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

EFFECT OF SIMULATED WORK IN ARTIFICIAL CLIMATE CHAMBER ON PHYSIOLOGICAL AND PSYCHOLOGICAL RESPONSES OF CONSTRUCTION WORKERS WITH AIR-CONDITIONED WEAR

山崎 慶太^{*1}, 菅 重夫^{*2}, 榎原 浩平^{*3}, 濱田 靖弘^{*4},
朱 楚奇^{*5}, 中野 良亮^{*6}, 小林 宏一郎^{*7}, 高橋 直^{*8}
Keita YAMAZAKI, Shigeo SUGA, Kouhei KUWABARA, Yasuhiro HAMADA,
Soki SYU, Ryosuke NAKANO, Koichiro KOBAYASHI and Nao TAKAHASHI

To extract the effects of air-conditioned wear (ACW), we carried out experiments to measure the physiological and psychological responses of workers performing simulated construction work in an artificial climate chamber at controlled room temperatures of 29°C and 34°C. The workers wore ACW or not. The effects of wearing ACW on skin temperature, sublingual temperatures, sweat rate and heart rate were significant only at 34°C. We propose that the heart rate varies due to sweat content of clothing reflecting dehydration which varies significantly depending on environmental temperature and whether or not the worker is wearing ACW.

Keywords : *Air-conditioned wear, Construction worker, Sweat content of clothing, Heart rate variability, Physiological response, Activity, Heatstroke,*

ファン付き作業服, 建設作業員, 着衣残留汗量, 心拍変動解析, 活動量, 熱中症

1. はじめに

過去 5 年間 (2012~2016 年) の業種別熱中症による死傷者数をみると、建設業が最も多く、次いで 製造業で発生しており、全体の約 5 割がこれらの業種で発生している。2016 年の建設業の死傷者数は 113 人で、2014 年の 113 人と同数、2013 年の 144 人からは 21%減となったが、業種別で一位、全体の 462 人の約 1/4 を占める¹⁾。そこで、近年建設現場では、熱中症予防や作業員の労働環境改善のために、ファン付き作業服 (Air-Conditioned wear、以降 ACW と称す) を導入する事例が増えてきた²⁾。

ACW については、鈴木ら³⁾が農作業のフィールドで、夏季暑熱環境下における 1 時間の農作業において、ACW あり・なしの 10 人の被験者 (男子学生) の生理・心理反応を評価、比較した例と、時澤⁴⁾が人工環境室 (34°C, 50%) 内で、被験者 8 名について、1 日ずつファン稼働あり、稼働なしで、30 分歩行、歩行後 10 分座位安静、安静後 30 分歩行、歩行後 10 分座位安静を試行し、生理的・心理的評価を検証した例がある。一方建設工事現場の作業員については、

小林らは地下におけるケーソンやシールド工事にかかわる施工現場において、気温・湿度、騒音、粉じん量の作業環境と、作業員の作業に伴う生体負担の指標として心拍・血圧、疲労自覚症状・疲労身体部位を調査し、温熱環境と作業に伴う生体負担を調査した例がある⁴⁾。しかしながら、実際に建設作業に従事する地下工事以外の作業員を対象として、熱環境と同時に、作業員の生理的指標、暑さ感・快適感の心理的指標を同時に測定し、ACW の効果の評価と時間帯など他の要因が疲労に及ぼす影響を調査した例は見当たらない。

そこでわれわれは、2016 年の 7 月屋内工事において内装工・配管工、8 月屋外工事において型枠大工・鉄筋工、実際の夏季暑熱下の建設現場におけるそれぞれの作業員の「作業中の快適さや暑さの心理的指標と、皮膚温・鼓膜温度・心拍や作業員の活動量などの生理的指標」に、ACW と作業時間帯などの他の要因がどのような影響を及ぼしているかを測定、評価した⁵⁾ (ただし、心拍は作業終了時 (休憩開始時) と作業開始時 (休憩終了時) のみ作業員自身で測定)。その結果、心理的指標の「快適感」、「暑さ感」には、4 職種で

^{*1} ㈱竹中工務店技術研究所 主任研究員・博士(工学)
岩手大学理工学部 客員教授
^{*2} ㈱竹中工務店東京本店 安全環境部 グループリーダー
^{*3} 釧路工業高等専門学校 創造工学科 准教授・博士(工学)
^{*4} 北海道大学大学院工学研究院 空間性能システム専攻
教授・博士(工学)
^{*5} 北海道大学工学部 空間性能システム専攻 大学院生
^{*6} 北海道大学工学部 大学院生
^{*7} 岩手大学理工学部 教授・博士(工学)
^{*8} 千村ネイチャー倶楽部 監事・博士(社会学)

Chief Researcher, Takenaka Research & Development Institute, Dr.Eng.
Visiting Prof. of Iwate University
Takenaka Corporation, Head Office, Tokyo, Safety and Environment Dept.
Assoc. Prof., NIT, Kushiro College, Dr.Eng.
Prof., Faculty of Engineering, Hokkaido University, Dr.Eng.

Grad. Student, Faculty of Engineering, Hokkaido University
Student, Faculty of Engineering, Hokkaido University
Prof., Dept. of Systems Innovation Eng., Iwate Univ., Dr.Eng.
Chimura Nature Club, Ph.D. in Sociology

ACW の効果が認められたのに対し（大工の暑さ感を除く）、生理的指標では、ACW の効果が認められたのが、屋外工事では鉄筋工で3パラメータ、屋内工事では内装工で1パラメータのみだった。これは、屋外工事では、風速を除いた気温、湿度、MRT の温熱環境の4日間の日毎・時間毎の変動と、職種毎、個人毎に歩行を含めた活動量の差が大きかったためと考えられた。内装工・配管工についても、各2日間での温熱環境の変動に加えて、平均気温が30℃以下で低くACW なしでも生理的指標に顕著に影響しない、あるいは同一人物の実測期間がACW あり・なしの2日間のみで気温の影響を除去できなかった、ACW 着衣時のACW 以外の服装およびACW 非着衣時の服装と、飲水量が個人で条件が異なるのに考慮されなかったことが要因として考えられた。

その一方、入来らは、定常（着席）状態における4名の大学生被験者を対象として、熱的快適性に関して評価を行った。その結果、作用温度22℃では26℃の時と比較して皮膚温が有意に低下しかつ冷感が有意に増大し、内2名の心電図R-R間隔変動係数（ CV_{R-R} ）に有意な増加が見られたことを報告し、心拍変動解析法が、温度快適性の研究に有用な方法であることを示した⁹⁾。また、本田らは、心拍変動の解析から得られる自律神経活動の交感神経と副交感神経の活動の変化から、地下街歩行時の生体負担の測定を試みた。その結果、階段の利用や交差点での進路確認で時々刻々変化する動的な生体負担の変化を測定できたとしている⁷⁾。そこで、作業中の作業員の心拍を測定し、心拍変動解析を用いた自律神経活動の交感神経と副交感神経の活動の変化と、申告による心理的指標調査を並行して実施すれば、定常状態でなく動的な作業中・作業後の作業員の生理的な熱的快適性をより定量的・詳細に評価できると考えた。

