

博士論文

夏季のミニトマト生産における暑熱対策に関する研究

令和7年3月

香西 修志

岡山大学大学院

環境生命科学研究科

目 次

緒言

第 1 章 外部細霧冷房が夏季のミニトマト栽培における温室内の環境および生育・収量に及ぼす影響

第 1 節 外部細霧冷房が温室内の温湿度に及ぼす影響

第 2 節 外部細霧冷房処理がミニトマトの生育・収量に及ぼす影響

第 3 節 総合考察

第 2 章 遮光資材の違いが夏季のミニトマト栽培における温室内環境および収量に及ぼす影響

第 1 節 遮光資材の色の違いが夏季の温室内環境とミニトマトの収量に及ぼす影響

第 2 節 遮光資材の特性調査

第 3 節 総合考察

第 3 章 施設栽培ミニトマト 7 月定植長期どり作型における高収益化のための栽植密度コントロールの影響評価と最適栽植密度のシミュレーション

第 1 節 夏季の密植が生育と収量に及ぼす影響

第 2 節 群落光合成量の推定と最適栽植密度のシミュレーション

第 3 節 総合考察

総括

謝辞

引用文献

緒 言

国内のミニトマト生産は、生産量、栽培面積ともに堅調な伸びを示しており（農林水産省，2023a）、今後も食の外出化、簡便化の流れから、さらにその重要性が増すと予想される（中野，2020b）。一方、市場取引価格は時期による変動が大きく、9～10月が1年のうちで最も高くなっており（農林水産省，2023b）、生産者の収益向上のためには、この時期に多収が見込める栽培体系が必要である。ミニトマトの成熟に必要な日平均気温の積算温度は700～800℃日であり、概ね夏季では1か月かかる（中野，2020a）ことから、9月から一定の収量を得るためには、7月中に定植を行う必要がある。

しかしながら、近年はトマト黄化葉巻病対策のため温室の開口部に0.4 mm目合以下の防虫ネットを展張することから、換気効率が低下し、夏季には温室内が非常に高温となる。そのため、強光条件も相まって、個葉の葉面積が小さくなる（フューヴェリンク・オケロー，2020；Verkerk，1955）ほか、花器や花粉が障害を

受けることによる着果率低下や，小粒果，着色不良果など障害果の発生により減収する（岩堀・高橋，1964；鈴木ら，2013）．また，高温により飽差も上昇し，過度な蒸散による萎凋を避けるために気孔を閉鎖することで植物体内外でのガス交換が抑制されるため，光合成能力が低下する（島田，1992）．その結果，さらなる生育不良や減収を招く可能性がある．したがって，夏季に温室内で栽培を行うためには，効果的な暑熱対策技術が必要となる．

温室内の気温上昇を抑制する技術としては，遮光（古在ら，2016），ヒートポンプ（林ら，1983；川嶋2009），パッドアンドファン（山口，2020），細霧冷房（林，2020）が挙げられるが，それぞれ課題もある．遮光は温室内へ入る日射量を減らすことで温度を下げる方法であり，安価で導入しやすいものの，外気温以下に下げることにはできないうえ，遮光率が高い場合は，収量や糖度低下のリスクがある（Wadaら，2006）．ヒートポンプは，日中の冷房は能力的に難しく，夜間の冷房用として利用することが現実的である．細霧冷房，パッドアンドファンは水を使うため湿度上昇，飽

差低下が可能である（林，2020）。しかし，細霧冷房については，未蒸発の細霧により温室内が過湿となるため，間欠運転が必要となり温度・湿度の変動が大きくなる（林ら，1998；石井，2015）。一方，パッドアンドファンについては，作物に濡れが生じないことや，急激な温度変化が少ないといった利点がある一方で，温室内では日射熱が外部から加わるためパッドから換気扇側への気流方向に沿って室内昇温がある（三原・小牧，1973）こと，導入コストが細霧冷房システムの設備費に比べて2.0～2.5倍程度と大きい（山口，2020）こと，装置の構造上，新規施設への導入に限定される（渡邊ら，2014）といった問題点がある。したがって，細霧冷房とパッドアンドファンの両方の利点を兼ね備えた昇温抑制技術が望まれており，細霧冷房を他の技術と組み合わせることで新たな昇温抑制技術の開発が進められている。例えば，排出型換気扇，外気導入型ファンと送風ダクトを組み合わせた外気導入型の細霧冷房装置が検討されており，換気量が増えることで冷却効果も高まるという結果が得られている。一方で，細霧ノズル設置の高さを十分確保できない温室で

