

被服環境が暑熱環境下植物工場内の 作業負担に及ぼす影響

三重県工業研究所 松 岡 敏 生
(共同研究者) 三重県農業研究所 磯 山 陽 介
同 北 村 八 祥

Effect of Clothing on Work Load in Large-Scale Greenhouse under Hot Environment

by

Toshio Matsuoka
Mie Prefectural Industrial Research Institute
Yousuke Isoyama, Hatsuyoshi Kitamura
Mie Prefecture Agricultural Research Institute

ABSTRACT

We investigated the effect of clothing environment on workload for tomato cultivation work in a greenhouse. The WBGT (Wet bulb globe temperature), ECG (Electrocardiogram), tympanic temperature, subjective evaluation such as comfort, subjective work intensity and temperature and humidity in clothes were measured. The following six clothing conditions were used: shirt only, shirt only with mask, cooling vest over the shirt, cooling vest under the shirt, cloth with fans, and cooling vest under the cloth with fans. As a result, the followings were obtained. (1) The WBGT in a greenhouse was over 31 degrees even in the morning, and the risk of heat stroke was very high. (2) According to the %HRR (Percentage of Heart Rate Reserve) of ECG, wearing a mask tended to increase slightly the exercise intensity, and wearing a cooling vest or a cloth with fans tended to decrease the exercise intensity. (3) Subjective

work intensity was assessed to be higher in wearing a mask and lower in wearing a cooling vest. (4) The results of the measurement of temperature and humidity inside the clothes showed that the cloth with fans kept the humidity inside the clothes low. It was confirmed that the clothes with fans was effective in lowering the temperature and humidity inside the clothes.

要 旨

太陽光利用型植物工場でのトマト栽培作業を対象に、被服環境が作業負担に及ぼす影響を検討した。植物工場内の WBGT (Wet bulb globe temperature)、作業者の心電図、鼓膜温、快適感などの着心地に関する主観評価、運動強度の主観評価、衣服内温湿度を測定した。その結果、次のことが分かった。(1) 植物工場内の WBGT は、午前においても 31 度以上であり、熱中症のリスクが非常に高い。(2) 心電図の % HRR (Percentage of Heart Rate Reserve) から、マスクの着用により運動強度はわずかに上昇する傾向があり、冷却ベストの着用、ファン付き作業服の着用により運動強度は低下する傾向にあった。(3) 自覚的な作業強度は、マスク着用により高くなり、保冷剤を用いた着衣条件では主観的に作業負荷が小さいと評価された。(4) 衣服内温湿度の測定結果から、ファン付き作業服は衣服内温湿度を低く保つことが確認できた。

緒 言

近年、施設園芸においても農地の集約や大規模化が進み、野菜等の安定供給を確保するために、環境制御装置を導入した温室が増加している。トマト栽培では、生育、成熟コントロールと物質生産を増やすための環境制御が行われ¹⁾、温室での周年栽培化が進んでいる。そして、多収化、周年栽培化とともに、高度な環境制御設備を有する大規模経営が増えている。トマト栽培が行われる太

陽光利用型植物工場では、100 名を超える大規模経営も進んでおり、農業規模の拡大と共に組織的な労働安全衛生も求められている。

太陽光利用型植物工場等の農業ハウス内は、植物の生育等のための環境制御により高温多湿化することがあり、屋外の気温や湿度が熱中症発症の危険レベルに達しない場合でも、ハウス内は危険度が上昇することもある。そのため、農業ハウスで働く人に合わせた労働安全衛生対策が必要である。斎藤らは、ハウス栽培作業時の熱中症や水分補給の実態調査²⁾や夏期暑熱下ハウス農作業時における高齢農業従事者の熱中症の危険性の評価³⁾から、ハウス栽培作業での高齢の農業従事者の作業実態を報告している。また、我々も夏期の太陽光利用型植物工場での作業について実態調査を行い、身体的に負担が大きいことを報告している⁴⁾。

夏期の高温化が進み、特に屋外作業では熱中症などの健康被害のリスクが高まるため、作業者の身体的負担を軽減することを目的とした保冷製品、ファン付き作業服やポータブル扇風機などが販売されている。農作業においても、これらの製品は利用されているが、それらの効果を詳細に検証した報告はみられない。そこで、太陽光利用型植物工場等の農業ハウスでの作業を対象に、各種の被服環境が作業負担に及ぼす影響を検討したので報告する。

1. 方 法

1. 1 作業環境

調査場所は、三重県農業研究所内の植物工場三

重実証拠点トマトハウス（以下、植物工場）及び作業・管理棟とした⁴⁾。試験を行った植物工場は太陽光利用型の半閉鎖環境であり、温室の環境制御はAkisai（富士通（株）製）により生育管理されている。