そこで、本論文は、人工気候室を用いて現場を想定した気温下、職種毎に模擬作業を設定した活動量で、しかも各被験者の活動時間を含めた実験パターン（気温（2パターン）×ACW（2パターン）=4パターン）を統一することによって気温と活動量の条件を統制し、さらにACW 着衣時のACW 以外の服装およびACW 非着衣時の服装を統一して服装の条件を統制し、被験者毎に飲水量と飲水時間を記録することによって、現場では抽出できなかったACW の効果と、気温・職種（鉄筋工・型枠大工）など建設作業員の生理・心理反応に及ぼす他の要因の影響を、定量的かつ明確に把握することを目的としている。

統制された実験室の条件の下で、測定する生理的指標としては、現場で実施した皮膚温・深部体温（鼓膜温度）・活動量・心拍（休憩時間の開始・終了時のみ）に加えて、作業中の心拍を連続測定し、その心拍変動（R-R間隔）の解析結果から得られる自律神経活動、交感神経指標、副交感神経指標を解析するとともに、ACW あり・なしで部位皮膚温を比較し、ACW の温度の制御特性も評価した。その一方、より熱中症の脱水症状を反映し、かつ蒸発による熱放散で重要なパラメータと考えられる裸体体重と着衣時体重を測定し、着衣残留汗量を求め、同時に被験者に暑さ感・快適感の心理的指標を申告させた。

解析法としては、測定された各生理的指標、心理的指標の結果を従属変数として、ACW、気温、職種の影響を対応のあるt検定、分散分析により評価し、2016年の現場の実測結果と比較する。次に、分析結果に基づき、ACW、気温などの条件と生理的指標の関係につ

Table1 Measurement equipments.

Measurement item	Measurement instruments	Makers
Temperature	Assmann ventilation psychrometer	SATO KEIRYOKI MFG.CO.LTD
Relative humidity		
Globe temperature	150mmφGlobe thermometer	SHIBATA
	Ondotori Jr.TR-52S	T&D
METs	Life recorder	A&D
Sublingual temperature	Sublingual thermometer	TERUMO CORPORATION
Skin temperature	LT-8A	Gram
	Thermoclon G type	KN LABORATORY
Electrocardiogram	Wearable heat rate sensor WHS-1	UNION TOOL CO.
Heat rate	POLAR A360	POLAR
Weight	HP-100K	A&D
Autonomic nerve	Kiritu master	CROSSWELL

(a) Reinforcing bar placer

(b) Form worker

Fig.1 Simulated works in artificial climate room.

いての有意なモデルの作成を試みる。

2. 実測方法

2.1 気温・相対湿度と活動量の統制条件

実測には北海道大学工学部フロンティア応用科学研究棟 6F の人工気候室（4.42m×2.61m×2.20mH）を利用し、気温は、2016年に実施した屋内工事、屋外工事、それぞれの平均気温29, 34℃に、湿度はそれぞれの平均湿度50%に統制した⁹⁾。気温、相対湿度、放射温度の測定には、Table1に示した機器のうち、アスマン通風乾湿計一台、グローブ温度計一台、デジタル温度計一台を用い、1分間隔で測定した。模擬作業スペースは人工気候室内3.42m×2.61mであり、アスマン通風乾湿計とグローブ温度計はそのスペース外1.00m×2.61mの高さ1.4mに設置した。デジタル温度計は長辺(4.2m)壁面中央に設置した。

29℃、50%設定時の実測期間の気温、相対湿度、グローブ温の測定結果（平均±標準偏差）は、それぞれ29.00±0.55℃、48.33±2.65%、

28.90±0.92℃で、グローブ温と気温の差は0.1℃で放射の影響は無視できる。気温、相対湿度はバラツキが小さく、平均値は、設定値とそれぞれ0.1℃、2%以内で誤差は十分小さかった。

34℃、50%設定時の実測期間の気温、相対湿度、グローブ温の測定結果（平均±標準偏差）は、それぞれ 33.81±0.22℃、49.66±2.09%、33.58±0.24℃で、グローブ温と気温の差は0.23℃で放射の影響は小さい。気温、相対湿度はバラツキが小さく、平均値は、設定値とそれぞれ0.2℃、0.4%以内で誤差は十分小さかった。

活動量は、鉄筋工（図中の表示は Reinforcing bar placer、グラフ中の略表示は RBP とする）については 0.7m×1.0m×1.0mH、ピッチ 200mm 格子の床・壁配筋を模擬したかごの組立・解体（Fig.1(a)）、型枠大工（図中の表示は Form worker、グラフ中の略表示は FW とする）については、900mm×600mm 角 1,800mmH の柱 2 本の間を、同じ高さの 1,200mmL、300mmW の壁で接続した型枠の組立・解体（ただし、内部に鉄筋なし）（Fig.1(b)）、それぞれの模擬作業で統制した。それぞれの模擬作業は、歩行を除く各職種の現場での作業と類似しており、午前 1 回（95 分）、午後 1 回（95 分）、2 名（1 名 ACW あり、1 名 ACW なし）で組立・解体が完了するように設定した。

2.2 被験者の服装条件と作業・体重測定スケジュール

被験者には実際の屋外工事の建設作業員（鉄筋工、型枠大工）を採用した。内訳は鉄筋工 6 名、型枠大工 6 名の計 12 名の男性であった。被験者二人の 1 日目、2 日目の実験スケジュールを Fig.2 に、被験者属性を Table2 に、それぞれ示す。被験者は二人一組とし、一組当たり 2 日間実験を行った。1 日目は気温 29℃、一人は ACW 着用、もう一人は長袖 T シャツのみで模擬作業を行わせた。90 分間の昼休みに支給された昼食を摂取した後、午後は ACW の有無を交代し、同様の実験を行った。2 日目は気温を 34℃にし、同様の内容で実験し、各被験者の実験パターンを統制した。一つの実験には 95 分かかり、作業開始後 40 分から 55 分の 15 分間は休憩とした。Table3 に被験者の着衣を示す。被験者には ACW の有無を問わず、長袖 T シャツ（綿 100%）、トラックス（綿 97%、ポリウレタン 3%）、靴下（綿 100%）、作業ズボン（ポリエステル 65%、綿 35%）、ヘルメットを着用させた。ACW ありの被験者はこれらに加えて ACW（ポリエステル 75%、綿 25%）を、ファンを稼働させて着用させた。文献⁹⁾の単品衣服の clo 値よりヘルメットを除く全身の clo 値を推定した結果、ACW ありが 1.0clo 程度、ACW なしが 0.6clo 程度と推察された（ただし、ACW ありはファンを稼働していない状態での推定値）。以上のように、服装の条件を統制した。安全靴と腰袋は現場で使用しているものを持参してもらった。被験者には作業前に 500mL スポーツドリンクの摂取を義務付け、作業中でも本人の希望により飲水を可能とし、飲水量を記録した。

本研究は、北海道大学工学系研究倫理審査委員会の承認（海大工

Fig.2 Timetable of simulated work and measurements.