は、植物体に濡れが発生したり、送風ダクトが作業に支障をきたしたりといった問題もある（東ら，2014）。また、温室外側で細霧を噴霧して生成された高湿度の冷却空気を、換気扇で温室内を負圧にし、側窓部から温室内に引き込むことで、温室内気温を外気温以下に低下させることができる「クールサットハウス」（坂谷，2018）も開発されている。この温室は、外部の冷却空気の全量を温室周囲全体から引き込むことができるという特徴を有するため、本装置を連続的に稼働させることで、温室内全体をほぼ均一に冷却することができると考えられる。「クールサットハウス」は温室と外部細霧冷房装置が一体となっているが、外部細霧冷房装置のみを既存の温室へ設置することでコスト削減が可能となる。しかし、パイプハウスへ後付けした際の詳細な温室内環境や植物体に及ぼす影響は未検証である。そこで、効率的かつ効果の高い昇温抑制技術を確立するために、外部細霧冷房の環境特性や、実際に栽培した際の生産性について検討する必要があると考えられる。

一方、外部細霧冷房の導入により収量および収益性

が高まるとしても，一定の初期投資が必要となるため，生産規模などによっては導入が難しい場合も想定される．すなわち，中小規模の生産者にも導入可能な，大きな初期投資を必要としない暑熱対策技術も必要である．

遮光は，前述のとおり比較的安価で容易に導入可能であることから，現在多くの生産者に利用されている技術である．しかしながら，遮光資材には様々な種類があり（後藤，2015），材質によって光透過性や光反射率が異なる（河崎ら，2013）．そのため，温室内の温度や光環境条件にも影響すると考えられる．最近では白色の資材が遮熱資材として利用されることが多く，その主な理由は，光の反射率が高いためと言われている．しかし，そもそも白色であるということは，反射率が高く，かつ表面で乱反射が起こっているという性質があるため，散乱光も多くなっている可能性が考えられるが，遮光資材の色の違いによって温室内の散乱光の光強度（以下，散乱光量）がどう変わるかの明確な知見はない．そこで，比較的導入コストの小さい遮光技術を，より効果的なものにするため，資材の違い

による影響について検討する必要がある。

また、植物は、日射によって地表に降り注がれる熱の一部を、葉からの蒸散作用により潜熱として消費することにより、気温や地表面温度の上昇を抑制できる

(野島・長谷川, 1995)。また、トマトは吸水量のうち95%以上が蒸散に使われる(細野・細井, 2002)。これらのことから、温室内の栽植密度を高め、蒸散量を増加させることにより、新たな機器・資材の導入をせずとも、群落内の温度上昇と高温障害の緩和が可能になると考えられる。さらに、ミニトマトの栽植密度は、現在主流となっている8~9月定植の促成長期どり作型では、栽培期間をとおして2株・m⁻²前後となっている(熊本県野菜振興協会, 2012; 香川県, 1997; 和歌山県農林水産部, 2009)が、これは主に冬季の葉面積指数(LAI)の最適化を主眼とした栽植密度であり、夏秋期の栽植密度は必ずしも適切ではない可能性がある。一方、オランダなどでは、日射量の高い時期に側枝を伸ばし、茎密度を高めることで収量を最適化させる栽培管理方法がとられている(De Koning, 1994)。つまり、日射量の大きい夏季においては、現状の栽植密度

が最適ではなく，密植することで，早期に LAI を確保でき群落の光合成量が増加し多収化できる可能性が高いと考えられる．

以上のことから，生産規模や新たな機器・資材の導入可否など生産者の状況に応じた暑熱対策技術を提案することが望ましいと考え，本研究では導入コストが異なる 3 種類の暑熱対策技術について検討を行った．

まず第 1 章では，効率的かつ効果の高い暑熱対策技術の確立に向け，「クールサットハウス」の外部細霧冷房装置を既存のパイプハウスへ後付けした際の環境特性を明らかにしながら，ミニトマトの生育，収量への影響について検討を行った．具体的には，第 1 節において，外部細霧冷房装置稼働中における温室内の温度，相対湿度変化を調査し，第 2 節において，外部細霧冷房処理がミニトマトの生育，収量に及ぼす影響を調査した．