1. 2 実験期間および作業内容

実験は2020年8月のいずれも晴天の7日間に行った。対象作業は、トマト低段密植栽培区画10a（栽植密度5.5株/㎡）における誘引作業とした。誘引作業とは、トマト栽培において生長の向きや株のバランスを整えるための作業であり、芽かきとともに頻繁に行う作業である。

1. 3 被験者

被験者は、トマト栽培等の農作業従事者である健康な成人男性3名（ID01:53歳，ID02:30歳，ID03:36歳）である。実験を行うにあたっては、実験内容を十分に説明し、実験参加へのイン

フォームドコンセントを得た。

1. 4 着衣条件

作業時の着衣は、長袖の上衣、長ズボン、靴、手袋とし、上衣は6種類（W1からW6）としてその詳細を表1に示す。シャツの下に着るアンダーウェア、長ズボン、手袋は全ての条件で同一として、靴および靴下、長ズボンの下に履くアンダーウェアは、被験者がそれぞれ普段使用しているものとした。それぞれの被服の素材等の詳細を表2に示す。実験衣を着用した状態を図1に示す。W0は、各作業衣の共通条件となるアンダーウェアと長ズボンを着用した状態である。このW0の

表1 着衣の詳細

着衣記号	着衣条件
W1	長袖シャツのみ
W2	長袖シャツ、マスク着用
W3	長袖シャツ、冷却ベスト
W4	冷却ベスト、長袖作業服
W5	ファン付き作業服
W6	冷却ベスト、ファン付き作業服

表2 実験衣の詳細

被服の種類	素材	組織
アンダーウェア	ポリエステル92%，ポリウレタン8%	トリコット
長ズボン	ポリエステル100%	平織（タフタ）
長袖シャツ	ポリエステル100%	平織（タフタ）
長袖作業服	ポリエステル100%	平織（タフタ）
ファン付き作業服	ポリエステル100%	平織（タフタ）
冷却ベスト	ナイロン83%，ポリウレタン17%	トリコット（メッシュ）
手袋	ニトリルゴム100%	
マスク	ポリエステル100%	不織布

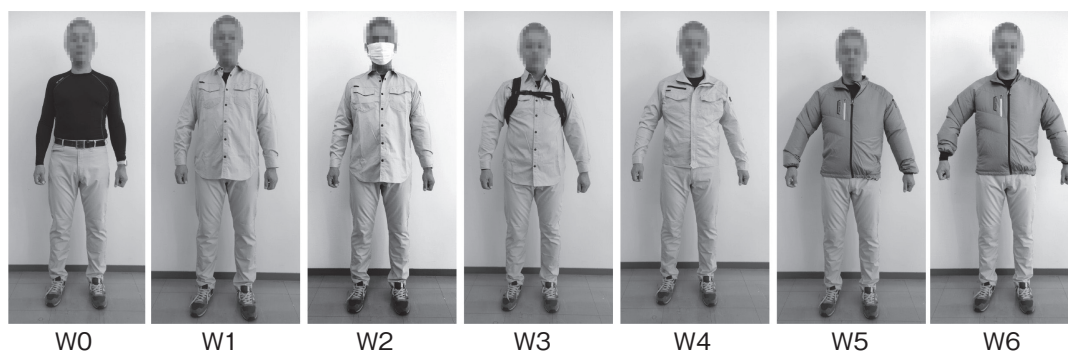


図1 着衣の詳細

上に各条件の被服を着用して、表1に示したW1からW6の各条件とした。一般に保冷剤や気化熱、循環水を利用して衣服に冷却効果を持たせたものを冷却服と呼び、その形状がベストタイプのものを冷却ベストと呼び、W3、W4およびW6で用いた。その概要を図2に示す。また、ファン付き作業服とは、作業衣等の上着にバッテリー駆動等による電動ファンを装着し、衣服内に外気を取り入れて、空気を循環させる衣服のことを言い、W5、W6で用いた。その概要を図3に示す。