Table2 Attribution of test subjects.

	Age	height (cm)	weight (kg)		Age	height (cm)	weight (kg)
Reinfor- -cing bar placer	41	165	70	Form worker	33	166	68
	27	171	78		19	170	60
	27	163	71		21	165	65
	29	174	68		48	169	81
	36	165	67		49	166	68
	22	181	68		23	180	66

Table3 Clothings with and without ACW

	Long sleeve shirt (co 100%)	Trunks (co 93%+ poly 7%)	Woking pants (co 35%+ poly65%)	Socks (co 100%)	Work shoes	Helmet	ACW
with ACW	○	○	○	○	○	○	○
without ACW	○	○	○	○	○	○	×

co:cotton poly:polyester

第 131 号,平成 29 年 4 月 17 日)を得て、被験者には実験前に予め「研究協力者依頼文」で特に人体の生理的反応、心理的反応についての調査内容を説明し承諾を得た後、身長・体重・年齢を記入させた。

2.3 生理的指標

Table1 に、測定に用いた使用機器一覧を示す。皮膚温は LT-8A (Gram)で足背、下腿前、大腿前、腹部、背部、手背、前腕、前額を、サーモクロン G (KN ラボラトリー)で下腿前、大腿内、胸部、背部、首筋、前額、腕間接部を 10 秒間隔で測定した。心拍は胸部に取り付けたベルト電極の心電計（心拍 (My-beat) と称す)と、右手首にとりつけたウェアラブル端末（心拍 (POLAR) と称す)で測定し、左手首にはライフレコーダをとりつけ活動量を測定した。全て、1 分間隔で記録した。

平均皮膚温は、サーモクロン G での測定値より Burton の 3 部位⁹⁾に背部温を追加した式(1)を用いて計算した。

$$\begin{aligned} \text{平均皮膚温} &= 0.25 \times (\text{胸部温}) + 0.25 \times (\text{背部温}) \\ &+ 0.14 \times (\text{前腕温}) + 0.36 \times (\text{下腿前温}) \end{aligned} \quad (1)$$

舌下温は、①午前 0 分～20 分、②午前 20 分～40 分、③午前 55 分～75 分、④午前 75 分～95 分、⑤午後 0 分～20 分、⑥午後 20 分～40 分、⑦午後 55 分～75 分、⑧午後 75 分～95 分の作業開始時・終了時、合計 12 回測定し、その都度記録した。Fig.2 に示すように、模擬作業は午前、午後各 4 回、合計 8 回となる。ただし、一日の所定の模擬作業が早めに終了した場合は、午前の④の時間帯と午後の⑧の時間帯を短縮した。皮膚温、心拍 (My-beat)、心拍 (POLAR) の同じく 8 回の測定結果は、模擬作業終了前 10 分間の平均値とした。活動量 METs と動作の X 軸加速度、Y 軸加速度、Z 軸加速度⁵⁾は、それぞれの模擬作業の間の平均値として求めた。ここで、ライフレコーダの軸は、腕時計の 0 時方向が X 軸、9 時方向が Y 軸、文字盤面の鉛直方向が Z 軸である。ライフレコーダは、左腕に装着しており、X 軸に関する作業は前腕が地面と平行かつ掌が地面と垂直方向、Y 軸の作業は前腕と掌が地面と垂直方向、Z 軸の作業は前腕と掌が地面と平行である。裸体体重と衣服重量は実験開始と終了後、午前・午後 1 回ずつ測定した。裸体体重減少量は実験前後の裸体時の体重差から求め、着衣体重減少量は衣服を着た状態での実験前後の体重差から求めた。本研究では、裸体体重減少量と着衣体重減少量の差を「着衣残留汗量」とし、体温調節に寄与しない汗量として定義した。

2.4 心理的指標

主観申告における「快適感」は 7 段階 [1:非常に不快]-[2:不快]-[3:やや不快]-[4:快でも不快でもない] -[5:やや快適]-[6:快適]-[7:非常に快適]、「暑さ感」は 7 段階[1:非常に暑い]- [2:暑い]-[3:やや暑い]-[4:寒くも暑くもない]-[5:やや寒い]-[6:寒い]-[7:非常に寒い]と設定した。主観申告は、舌下温測定と同時に合計 12 回、被験者に申告させたが、本報では各模擬作業終了時の合計 8 回のみを対象として解析に用いた。

2.5 ファン付作業服の仕様と利用方法

本実験で用いた ACW は、作業服背面腰部の左右にファンが一つずつ取り付けられており、それにより作業着内へ外気を送り込む仕組みとなっている。送り込まれた空気は作業着体内を通過し、袖口や首元から抜けていく。風量は 4 段階で調節できるが、実験では最大風量 30L/s を使用した。

3. 解析方法

3.1 統計解析

ACW (あり・なし) と職種 (鉄筋工・型枠大工)、気温 (29, 34℃) を独立変数、測定した各生理的指標 (着衣体重減少量・裸体体重減少量・着衣残留汗量・皮膚温・舌下温・心拍 (POLAR)・心拍 (My-beat)・活動量、各軸加速度) と各心理的指標 (暑さ感・快適感) を従属変数とし、二要因の分散分析、または 29, 34℃の気温別に ACW あり・なしについて t 検定の分析を行い、平均値の差を検定した。図中の***、**、*はそれぞれ、0.1%以下、1%以下、5%以下の有意水準を示す。

分析にあたり、4.2 平均皮膚温、舌下温、活動量、4.4 自律神経反

応については午前 4 回 (①～④)・午後 4 回 (⑤～⑧) を分析対象としたため、本来、鉄筋工、型枠大工ともそれぞれ、(8 回×2 人)×6 日=96 名であったが、測定で不具合が生じた鉄筋工で 13 回、型枠大工で 8 回を除いたため、有効な分析対象者は鉄筋工 85 名、型枠大工 88 名となった。4.3 水分量、心拍については午前 1 回・午後 1 回を分析対象としたため、本来、鉄筋工、型枠大工ともそれぞれ、(2 回×2 人)×6 日=24 名であったが、測定で不具合が生じた鉄筋工で 2 回、型枠大工で 5 回を除いたため、有効な分析対象者は、鉄筋工 22 名、型枠大工 19 名となった。さらに、分析結果に基づき、ACW、気温を独立変数、各生理的指標を従属変数とするパス解析を行い、有意なモデルの検討を行った。分析の際には、モデルの適合度は、GFI、AGFI、NFI、RMSEA で確認した¹⁰⁾。

