: 8:00 to 10:00; AM2: 10:30 to 12:00; PM1: 13:00 to 15:00; and PM2: 15:30 to 17:00. The heart rate (HR) and skin temperatures for the chest, forearm, thigh, and lower leg were continuously measured, and sublingual temperature, body weight, water intake, and psychological responses, such as hotness, comfort, and thirst, were measured before and after each working hour. We defined the evaporation rate (ER) as the sum of the difference in body weight while fully clothed between before and after work and the amount of water intake (WI) per unit time and body surface area. The rate of body weight loss (BWL), defined as the sum of the sweat and evaporation rates by skin diffusion, at the construction site (CS) was simulated according to a regression formula between the ER and BWL obtained from an experiment involving humans in an artificial chamber (AC). We evaluated the effect of wearing/not wearing VWW and working schedule on physiological responses. Air temperature was below and above 30°C until August 4 and after August 5, respectively. The mean overall and both chest and forearm skin temperatures were significantly higher in the workers not wearing VWW compared with those who were wearing VWW. In the AC experiment, no significant differences were observed in forearm skin temperature between workers wearing/not wearing VWW. The lower forearm skin temperature observed among workers at the CS was likely the result of the VWW preventing solar radiation from being absorbed on the skin surface. The HR (101.6bpm) of workers not wearing VWW was significantly higher than that of workers wearing VWW (92.8bpm). No significant differences were observed in the ER or WI between the two groups. On the other hand, BWL (445.6g/(h·m²)) among workers not wearing VWW was significantly higher than that among workers wearing VWW (332.0g/(h·m²)). In addition, wearing VWW at the CS alleviated discomfort. These results suggest that VWW helps prevent dehydration during work because the lower mean skin temperatures resulting from wearing VWW suppress BWL. The mean skin temperatures in the PM1 (34.05°C) and PM2 (33.91°C) were significantly higher than those in the AM1 (33.30°C). The HR of the PM workers was slightly higher than that of the AM workers; however, this difference was not significant. The activity level (2.34METs) in the PM2 was about 5% higher than that in the AM and PM1. The ER (315.2g/(h·m²)) in the PM2 was significantly higher than that in the AM1 (256.8g/(h·m²)) and AM2 (242.5g/(h·m²)). In addition, BWL in the PM2 (435.0g/(h·m²)) was significantly higher than that in the AM1 (355.5g/(h·m²)) and AM2 (347.6g/(h·m²)). Since the thermal environment deteriorates and activity levels slightly increase in the afternoon, CWs in the PM2 may be at a higher risk of dehydration; therefore, to help prevent dehydration, CWs in the PM2 should have a reduced workload.

(2018年7月8日原稿受理, 2018年11月5日採用決定)