また，第 2 章では，比較的 low コストで導入可能な対策技術である遮光について，夏季のミニトマト栽培における効果的な遮光資材の利用方法の確立に資するため，異なる色の遮光資材の特性について，特に散乱光

に着目し，温室内環境を評価した．また，散乱光によって温室内の光分布が均一化することにより植物は光を効果的に利用できるため，群落全体の光合成量が増加する（Liら，2014；斎藤ら，1992）．散乱光量の多い遮光資材を見いだすことができれば，昇温を抑制しつつ遮光による収量減少の緩和につながり，商品果率の向上も期待できることから，最終的な収量は増加すると考えられる．したがって，温室内環境と併せてミニトマトの生産性についても検討した．具体的には，第1節において，遮光資材の色の違いが夏季の温室内環境とミニトマトの収量に及ぼす影響について，第2節では，さらなる遮光資材の特性評価として，遮光率および散乱光率について調査した．

また，第3章では，新たな機器・資材の導入を必要としない低コストの暑熱対策技術の開発に向け，9～10月に一定量の収量が見込める7月定植の長期どり作型を前提としたうえで，栽培初期である夏季のみ密植にし，秋に摘心し冬に慣行の栽植密度に減らすことで，夏季における群落内の温度上昇と高温障害を回避しつつ，群落光合成量の増加により多収化が可能となる新

たな栽培体系の開発を試みた。具体的には、まず第1節において、高温期である初期の密植が温室内の環境およびミニトマトの生育と収量に及ぼす影響を評価し、第2節において、夏季におけるミニトマトの最適な栽植密度を明らかにすることを目的として、植物群落における日射量と葉面積に基づいた物質生産の考え方（Monsi・Saeki, 1953）により群落の物質生産量を推定する既報（東出, 2018; 久枝ら, 2007; Saitoら, 2020）の手法を参考に群落光合成量のシミュレーションを行った。

第 1 章 外部細霧冷房が夏季のミニトマト栽培における
温室内の環境および生育・収量に及ぼす影響
第 1 節 外部細霧冷房が温室内の温湿度に及ぼす影
響

温室内の昇温抑制技術として、細霧冷房とパッドアンドファンの両方の利点を兼ね備えた「クールサットハウス」(坂谷, 2018)が開発されている。本装置は、温室外側で細霧を噴霧して生成された高湿度の冷却空気を、換気扇で温室内部を負圧にすることによって側窓部から温室内部に引き込み、これにより温室内部気温を外気温以下に低下させることができる。温室内部を PO フィルム等によって天井側の上部室と栽培室となる下部室の上下 2 室に区画し、PO フィルム等の中央部付近に上部室と下部室を連通させる通気用の隙間(スリット)を設け、上部室内の空気を換気扇で強制排気することで下部室内の空気が通気用の隙間から集中して上部室内に吸引され、その結果、外部の冷却空気の全量を温室周囲全体から引き込むことができるという特徴を有する。本装置を連続的に稼働させることで、温室

内全体をほぼ均一に冷却することができる。しかしながら、短時間内での温度変化や湿度条件などの詳細な温室内環境や植物体に及ぼす影響については十分に解明されておらず、また、外部細霧冷房装置のみを既存の温室へ設置することでコスト削減が可能となるが、パイプハウスへ後付けした際の効果は未検証である。

そこで本節では、「クールサットハウス」の外部細霧冷房装置を既存のパイプハウスへ後付けした際の環境特性を明らかにするため、外部細霧冷房装置稼働中における温室内の温度、相対湿度変化を調査した。

材料および方法

試験は、香川県農業試験場（香川県綾歌郡綾川町）において、透明POフィルム（テキナシ5，タキロンシーアイ（株），厚さ0.15 mm）を展張した丸屋根型単棟パイプハウス（間口6.0 m，奥行き17.0 m，棟高3.5 m，軒高1.9 m，側窓換気幅1.1 m，南北棟）を供試して実施した。側面開口部には0.4 mm目合いの防虫ネット（サンサンネットソフライトSL-4200，日本ワイドクロ