3.2 心電変動の解析

ベルト電極の心電計 (心電計 (My-beat)) で計測した心電波形を、自律神経活動の指標となる LF の 0.04Hz (25 秒周期) を解析するのに十分な 30 秒を時系列データの長さとし、窓関数が不要な MEM 法 (最大エントロピー法) による周波数解析と時間領域解析を行った。心拍間隔の変動率が一定の範囲を超えたものは、不整脈やノイズの疑いとして除去した。そして、心拍 (HR)、自律神経活動 (CVRR)、交感神経指標 (LF/HF)、副交感神経指標 (ccvHF) をそれぞれ算出した¹¹⁾。

CVRR とは、自律神経活動全体の大きさを表し、(R-R 間隔の標準偏差/R-R 間隔の平均値)×100 で導き出せる。また、LF/HF は交感神経指標で LF (低周波) と HF (高周波) のパワーの比率を表している。ccvHF は副交感神経指標で (√HF/R-R 間隔の平均値)×100 で導き出せる。

Fig.3 Fluctuations of mean temperature of part on the body.

4. 実験結果

4.1 部位毎の皮膚温におけるファン付き作業服の効果

皮膚温の1分毎の連続データを用いて、ACWの効果を選定部位（背部、腹部、前腕部）で比較する。

Fig.3 (a)に29℃、(b)に34℃における部位毎の皮膚温の、全員の平均値（1分間隔）の経時変化を示す。(a)29℃では、前腕部Cと腹部AにはACWの有無による顕著な差は認められないのに対し、ACWなしの背部Fは、ACWありの背部Eより、作業開始後45分間は約1℃低くなっている。(b)34℃では、腹部と背部で約1℃、ACWありがACWなしより低く、前腕部は55分以降低下している。

さらに、気温別にACWの効果を検証するために、測定部位（背部、腹部、前腕部）毎の皮膚温についてt検定を行った。Fig.4に、(a)腹部、(b)背部、(c)前腕部の皮膚温のそれぞれの結果を示す。さらに、(d)に、(i)背部、(ii)腹部の、29℃と34℃それぞれにおけるACW有無の差についてのt検定の結果を示す。Fig.4 (a)では、29℃ ($t(934)=9.852, p<.001$) と34℃ ($t(932)=35.51, p<.001$) の背部の皮膚温について、ACW「あり」は「なし」より有意に低かった。Fig.4 (b)では、29℃ ($t(934)=7.766, p<.001$) と34℃ ($t(932)=16.281, p<.001$) の腹部の皮膚温について、ACW「あり」は「なし」より有意に低かった。Fig.4 (c)では、29℃ ($t(934)=7.208, p<.001$) の前腕部の皮膚温について、ACW「あり」は「なし」より有意に高かったが、34℃ではACW有無の差は有意でなかった。またFig.4 (d)では、ACWを着ることによる皮膚温の低下量が29℃時よりも34℃時の方が、(i)背部で0.63℃ ($t(932)=12.81, p<.001$)、(ii)腹部で0.12℃ ($t(932)=2.879, p<.01$)、それぞれ有意に大きくなった。これは、ACW「なし」の背部Fが(a)29℃では作業開始40分以降低下し、55分でACW「なし」のE (Fig.3(a)) と同等になってしまうのに対し、(b)34℃では作業終了時近くまでほぼ35℃を保ち、ACWありとは1℃程度の差を維持し続けたためである (Fig.3(b))。

Fig.5に、34℃での(a)背部。(b)腹部の鉄筋工と大工におけるACW有無の差についてのt検定の結果を示す。ACWを着ることによる皮膚温の低下量は、腹部では、29℃の型枠大工で0.51℃、鉄筋工で-0.67℃となり（図省略）、型枠大工の皮膚温低下量が有意に高く ($t(424)=5.60, p<.001$)、34℃の型枠大工で0.83℃、鉄筋工で0.06℃と、同じく型枠大工の皮膚温低下量が有意に高かった ($t(424)=18.84, p<.001$)。背部では、29℃の型枠大工で0.48℃、鉄筋工で0.25℃と、型枠大工の皮膚温低下量が有意に高く ($t(424)=2.56, p<.05$)（図省略）、34℃の型枠大工で1.14℃、鉄筋工で0.82℃と、同じく型枠大工の皮膚温低下量が有意に高かった ($t(424)=4.17, p<.001$)。鉄筋工は型枠大工に比べて、特に腹部でACWの効果が小さかった。

以上から、ACWが作用している部位に着目すると、前腕部の皮膚温はやや上昇しているものの、腹部、背部においては有意な皮膚温低下が見られたので、ACWは主に腹部と背部を冷却することで平均皮膚温の上昇抑制の効果を生み出しているといえる。前腕温がやや上昇した要因は、体幹部に比べて曲率が大きく熱放散に有利な前腕部が、ACWなしでは、長袖Tシャツのみで外気に曝されるのに対して、ACWありでは、ACWによって覆われ熱放散が妨げられる、腕部が長いこと抵抗が大きく気流が到達しない等が考えられる。Fig.1に示すように、今回使用されたACWは、袖口はボタンで、裾はゴムで身体にほぼ密着し、ファスナーは頸窩点(左右の鎖骨の間

Fig.4 Comparison of mean skin temperatures of back, abdomen and forearm with and without ACW, and differences of mean

Fig.5 Comparison of differences of skin temperature on back and abdomen between with and without ACW for RBP and FW at 34°C.