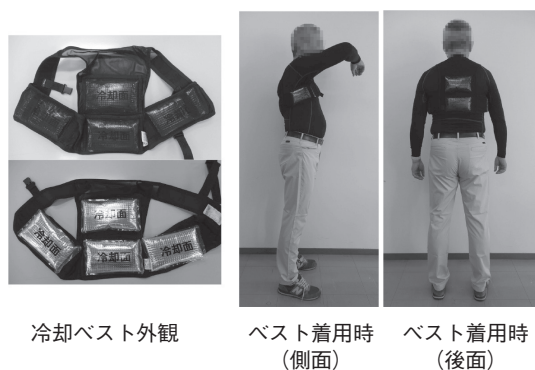


図2 冷却ベストの概要

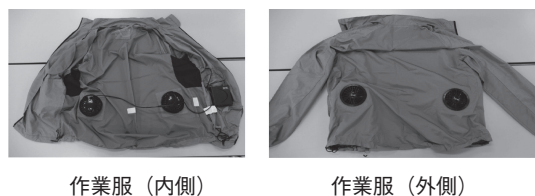


図3 ファン付き作業服の概要

ここで、W1は標準的に用いられる被服環境であり、W2は標準環境にマスクを着用した条件、W3は標準環境の上に冷却ベストを重ね着した環境、W4は長袖シャツと同じ素材、織組織で衣服形状が異なるブルゾンタイプの作業着の下に冷却ベストを着用した環境とした。そして、W5はファン付き作業服のみとして、W6はファン付き作業服の下に冷却ベストを着用した環境とした。

1. 5 測定項目

1. 5. 1 環境測定

植物工場内の作業区域周辺に乾湿計および黒球温度計を設置して、湿球、温度及び乾球温度を5分間隔で測定し、WBGTを算出した。

1. 5. 2 心電図の測定

心電図は、無線型心電図計測装置(SS-ECGHRAG, (株)スポーツセンシング製)を用いて胸部電極の双極誘導により100Hzで測定した。得られた心電図から心拍間隔としてRR間隔(R波の頂点の間隔)、および心拍数を算出した。

1. 5. 3 鼓膜温の測定

鼓膜温は、耳式体温計(MC-510, オムロン(株)製)を用い、植物工場内での作業開始前、および作業終了後に、休憩室内で測定した。作業前後の鼓膜温の差を体温上昇度とした。

1. 5. 4 主観評価

各着衣条件での着心地に関する主観評価として、Visual Analogue Scale (VAS)を用いて、「暑さ感」、「発汗量」、「疲労感」、「快適感」について、植物工場内での作業開始前、および作業終了後に、休憩室内で測定した。また、作業終了後に、自覚的な運動強度として、Borgスケール⁵⁾により測定した。

1. 5. 5 衣服内温湿度の測定

衣服内温湿度は、アンダーウェアを着た作業者の胸部に温湿度計(UNI-01-B002, ユニ電子(株)製)を貼付して、アンダーウェアとその他の着衣間の衣服内温湿度を測定した。測定は、作業前の安静時から実験終了まで連続的に30秒間隔で測定した。

1. 6 実験手順

被験者には、実験開始30分前に室温約27℃の休憩室に入室してもらい、実験内容の説明を行なった後、胸部に心電計を装着した。その後、共通の被服W0を着用してもらい、ウェア上の胸部

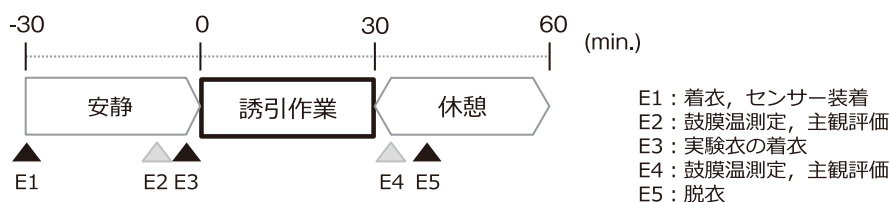


図4 実験プロトコル

に温湿度センサを装着した。そして、椅座位安静を取らせ、主観評価および鼓膜温を測定した。作業開始の約5分前に、所定の実験衣に着替えさせ、その後、植物工場へ移動して、誘引作業を30分間行わせた。作業終了後、休憩室に移動して、作業後の主観評価および鼓膜温を測定した後、実験衣を脱衣した。以上の実験プロトコルを図4に示した。この実験を各実験日の午前9時から午後1時までの間に着衣条件を変更して、3回行わせた。

2. 結果と考察

2. 1 WBGT

植物工場内の作業区域周辺のWBGT測定結果を図5に示す。WBGTは7日間の平均値として、その標準偏差とともに示した。植物工場内のWBGTは、午前9時15分以降は31度以上であり、温度基準としては危険を表す領域（日本生気象学会「日常生活における熱中症予防指針 Ver.3」(2013)より）であった。これまでの結果³⁾でも、夏期晴天時の植物工場内のWBGTは31度以上であり、夏期の植物工場内の作業環境は熱中症のリスクが非常に高い暑熱環境下となることがわかった。

2. 2 心電図の測定

心電図は、各作業開始前の椅座位安静時の5分間を安静時データ、各条件での誘引作業終了前の5分間を作業時データとして、それぞれ解析を行った。着衣条件W1の安静時、作業時の心電図RR間隔の時系列データ例を図6に示し、各被験者の各着衣条件での作業時の心拍RR間隔および心拍数を表3に示す。図6より、いずれの被験者も作業時のRR間隔は安静時のRR間隔よりも短くなっていた。ここで、全ての測定結果について被験者と作業の有無について分散分析を行ったところ、心電図RR間隔は、作業の有無によって危険率5%で有意な差があり、作業時の心電図RR