ス（株））を展張した。

1) 外部細霧冷房装置

上記のパイプハウスに次のとおり外部細霧冷房装置を設置した（第 1-1 図，第 1-2 図）。

(1) 外部構造

温室側面から 0.6 m 外側の周囲に，高さ 1.8 m で防虫ネット（目合い 1 mm）を風よけとして設置し，その内側に 1.0 m の高さで細霧ノズル（MS-I-1L，動噴圧力 1.5 Mpa 時の吐出量 $90 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ，（株）DIK アグリワーカーズ）を側面側は 1.5 m おき，妻面側は 1 m おきに噴霧口が温室側に向くよう設置した。また，両妻面の上部に換気扇（RK8436，フルタ電機（株），羽根径 80 cm，最大風量 $330 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ）を設置した。

(2) 内部構造

2.9 m の直管パイプをつなぎ合わせて作成した屋根型の骨組み（棟高 2.2 m）に PO フィルム（ソルーチェ，MKV アドバンス（株），0.1 mm 厚，使用 2 年目）を換気扇より下の位置となるよう展張し，中央付近には，下部室から上部室への通気のための幅 30 cm のスリットを，骨組みと同方向に 1 本設けた。なお，スリット幅

30 cm は、現地事例の聞き取りおよび前年度の予備試験の結果を踏まえて決定した。スリット部分以外の隙間ができるだけなくなるよう、こまめに内張 PO フィルムをパッカーで固定した。

2) 温室内の環境計測

温湿度の測定は 2 回実施し、1 回目は 2020 年 7 月 2 日 15:00～15:10 に、データロガー（RTR-502B、（株）ティアンドデイ）を用いて、温室中央部付近の高さ 1.7 m に設置した通風筒内において 1 秒間隔で測定した。なお測定機器は、別の試験において多点で温湿度を測定する必要があったため、多点測定に適したセンサ兼データロガーとして「RTR-502B」を使用した。測定時はミニトマトを栽培しない条件とし、測定開始の 10 分前から外部細霧冷房装置を稼働させた。

また、2 回目は、2020 年 8 月 21 日 0:00～24:00 に、温湿度センサ（HMP110, VAISALA KK）およびデータロガー（CR-1000, Campbell Scientific, Inc.）を用いて、温室中央部付近の高さ 1.7 m に設置した通風筒内において 10 分間ごとの平均値を測定した。なお、2 回目の測定では、安定性の高い「HMP110」と「CR-1000」の

組合せに切り替えて測定した。外部細霧冷房装置の稼働条件は6:00~18:00の時間帯に温室内気温25℃以上かつ相対湿度80%以下とした。また、同形状の対照温室（遮光率30~35%の白色遮光資材を外部展張）においても温湿度を測定し、いずれの温室も7月10日に2.0本・m⁻²の栽植密度で定植したミニトマトを栽培中の条件であった。

結 果

温室内に植物体がない状態において外部細霧冷房を稼働させ、温湿度を1秒間隔で測定したところ、温度・相対湿度ともに変化は見られず一定で推移した（第1-3図）。また、温室内にミニトマトを栽培している状態で、1日を通しての温湿度を10分間ごとの平均値として測定したところ、外部細霧冷房装置が稼働している時間帯は、対照温室および外気と比較して温度が低下し、相対湿度が上昇した（第1-4図）。なお栽培期間中を通じて、外部細霧冷房装置の稼働による植物体の葉濡れの発生は見られなかった。