の窪み)までか、首元上まで覆うように閉めて着用されている。そのため首元は密着せず、ゆとりがあるので、ACW のファンによる気流は、ゆとりが確保された開口部となっている首元から多く抜けていると考えられる。そこで、前腕部を冷却する対策としては、現在ほとんどが首元から抜けている気流を袖口に抜けるようにするために、肩口を大きく取って現状より抵抗を下げ風量を確保する、現在の腰部の ACW のファンの位置を肩甲骨辺りに移動するなど、腹部、背部への風量を確保しつつ袖への風量を増やす工夫が望まれる。今後の対策のためには ACW 内気流分布の精密な解析が必要である。

4.2 平均皮膚温、舌下温、活動量

ACW の効果を検証するために、模擬作業ごとの平均皮膚温、舌下温について気温別に t 検定を行った。さらに、職種、ACW を独立変数とし、模擬作業ごとの平均皮膚温、活動量、各軸加速度を従属変数とした、二要因の分散分析を行った。

4.2.1 平均皮膚温、舌下温

Fig.6, 7 に、平均皮膚温および舌下温の t 検定の結果をそれぞれ示す。Fig.6 の平均皮膚温については、(a) 34℃では、ACW なし群 (平均値 34.55℃) に対し、ACW あり群 (平均値 34.08℃) で有意に低値を示した ($t(45)=6.975$, $p<.001$) のに対し、(b)29℃では ACW なし群 (平均値 33.84℃) と ACW あり群 (平均値 33.62℃) で有意な差は認められなかった。Fig.7 の舌下温については、(a) 34℃は、ACW なし群 (平均値 36.93℃) に対し、ACW あり群 (平均値 36.81℃) で有意に低値を示した ($t(45)=2.767$, $p<.01$) のに対し、(b)29℃では ACW なし群 (平均値 36.87℃) と ACW あり群 (平均値 36.82℃) で有意な差は認められなかった。ACW は 34℃の環境では、平均皮膚温を約 0.4℃、舌下温を約 0.1℃抑制する効果があるが、29℃の環境では有意な効果が認められなかった。文献⁵⁾の屋外工事 (気温 34℃) では、鉄筋工・型枠大工の平均皮膚温が ACW により約 1℃の抑制効果、鉄筋工のみ鼓膜温度にも約 0.6℃の抑制効果が見られたのに対し、屋内工事 (気温 29℃) では ACW の効果が認められなかった傾向と、今回の実験結果はほぼ類似している。

Fig.8 に ACW と職種を独立変数、平均皮膚温を従属変数とした二要因の分散分析結果を示す。交互作用は見られなかったが、ACW と職種の主効果が有意であった ($F(1,169)=12.51$, $P<0.001$, $F(1,169)=7.67$, $P<0.01$)。ACW あり (平均値 33.86℃) は、ACW なし (平均値 34.20℃) より有意に低値を示し、鉄筋工 (平均値

Fig.6 Comparison of averaged mean skin temperatures with and without ACW at 34℃ and 29℃.

Fig.7 Comparison of means of sublingual temperature with and without ACW at 34℃ and 29℃.

34.16℃) は、型枠大工 (平均値 33.9℃) より有意に高値を示した。舌下温についての同様な二要因の分散分析では、有意な差が認められなかった。

4.2.2 活動量、各軸加速度

Fig.9 に ACW と職種を独立変数、活動量、X 軸加速度、Y 軸加速度、Z 軸加速度をそれぞれ従属変数とした二要因の分散分析の結果を示す。(a)活動量では、職種間に有意な差は認められなかったが、鉄筋工 (平均値 2.08METs) は、型枠大工 (2.00 METs) より 10%弱高い傾向

Fig.8 Comparison of averaged mean skin temperatures with and without ACW for RBP and FW

Fig.9 Comparison of means of activity, acceleration of x, y and z-axis with and without ACW for RBP and FW.

があった、(b)X 軸加速度では、職種の主効果が有意であり ($F(1,169)=269.5$, $P<0.001$)、鉄筋工 (平均値 0.68Gal) は、型枠大工 (平均値 0.48Gal) より有意に高値を示した。(c)Y 軸加速度では、交互作用は見られなかったが、職種の主効果が有意であった ($F(1,169)=5.23$ $P<0.05$)。鉄筋工 (平均値 0.37Gal) は、型枠大工 (平均値 0.33Gal) より有意に高値を示した。(d)Z 軸加速度では、有意な差が認められなかったが、鉄筋工、型枠大工の平均値は両者とも 0.21Gal であった。模擬作業での鉄筋工の作業は、X 軸方向作業が主となる番線を用いた鉄筋格子の組立作業の特に壁配筋作業が多くなると想定され、この作業により活動量も型枠大工より高くなったと考えられる。(a)活動量、(b)X 軸加速度とも ACW については有意な差が認められなかった。文献⁹⁾では、実際の屋外工事現場の活動量、X 軸加速度、Y 軸加速度、Z 軸加速度の平均値は、鉄筋工がそれぞれ 2.3METs, 0.57Gal, 0.45Gal, 0.22Gal, 型枠大工がそれぞれ 2.1METs, 0.50G, 0.48Gal, 0.26Gal であった。歩行の影響が含まれる Y 軸加速度で、鉄筋工、型枠大工とも建設現場の実測結果が今回の実験結果を上回る傾向と、X 軸加速度で、壁配筋作業が多くなる鉄筋工の実験結果が現場の実測結果を上回った以外は、両職種とも実験と建設現場の活動量、加速度は概ね一致していた。

4.2.3 まとめ

平均 皮膚温には鉄筋工、型枠大工とも ACW による抑制効果は認められるが、鉄筋工 (平均値 34.16℃) は型枠大工 (平均値 33.90℃) より有意に高かった。一方、X 軸加速度は活動量と 1%水準の正の相関があり、X 軸加速度については、鉄筋工 (平均値 0.67Gal) は、型枠大工 (平均値 0.48Gal) より有意に高かったため、鉄筋工 (平均値 2.08Gal) の活動量は、型枠大工 (2.00Gal) より有意差はないが高くなったと考えられた。また、平均皮膚温は、活動量と 1%水準の、X 軸加速度と 5%水準の、それぞれ正の相関が認められたので、鉄筋工の皮膚温が型枠大工より有意に高い要因として、番線を用いた鉄筋格子の組立作業に起因する X 軸作業が考えられる。

4.3 水分量、心拍

ACW 有無の効果を検証するために、各生理的反応 (着衣体重減少量・裸体体重減少量・着衣残留汗量・心拍 (POLAR)) について、29, 34℃の気温別に t 検定を行った。

Fig.10 に 34℃, Fig.11 に 29℃で、各生理的反応での ACW 有無の効果について t 検定した結果をそれぞれ示す。Fig.10 で、(a) 着衣残留汗量は、ACW なし群 (平均値 286.3g) に対し、ACW あり群 (平均値 144.3g) で有意に低値を示した ($F(1,19)=6.721$, $P<0.05$)。 (d)心拍 (POLAR) は、ACW なし群 (平均値 116.2beats/min) に対し、ACW あり群 (平均値 108.2beats/min) で有意に低値を示した ($F(1,19)=6.785$, $P<0.05$)。以上のように、気温 34℃では、ACW は、作業に起因する心拍の上昇と着衣残留汗量の増加、それぞれの抑制に寄与することが確認された。一方、(b)着衣体重減少量、(c)裸体体重減少量では ACW あり・なしで有意な差が認められなかったものの、ACW ありの方が裸体体重減少量は少なく、着衣体重減少量はやや多い傾向が示されている。ACW を着ることによって、汗の蒸発が促進され、平均皮膚温の低下に起因して発汗量が抑制されたために、着衣残留汗量が小さくなったと考えられる。