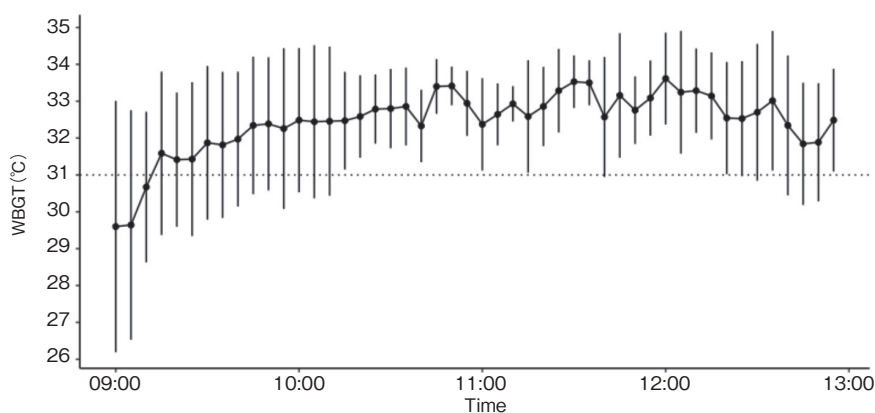


図5 植物工場内のWBGT測定結果

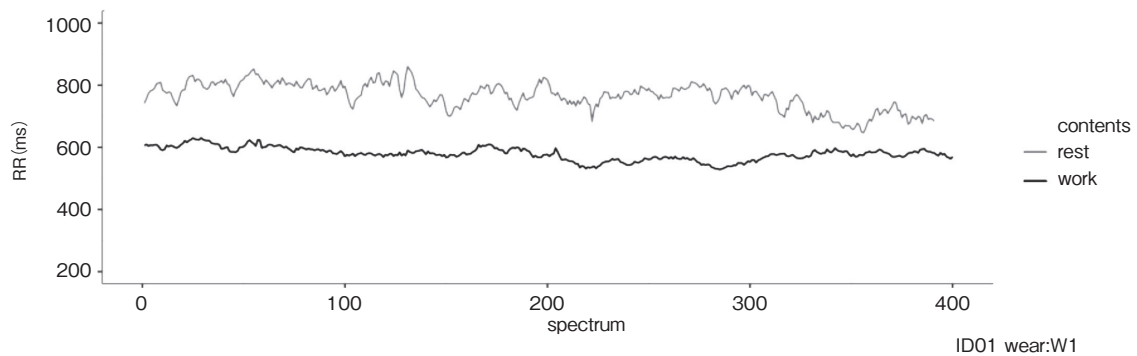


図6 心電図の測定結果 (ID01, 被服条件: W1)

表3 作業時の心拍RR間隔 (ms)

	ID01	ID02	ID03
W1	595.0	621.6	534.0
W2	584.0	618.4	507.4
W3	595.7	626.0	530.0
W4	590.2	606.8	509.9
W5	644.6	610.2	538.4
W6	629.7	650.5	524.3

間隔は安静時のRR間隔よりも短く、30分間の誘引作業は心電図RR間隔に影響を及ぼすことが確認できた。一方で、被験者間にも危険率5%で有意な差があり、被験者と作業の有無についての交互作用はみられなかった。また、午前9時から午後1時までの3回の作業を行わせたが、それらの作業時刻について有意な差はみられなかった。すなわち、心電図RR間隔には被験者間の差異があるため、測定データから被験者の年齢を考慮したカルボーネン法による最大心拍予備能の%強度 (Percentage of Heart Rate Reserve, 以下%HRR)⁶⁾から検討した。%HRRは次式により求めた。

$$\% \text{HRR} (\%) = \frac{(\text{作業時心拍数} - \text{安静時心拍数})}{\{(220 - \text{年齢}) - \text{安静時心拍数}\}} \times 100$$

表4に%HRRを示す。既往研究^{6,7)}における%HRRから作業強度を分類すると、%HRRではマスクを着用したW2は中労働、それ以外は軽労働と分類された。これまでに我々はW1に準ずる着衣条件で実験を行ってきた⁴⁾が、同様の作業で強労働、重労働と分類され、今回の結果は異なるものであった。これは、植物工場の環境制御が前回の実験⁴⁾では、気温35度、湿度78%に設定され、

表4 %HRR (%)

	ID01	ID02	ID03
W1	25.3	16.6	16.0
W2	22.8	15.5	21.7
W3	22.7	12.0	17.7
W4	16.8	18.3	20.6
W5	18.3	13.7	15.9
W6	12.7	15.6	18.0