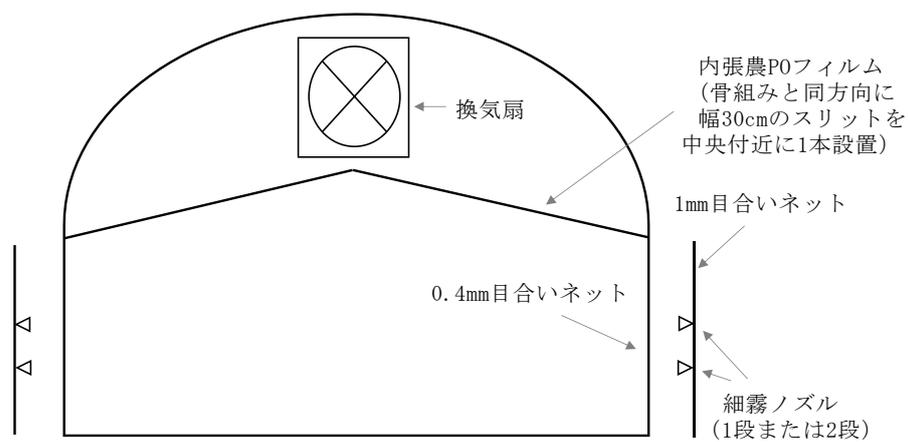
考 察

本節では，夏季のミニトマト栽培の安定生産に向け，外部細霧冷房装置を既存のパイプハウスへ設置した際の環境特性を明らかにした．

外部細霧冷房装置稼働中における温室内の短期的な温湿度変化を調査した．気化冷却の原理により，気温低下と同時に相対湿度および絶対湿度が上昇する

（林，2020）ため，本装置では，温室内に温室周辺の高湿度の冷却空気が導入され，外気より温度は低下し，同時に相対湿度も上昇した（第1-3図，第1-4図）．さらに，本装置は常に外気を導入し，内気を排出し続けることから，通常の細霧装置のような間欠運転（林ら，1998；石井，2015）が不要となり，温度，相対湿度の変化を小さくすることが可能であった．なお，温室内でミニトマトが栽培されている条件であれば，蒸散によって気温上昇が抑制されるとともに相対湿度が上昇する（香西・河崎，2022；野島・長谷川，1995）．本試験では2回の温室内環境測定を行い，いず

れも温室内気温が低下するとともに相対湿度が上昇した（第 1-3 図，第 1-4 図）ことから，ミニトマトの栽培有無に関わらず外部細霧冷房の効果を得られることが明らかとなった。