一方、Fig.11 の気温 29℃では、34℃で ACW あり・なしで有意な差が認められた着衣残留汗量、心拍 (POLAR) を含め、いずれの生理的指標でも有意差が認められなかった。

また、着衣残留汗量、裸体体重減少量、着衣体重減少量は、29℃と 34℃の気温には有意差があり、いずれの平均値も、34℃が 29℃より高かった ($F(1,37)=20.00$, $P<0.001$, $F(1,37)=20.60$, $P<0.001$, $F(1,37)=9.09$, $P<0.01$)。34℃の着衣残留汗量、裸体体重減少量、着衣体重減少量の平均値は 215, 703, 487g で、29℃のそれぞれ 2.7, 1.51, 1.26 倍であった。

(a) Mean quantity sweat content (b) Mean decrement of body weight for clothed

(c) Mean decrement of body weight for nude (d) Mean heart rate (POLAR)

Fig.10 Comparison of means of weight and heart rate with and without ACW under the condition of 34℃.

(a) Mean quantity of sweat content of clothing (b) Mean decrement of body weight for clothed

(c) Mean decrement of body weight for nude (d) Mean heart rate (POLAR)

Fig.11 Comparison of means of weight and heart rate with and without ACW under the condition of 29℃.

Fig.12 Fluctuations of HR, CVRR, LF/HF, ccvHF and activity of a subject (reinforced bar placer) under the condition of 34°C.

Fig.13 Comparison of means of HR with and without ACW for 29°C and 34°C.

また、本実験における作業時の飲水量は、34°Cでの型枠大工 1 名 (21 歳) の、ACW ありで③作業終了時に 119g、ACW なし⑦作業終了時に 47g、⑧作業終了時に 80g のみで (Fig.2)、他の作業員の作業時の飲水量はゼロであり、本項の水分量の解析にはほとんど影響しなかった。

4.4 自律神経反応

まず、HR, CVRR, LF/HF, ccvHF の経時変動波形を、ライフレコードを用いて測定した活動量 (METs) と比較して、波形の傾向の把握を試みた。さらに、自律神経反応における ACW の効果を検証するために、HR, CVRR, LF/HF, ccvHF について、29, 34°C の気温別に t 検定を行った。分析した心拍変動のデータは、各模擬作業①～⑧ (Fig.2 参照) の作業終了前の 10 分間 (①'～⑧') の平均をとった。

Fig.12 に、気温 34°C で、鉄筋工の心拍変動を周波数解析して求めた HR, CVRR, LF/HF, ccvHF と活動量の一日の経時変動の例を示す。被験者の条件は、午前 ACW あり、午後 ACW なしである。ccvHF は休憩時間中に高く、午前作業終了時 (ACW あり) に比べ

(a) Mean HR

(b) Mean CVRR

Fig.14 Comparison of means of HR and CVRR with and without ACW under the condition of 34°C.

て午後作業終了時 (ACW なし) の HR が高く、CVRR は低くなる傾向が認められる。

Fig.13 に、HR についての、ACW (あり・なし)、気温 (29, 34°C) を独立変数、HR を従属変数とした、二要因の分散分析結果を示す。ACW と気温の交互作用はないが、ACW の主効果が有意であり

($F(1,168)=8.052$, $P<0.01$)、気温の主効果も有意であった ($F(1,168)=4.834$, $P<0.05$)。気温 34℃の HR(平均値 108.0 beats/min)は、気温 29℃の HR(平均値 104.8 beats/min)より有意に高値を示したので、気温別に各自律神経反応に与える ACW の効果を検証するために HR, CVRR, LF/HF, ccvHF について t 検定を行った。気温 29℃では、HR, CVRR, LF/HF, ccvHF については有意な差が見られなかった(図省略)。

Fig.14 に、34℃での ACW の効果を検証するために、HR, CVRR について t 検定を行った結果を示す。(a) HR については、ACW あり(平均値 104.0beats/min)は、ACW なし(平均値 109.6beats/min)より有意に低値を示した ($t(45)=3.994$, $p<.001$)。 (b) CVRR については、ACW なし(平均値 5.18%)は ACW あり(平均値 5.77%)より有意に低かった ($t(45)=3.472$, $p<0.001$)。LF/HF, ccvHF については、ACW あり・なしの差は有意でなかった。

HR とともに、CVRR などの自律神経活動を用いて、ACW の効果、熱中症の前兆が定量的に評価できる可能性が示唆された。

4.5 心理的指標

Fig.15, 16 に、ACW、職種を独立変数、暑さ感、快適感、それぞれを従属変数とした二要因の分散分析結果を示す。

Fig.15 の暑さ感では、ACW と職種の交互作用が見られた ($F(1,169)=5.514$, $P<0.05$) ことから、単純主効果の検定を行った。その結果、ACW なしの場合、型枠大工(平均値 1.95)は鉄筋工(平均値 2.71)より有意に暑く感じ ($F(1,169)=20.79$, $P<0.001$)、型枠大工では、ACW なし(平均値 1.95)は ACW あり(平均値 2.54)より有意に暑く感じていた ($F(1,169)=12.71$, $P<0.001$)。

Fig.16 の快適感では、ACW と職種の交互作用が見られた ($F(1,169)=7.835$, $P<0.01$) ことから、単純主効果の検定を行った。その結果、ACW なしの場合、型枠大工(平均値 2.20)は鉄筋工(平均値 3.43)より有意に不快に感じ ($F(1,169)=29.74$, $P<0.001$)、型枠大工では、ACW なし(平均値 2.20)は ACW あり(平均値 2.98)より有意に不快を感じており ($F(1,169)=10.89$, $P<0.001$)、暑さ感と同様な傾向が認められた。

今回の気温・活動量を統制した実験では、型枠大工には暑さ感・快適感で ACW の効果が認められた点は屋外現場と類似していた。その一方、鉄筋工は ACW なしで型枠大工ほど暑さを感じていないため、ACW の効果が認められず、かつ ACW なしで鉄筋工の快適感が型枠大工より高かった。それに対し、屋外現場では、両職種に ACW の効果が見られ、ACW あり・なしで型枠大工の快適感が鉄筋工より高く、本実験とは傾向が異なっていた。本実測で、暑さ感・快適感において、ACW の有無で有意な差が型枠大工にあり、鉄筋工に認められなかった要因の一つとして、4.1 で示したように、型枠大工は鉄筋工に比べて、ACW の有無による腹部や背部皮膚温の差が有意に大きく、ACW の効果が大きいことが挙げられる(Fig.5)。特に鉄筋工で、腹部の ACW の効果が小さかったのは、今回の模擬作業では、型枠大工より有意に高値を示した X 軸加速度(Fig.8(b))の動作である、しゃがんだ姿勢での壁配筋作業が多く(Fig.1(b))、膝で腹部が圧迫された結果、ファンによる気流が届きにくくなったことが、要因として考えられる。

Fig.15 Comparison of means of thermal sensation with and without ACW for RBP and FW..