植物工場内のWBGTは平均で $34.3 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ であったが、今回はトマト栽培の生育管理用に制御されており、前回実験よりもWBGTがやや低かったことによる影響と思われるが、実験プロトコルが異なることなど他の要因もあり、単純には比較できないが、今後、詳細に検討したい。

図7に、各着衣条件での%HRRをまとめた結果を示す。全ての測定結果について被験者と着衣

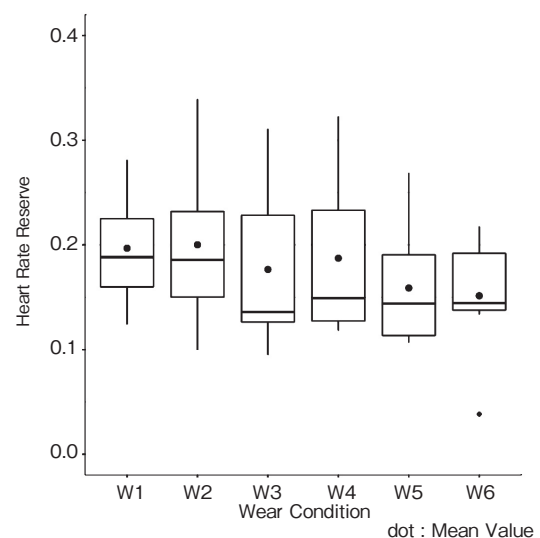


図7 各着衣条件での%HRR

条件について分散分析を行ったところ、% HRRは被験者間および着衣条件間で有意な差はみられなかった。図7より、わずかな差ではあるが、各着衣条件での% HRRの平均値を比較すると、 $W2 > W1 > W4 > W3 > W5 > W6$ の順に大きくなり、すなわち運動強度が大きいこととなる。W1とW2は、マスクの有無の違いであるが、マスクの着用により運動強度はわずかに上昇する傾向があり、W1とW3は冷却ベストの着用の違いであるが、冷却ベストの着用により運動強度は低下する傾向にある。W3とW4は冷却ベストをシャツの上に着用するか、シャツの下に着用するかの違いであるが、シャツの上に着用した方が運動強度は低下する傾向にある。W5とW6は、ファン付き作業服を用いた条件であるが、これらの2条件は、他の条件よりも運動強度が低下している傾向にあり、ファンにより衣服内に送風することで作業負担が低下しているようである。また、W6ではW5に冷却ベストを付加した条件であるが、これにより、さらに運動強度が低下している傾向があることがわかった。これらについては、被験者数を増やし、試験環境をより詳細に制御した実験により検証していきたい。

2. 3 鼓膜温の測定

作業前後の鼓膜温の差、すなわち体温上昇度について、被験者と着衣条件について分散分析を行ったところ、被験者間および着衣条件間で有意な差はみられなかった。

2. 4 主観評価

各着衣条件での着心地に関する主観評価はVASを用いたが、作業開始前と作業終了後の差を主観評価値とした。また、主観評価値およびBorgスケールによる自覚的な作業強度は、被験者ごとに評価値を規格化して解析を行った。主観評価値および作業強度値について分散分析を行ったところ、

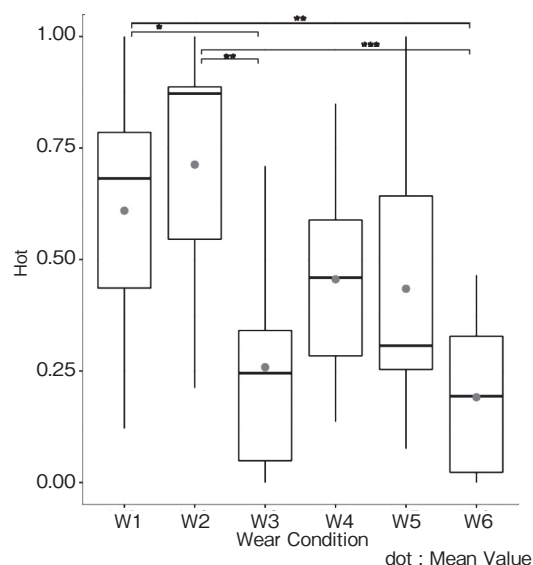


図8 「暑さ感」評価結果

ろ、「疲労感」については着衣条件による有意な差はみられなかった。

図8に「暑さ感」の評価結果を示す。冷却部材を用いないW1とW2は、暑さ感が高い値であり、W1とW3、W1およびW2とW6、W2とW3の間に有意な差があり、冷却ベストの着用により暑さ感は低くなり、それらに加えてファン付き作業服の着用により暑さ感は低くなることがわかった。また、W3とW4を比較すると統計的に有意な差はないが、冷却ベストはシャツの中よりもシャツの上に着用した方が暑さ感低い値となった。同様にW4とW6を比較すると、上衣の下に冷却ベストを着用する場合、衣服内の送風により暑さ感は抑えられることがわかった。

図9に「発汗量」の評価結果を示す。冷却部材を用いないW1とW2は、自覚的な発汗量が高い値であり、W1とW6、W2とW3、W5、W6の間に有意な差があり、マスク着用に対して冷却ベスト、ファン付き作業服は自覚的な発汗量が低くなることがわかった。

図10に「快適感」の評価結果を示す。冷却部材を用いないW1とW2は、他条件に比べて不快

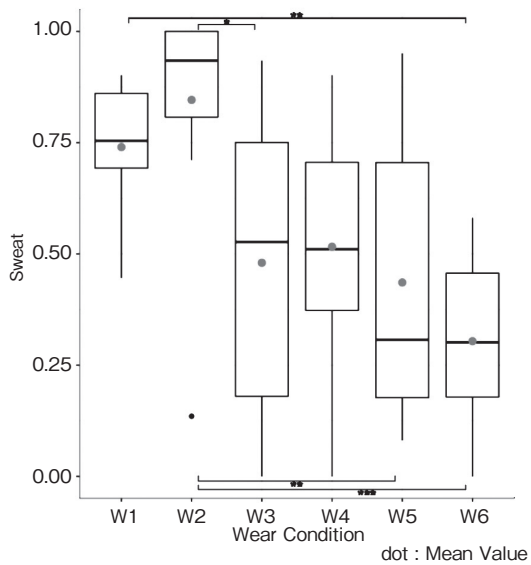


図9 「発汗量」評価結果

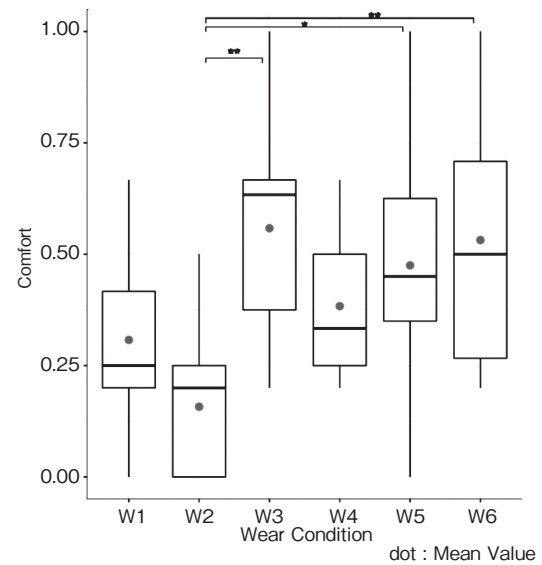


図10 「快適感」評価結果

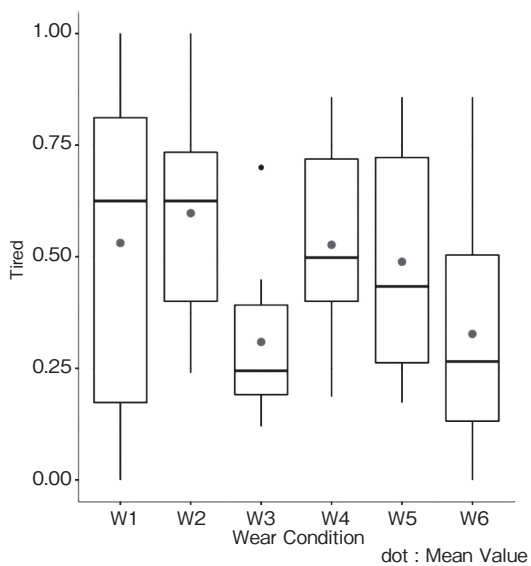


図11 「疲労感」評価結果

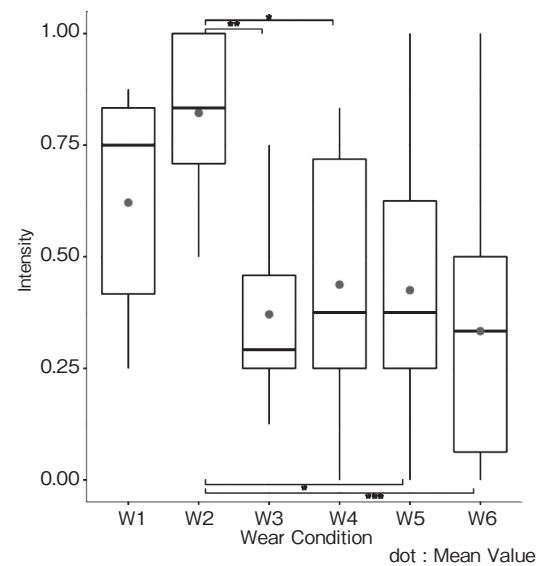


図12 作業強度評価結果

であると評価された。W2は「発汗量」と同様に、W3、W5、W6との間に有意な差があり、マスク着用は不快であることがわかった。「暑さ感」、「発汗量」と異なり、W3が最も良い評価となった。ファン付き作業服では、ファン駆動用のバッテリーが衣服のハンドポケット部あたりに付けられるが、バッテリー重量が約250gあり、このバッテリーが重いとの内観報告もあり、快適感がやや低下し