Fig.16 Comparison of means of comfort sensation with and without ACW for RBP and FW.

5. 考察

4.3 の解析結果から、「ACW の有無(着衣: 1、非着衣: 2)と気温に依存して着衣残留汗量が有意に変化し心拍が増減する。」というモデル(Fig.17)を作成した。Fig.17 では、気温が高くなると着衣残留汗量が増し ($\beta=0.54$, $P<.001$)、ACW を着ないと着衣残留汗量が増す ($\beta=0.37$, $P<.01$) ことを示し、さらに着衣残留汗量が増すと心拍 (POLAR) が高くなる ($\beta=0.32$, $P<.05$) ことを示している。発汗量が増加すると熱を運ぶ役割をする循環血漿量(主に血液中の水分)が減少する。単位時間当たり心拍出量(=心拍数×一回心拍出量)を一定に保つための反射機構が備わっている。すなわち、循環血漿量が減って一回心拍出量が低下すると、心拍数を増加させることで単位時間当たりの心拍出量を保つ。発汗量のうち着衣残留汗量が増えるということは、体温調節に寄与しない汗が多くなるため、体温調節に異常をきたす。Fig.17 の適合度は $GFI=0.971$ 、 $AGFI=0.903$ 、 $NFI=0.917$ 、 $RMSEA=0$ であり、各パスはすべて有意であった。

Fig.17 Significantly Model

6. まとめ

人工気候室を用いて現場を想定した気温、各職種の模擬作業を設定することにより現場の作業員の活動量、ACW 着衣・非着衣時の服装、各被験者の実験パターン、それぞれの条件を統制し、作業員の生理・心理反応を詳しく実測し、現場では抽出できなかった ACW の効果と、気温・職種など他の熱中症の要因の影響の把握を試みた。

屋外工事を想定した気温 34℃では、ACW は、平均皮膚温を約 0.4℃、舌下温を約 0.1℃抑制する効果があるが、29℃の環境では有意な効果が認められなかった。これは、ACW の生理的指標における効果が屋外工事のみで、屋内工事では認められなかった工事現場での傾向と類似していた。本実験で、鉄筋工は、型枠大工より平均値で 0.26℃皮膚温が高かったが、その要因として、鉄筋工の活動量と、主に鉄筋格子の組立作業に起因する X 軸加速度が、型枠大工より高かったことが考えられた。

気温 34℃では ACW により、着衣残留汗量と心拍が有意に低値を示す一方、裸体体重減少量と、蒸発した汗、呼気に含まれる水分と捉える着衣体重減少量には ACW の有無で有意な差がなかった。この結果から、「ACW の有無と気温に依存して着衣残留汗量が有意に変化し、心拍が増減する。」という有意なパスのモデルを作成した。このパスは、着衣残留汗量に伴う脱水症状により、循環血漿量が低下した結果、生理的に心拍を上げて代償していることを示唆している。また、気温 34℃での 95 分間での着衣残留汗量、裸体体重減少量、着衣体重減少量の平均値は、それぞれ 215, 703, 487g で、屋外現場と人工気候室の放射温度、湿度、気流の違いと、発汗量の時間帯での変動を考慮に入れないで想定すると、実際の現場の 1 日間では、ほぼ 4 倍の作業時間になるので、現場ではそれぞれ 870, 2800, 1950g と今回の実測から推定され、今後建設現場で検証したい。

HR とともに、CVRR の自律神経指標を用いて、ACW の効果、熱中症の前兆が定量的に評価できる可能性が示唆された。

ACW 内の測定部位では、腹部と背部では有意な平均皮膚温低下が見られた一方、前腕部は ACW を着ることで 29℃では有意に表面温度が上昇した。腕部が長い抵抗が大きく気流が到達できず、かつ ACW によって腕部からの熱放散が妨げられる等が、要因として考えられる。特に、鉄筋工では、前腕部が番線を用いた鉄筋の結束作業が今回の模擬作業の中心で、そのため X 軸加速度が卓越して型枠大工を有意に上回っており、しゃがんだ姿勢での作業により膝で腹部が圧迫された結果、腹部へファンによる気流が届きにくくなったことと、ACW のために温度が高くなった上腕部による X 軸の作業が、今回の実験で暑さ感・快適感とも ACW の効果が見られなかった要因である可能性がある。

謝辞

実験に協力してくださいました被験者の方々に感謝の意を表します。原稿作成にあたり、ご指導・ご協力いただいた、国際医療福祉大学 下澤達雄教授、株式会社クロスウェル藤井智恵子社長に深謝します。

参考文献

- 1) Ministry of Health, Labour and Welfare HP : Heisei 28 nen “Shokubaniokeru necchuusyo niyoru shisyousaigaino hasseijoukyo” (Kakuhou) Betten1 Shokubaniokeru necchuusyouniyoru shisyousaigaino hasseijoukyou,, 2017. 6. 1 (in Japanese)