たと考えられる。

図11に「疲労感」の評価結果を示す。「疲労感」は着衣条件間に有意な差はみられなかったが、「快適感」と同様にW3が最も良い評価であった。

図12に作業強度の評価結果を示す。冷却部材を用いないW1とW2は、他条件に比べて作業強度が高い値となった。W2は、W3、W4、W5、W6との間に有意な差があり、マスク着用により

自覚的な作業強度は高くなることがわかった。心電図による運動強度の評価結果でも冷却部材を用いないW1とW2は他と比べてやや強度が高い傾向にあったが、自覚的な作業強度でも同様の傾向である。しかし、ファンによる送風のみで冷却ベストを用いないW5は、%HRRではW6に次いで強度が低かったが、自覚的な作業強度ではW3よりも強度が高いと評価されている。夏期暑熱条件では、主観的には保冷剤を用いた着衣では負荷が小さいと感じているようである。

2. 5 衣服内温湿度の測定

作業開始後5分から10分を区間1、15分から20分を区間2、25分から30分を区間3として、それぞれの区間において着衣条件と被験者の影響について分散分析を行ったところ、衣服内温度では全てにおいて有意な差はみられず、一方、衣服内湿度については、全ての区間において着衣条件に有意な差がみられた。各着衣条件での衣服内温湿度の測定結果の一例を図13に示す。図13は被験者ID02の結果であるが、衣服内温度は、いずれの着衣条件でも作業開始後10分以降は36度前後であり、冷却ベストを使用した条件でも衣服内温度が低下する傾向は見られなかった。冷却ベストでは、保冷剤により衣服との接触面の表面温度を下

げる効果はあると思われるが、積極的に冷却された空気を放出する機能はないため、衣服内温度には差がないと考えられる。また、ファン付き作業服では、外気を取り入れて衣服内の空気を循環させるが、外気温が高い場合には、衣服内温度を低下させることはない。一方で、衣服内湿度については、ファン付き作業服では、他の条件に比べ衣服内湿度が低い結果となった。図14に、各着衣条件での衣服内湿度をまとめた結果を示す。ファン付き作業服を用いたW5、W6は、他の4条件よりも有意に衣服内湿度が低い結果となった。冷却ベストを上衣の下に着用したW4とW6を比較すると、W6では衣服内湿度が15%程度下がっており、ファンによる送風が衣服内湿度を下げる効果が確認できた。主観評価ではW4がW3よりも全般的に評価が低い結果が得られ、%HRRではW3がW4よりも運動強度が低下している傾向がみられることから、冷却ベストをシャツの上に着用の方が作業負担は少なくなる傾向にある。発汗にも影響を及ぼすと考えられ、今後、試験環境をより詳細に制御した実験により検証していきたい。

3. まとめ

夏期暑熱環境下での太陽光利用型植物工場でのトマト栽培を対象に、衣服環境が作業負担に及ぼ

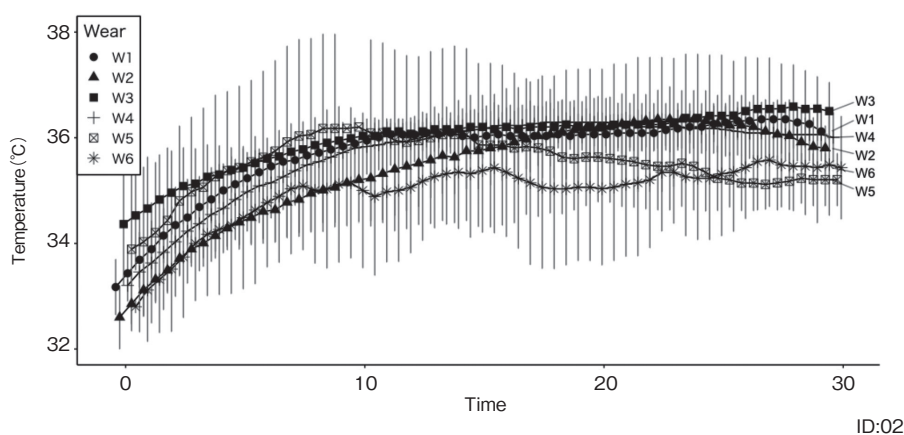


図13 各着衣条件での衣服内温度測定結果 (ID02)

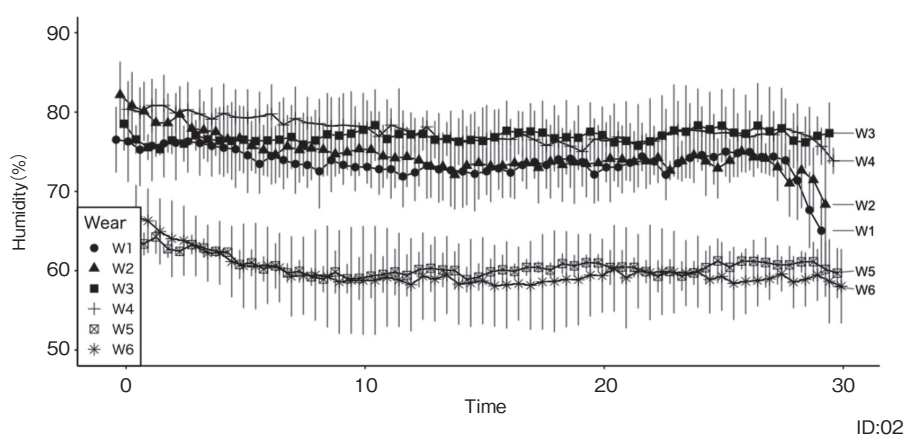


図14 各着衣条件での衣服内湿度測定結果 (ID02)

す影響を調査した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 植物工場内のWBGTは、午前においても31度以上であり、夏期の植物工場内の作業環境は熱中症のリスクが非常に高い暑熱環境下となることがわかった。
- (2) 心電図の測定結果から、カルボーネン法による最大心拍予備能の%HRRから検討した結果、わずかな差ではあるが、マスクを着用したW2は中労働、それ以外は軽労働と分類された。
- (3) 心電図の%HRRから、マスクの着用により運動強度はわずかに上昇する傾向があり、冷却ベストの着用、ファン付き作業服の着用により運動強度は低下する傾向にあることがわかった。
- (4) 着心地および自覚的な運動強度の主観評価の結果、衣服環境は、「暑さ感」、「発汗量」、「快適感」、自覚的な運動強度に影響を及ぼすことがわかった。冷却ベストの着用により「暑さ感」は低くなり、それらに加えてファン付き作業服の着用によりさらに「暑さ感」は低下することがわかった。マスク着用に対して冷却ベスト、ファン付き作業服は自覚的な「発汗量」が低くなることがわかった。「快適感」では、マスク着用は不快であり、シャツの上

に冷却ベストを着用する着衣条件が最も快適と評価された。自覚的な作業強度は、マスク着用により高くなり、保冷剤を用いた着衣条件では主観的に作業負荷が小さいと評価された。

- (5) 作業中の衣服内温湿度の測定結果から、夏期の植物工場内作業では、衣服環境は衣服内湿度に影響を及ぼさないことがわかった。一方、衣服環境は衣服内湿度に影響を及ぼし、ファン付き作業服は衣服内湿度が低い結果となった。冷却ベストを上衣の下に着用した衣服条件では、ファンによる送風がある衣服は衣服内湿度を下げる効果が確認できた。

謝 辞

本研究に助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、本研究を実施するにあたり、被験者としてご協力いただきました皆様に御礼申し上げます。

文 献

- 1) 東出忠桐：“施設トマトの収量増加を目的とした受光と物質生産の関係の利用”，園学研，17，2，pp.133-146 (2018)
- 2) 斎藤雄司，他：“農業従事者におけるハウス栽培

- 作業時の熱中症および水分補給の実態”，日生氣誌，**54**, 1, pp.13-22 (2017)
- 3) 斎藤雄司，他：“暑熱環境下ハウス栽培作業時における農業従事者の体温調節反応”，日生氣誌，**53**, 2, pp.95-103 (2016)
- 4) 松岡敏生，他：“暑熱環境下における太陽光利用型植物工場での作業負担について”，産業保健人間工学研究，**21**，特別号，pp.36-39 (2019)
- 5) 小野寺 孝一，宮下 充正：“全身持久性運動における主観的強度と客観的強度の対応性：Rating of perceived exertion の観点から”，体育学研究，**21**, 4, pp.191-203 (1976)
- 6) 山本哲史：“運動処方 of 最近の考え方”，慶応義塾大学スポーツ医学研究センター紀要，pp.33-39 (1999)
- 7) E. A. MÜLLER: “Occupational work capacity”, *Ergonomics*, Vol.5, Issue, **3**, 445-452 (1962)