- 厚生省ホームページ：平成 28 年「職場における熱中症による死傷災害の発生状況」(確報)別添 1 職場における熱中症による死傷災害の発生状況, 2017. 6. 1
- 2) Tokizawa, K. : New technology of heat stroke measures – Practical-oriented and future-oriented – (Journal of Occupational Safety and Health), Vol. 10, No. 1, pp. 63-67, 2017 (in Japanese)
時澤健：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, 10, 1, pp. 63-67, 2017
 - 3) Suzuki, E. Kashimura, O. Takahashi, H. Minami, K. and Nakai, M. : Effects of Air Circulation in Clothing Inside on Thermoregulatory Responses at Farming Under Heat Environmental Conditions (Jpn. J. Biometeor), Vol. 49, No. 2, pp. 83-92, 2012 (in Japanese)
鈴木英悟, 榎村修生, 高橋弘彦, 南和広, 中井誠一：衣服内空気循環が夏季暑熱環境下農作業時の体温調節反応に及ぼす影響, 日本生気象学会誌, 第 49 巻, 2 号, pp. 83-92, 2012
 - 4) Kobayashi. K and Tamura. Y. : Observation on Workers Physical Strain in Under Ground Constructions, Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ), No. 477, pp. 143-152, 1995. 11 (in Japanese)
小林謙二, 田村恭：地下における建設工事に従事する作業員の生体負担に関する調査, 日本建築学会計画系論文集, No. 477, pp. 143-152, 2017. 11
 - 5) Yamazaki. K, Takahashi. N, Kuwabara. K, Suga. S. and Kobayashi, K. : Basic Discussion of Effect of Air-Conditioned Wear on Comfortable and Heat Feeling for Construction Workers Based on Measurement Survey, Vol. 6, pp. 181-184, 2017
山崎慶太, 高橋直, 桑原浩平, 菅重夫, 小林宏一郎：建設作業員の快適感・暑さ感に及ぼす空調服の影響に関する実測調査に基づく基礎的検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, Vol. 6, pp. 181-184, 2017
 - 6) Iriki, M. Tsutiie, K. Hasebe, Y. Tanabe, S. and Takahashi, K. : The Efficacy of Heart Rate and its Variability for the Evaluation of Thermal Comfort (Jpn, J, Biometeor), Vol. 30, No. 2, pp. 57-63, 1993
入来正躬, 土家清, 長谷部ヤエ, 田辺新一, 高橋和子：心電図 R-R 間隔検査を用いた熱的快適性の評価, 日生気誌, 第 30 巻, 2 号, pp. 57-63, 1993
 - 7) Honda, K. and Wakai, S. : An Experimental Study on Measurement of the Workload from Heart Rate Variability when Walking in an Underground Space, Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ), No. 603, pp. 57-64, 2006. 5 (in Japanese)
本田薫, 若井正一：地下街歩行時の心拍変動を指標とした生体負担の測定に関する検討, 日本建築学会計画系論文集, 第 603 号, pp. 57-64, 2006. 5
 - 8) McCullough, E. A. : A comprehensive database for estimating clothing insulation. ASHRAE Transactions. Vol. 91, pp. 29-47, 1985
 - 9) Mochida, T. Shimakura, K. and Yoshida, N. : Comparison of Formulas for Calculating Average Skin Temperature and their Characteristics, (Ann. Physiol. Anthropol.), Vol. 13, No. 6, pp. 357-373, 1994 (in Japanese)
持田徹, 嶋倉一實, 吉田直人：各種平均皮膚温算出式の特性比較, Ann. Physiol. Anthropol. 第 13 巻, 6 号, pp. 357-373, 1994
 - 10) Koshio, A. : SPSS to Amos niyoru shinri・chousa data kaiseki inshibunseki・kyoubunsankouzoukaiseki made, Tokyo tosyosho, pp. 193-213, 2016. 5 (in Japanese)
小塩真司：SPSS と Amos による心理・調査データ解析因子分析・分散構造解析まで, 東京図書, pp. 193-213, 2016. 5
 - 11) Fujii, C. and Abe. A. : Heart Rate Variability analysis for the Automatic Nervous Response Assessment (THE CELL). Vol. 47, No. 7, pp. 30-33, 2015 (in Japanese)
藤井智恵子, 安部敦：自律神経反応評価のための心拍連動連続解析, 細胞, 第 47 巻, 7 号, pp. 30-33, 2015

EFFECT OF SIMULATED WORK IN ARTIFICIAL CLIMATE CHAMBER ON PHYSIOLOGICAL AND PSYCHOLOGICAL RESPONSES OF CONSTRUCTION WORKERS WITH AIR-CONDITIONED WEAR

Keita YAMAZAKI^{*1}, *Shigeo SUGA*^{*2}, *Kouhei KUWABARA*^{*3}, *Yasuhiro HAMADA*^{*4},
Soki SYU^{*5}, *Ryosuke NAKANO*^{*6}, *Koichiro KOBAYASHI*^{*7} and *Nao TAKAHASHI*^{*8}

^{*1} Chief Researcher, Takenaka Research & Development Institute, Dr.Eng.
Visiting Prof. of Iwate University

^{*2} Takenaka Corporation, Head Office, Tokyo, Safety and Environment Dept.

^{*3} Assoc. Prof., NIT, Kushiro College, Dr.Eng.

^{*4} Prof., Faculty of Engineering, Hokkaido University, Dr.Eng.

^{*5} Grad. Student, Faculty of Engineering, Hokkaido University

^{*6} Student, Faculty of Engineering, Hokkaido University

^{*7} Prof., Dept. of Systems Innovation Eng., Iwate Univ., Dr.Eng.

^{*8} Chimura Nature Club, Ph.D. in Sociology

To extract the effects of air-conditioned wear (ACW) and other factors on heat stroke, we carried out experiments to measure the physiological and psychological responses of workers simulating construction work in an artificial climate chamber at two fixed temperatures (29, 34°C), which simulate the environmental temperature at indoor and outdoor construction sites, respectively. There were two types of workers in the experiment: reinforcing bar placers (RBPs) and form workers (FWs), and they were tested with and without ACW. Physiological responses, such as the distribution of skin temperatures on the body, sublingual temperature, heart rate measured on wrist and breast, overall activity, three-directional (X, Y and Z) acceleration, body weight with and without clothing were measured; and the subjects were surveyed to assess their psychological responses. There were six RBPs and six FWs.

For the workers wearing the ACW, skin temperatures at the abdomen and back were significantly lower than those without ACW: 0.4°C and 0.4°C at 29°C, 0.5°C and 1.0°C at 34°C, respectively ($P < 0.001$). On the other hand, the skin temperature at the forearm was significantly higher for workers wearing ACW at 29°C. These numbers indicate that the mean skin temperature is reduced mainly by cooling the abdomen and back using airflow. But the arm part of the ACW is so long and thin compared with the body part that airflow driven by fans cannot arrive at the forearm due to high resistance. Additionally, heat dissipation from the forearm is reduced by the ACW. Thus, the skin temperature at the forearm of workers wearing ACW was higher than that of workers without ACW.

Skin temperatures and sublingual temperatures of subjects wearing ACW were significantly lower than those without ACW at 34°C ($P < 0.001$, $P < 0.05$). ACW reduces skin temperatures and sublingual temperatures by 0.4°C and 0.1°C at 34°C, respectively. It does not have the same effect at 29°C. Furthermore, quality of sweat content of clothing with ACW was significantly less than that without ACW only at 34°C, not at 29°C. Heart rate measured on the wrist with ACW was significantly lower than that for subjects without ACW at 34°C, but not at 29°C. From these results, we can infer that the heart rate varies with the amount of sweat due to dehydration which varies significantly depending on the ambient temperature and whether the subject is wearing ACW.

On the other hand, the acceleration of RBPs in the X-direction was significantly higher than that of FWs since rebar work on low walls was done in a squatting position in this simulation. It was supposed that, in this position, the knees press against the abdomen so that the cooled air driven by the fans cannot arrive at the abdomen. Thus, the differences in skin temperatures at the abdomen between RBPs with ACW and those without were significantly lower than for FWs and for the backs of RBPs. We believe this explains why there were no significant differences in comfort and thermal sensation between RBPs with ACW and those without.

(2017年11月9日原稿受理, 2018年3月12日採用決定)