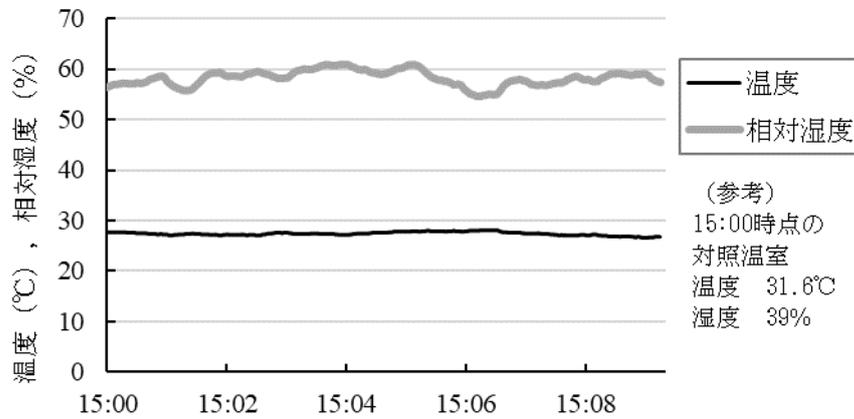


第1-1図 外部細霧冷房装置の概略図

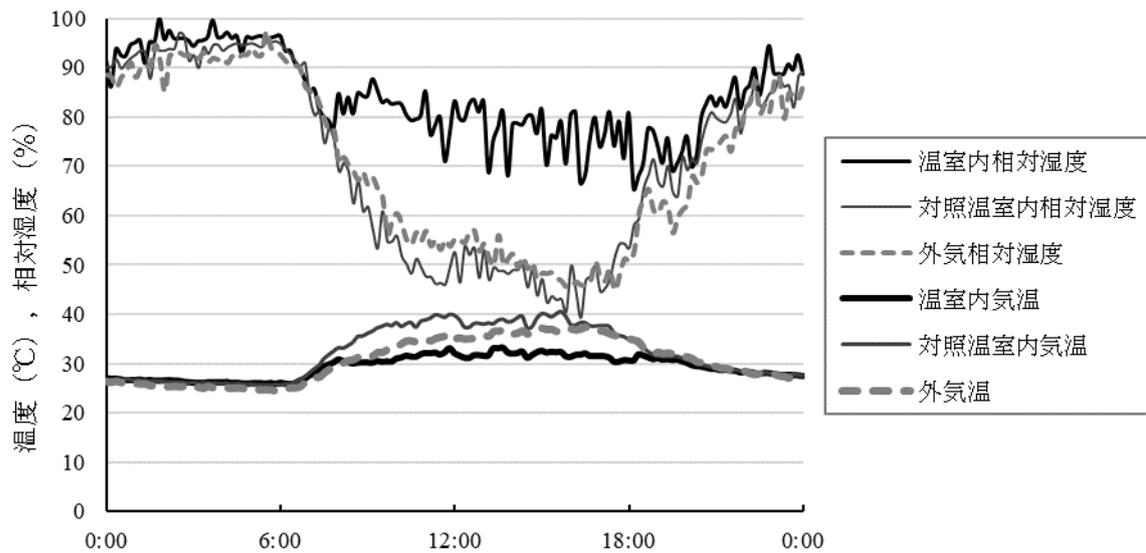


第1-2図 外部細霧冷房装置の設置状況

- A：外部の防虫ネットの設置状況 B：細霧ノズルの設置状況
C：内部構造と内張の設置状況 D：スリットの設置状況



第1-3図 外部細霧冷房処理時の温室内温湿度変化
2020年7月2日測定
データロガーを温室中央部、高さ1.7 mの
通風筒に設置し、1秒間隔で測定した



第1-4図 外部細霧冷房が温室内温湿度に及ぼす影響
2020年8月21日測定
温湿度センサおよびデータロガーを、温室中央部の高さ1.7m
および温室外の西側に高さ1.4 mの通風筒に設置し、10分間ごと
の平均値を測定した

第 2 節 外部細霧冷房処理がミニトマトの生育・収量に及ぼす影響

全節の試験において，植物が栽培されていない条件での短期的な温湿度変化を明らかにした．本節では，植物が栽培されている条件での長期的な温室内環境を評価するとともに，ミニトマトの生育，収量に及ぼす影響を調査した．

材料および方法

1) 処理内容

前節の試験と同一のパイプハウス 2 棟を供試し，それぞれ外部細霧冷房区と遮光区とした．

外部細霧冷房区は，予備調査の結果から十分な冷却効果が期待できたため，遮光は行わず，外部細霧冷房の制御のみとした．稼働条件は，6：00～18：00 の時間帯で温室内気温 25℃ 以上かつ相対湿度 80% 以下とし，細霧ノズルは前節の試験で設置した 1.0 m の高さに加え，1.3 m の高さにも設置した．稼働期間 2020 年 7 月

10日～10月4日および2021年4月26日～5月31日で、外部細霧冷房装置が稼働しない秋～春にかけては、内張りのスリットをふさぐとともに、日中は日射を確保できるよう時間帯（7:00～17:00）に応じて開閉した。

遮光区は、遮光率30～35%の白色遮光資材（ら～くらくスーパーホワイトライト L35、日本ワイドクロス（株））を7月10日～9月16日の期間、温室外部に展開した。また、秋～春にかけては、外部細霧冷房区と同様の時間帯で内張り（棟高3.2 m）を開閉した。

2) 栽培概要

耕種概要は両区共通であり、供試品種は、ミニトマト（*Solanum lycopersicum* L.）‘CF千果’、‘TY千果’（タキイ種苗（株））とした。2020年6月15日、128穴セルトレーに培養土（与作 N-150、ジェイカムアグリ（株））を充填し播種を行い、フッ素樹脂フィルムを展開した温室内で管理した。その後、6月29日に培養土（愛菜1号、片倉コープアグリ（株））を充填した9 cm黒ポリポットへ鉢上げを行い、7月10日に定植した。栽植様式は、畝幅160 cm、株間25 cm、2.5株・m⁻¹と

し，栽培方式は，培養液（香川ゆうらく肥料 A，N：
P₂O₅：K₂O = 11：12：33 および香川ゆうらく肥料 B，
N：P₂O₅：K₂O = 8：0：2，いずれも OAT アグリオ
（株））を用いた養液土耕栽培とし，生育に応じて，
EC1.1～1.8 dS・m⁻¹（うち原水 EC0.4 dS・m⁻¹）の濃度
で 0.5～1.9 L/株/日ずつ適宜給液を行った．また，
整枝は 1 本仕立て，2 条振り分け斜め誘引とし，葉数
25～30 枚程度となるよう下葉から随時摘葉した．着果
処理として，0.15% パラクロロフェノキシ酢酸（4-
CPA，トマトトーン，日産化学（株））150 倍液を 7 日
間隔で噴霧した．なお，摘心は 4 月 5 日に行った．

温室の温度管理は，側窓換気温度 20℃（10 月 26 日
～4 月 25 日までは 27℃），暖房設定温度 12℃とした．
炭酸ガス施用は，LP ガス燃焼式の発生装置を用いて，
10 月 26 日～4 月 25 日の期間，7：00～17：00 の時間帯
に，26℃以下かつ 600 ppm 以下であれば 800 ppm にな
るまで稼働するよう制御した．なお，供試株数は両区
両品種ともに，1 反復当たり 12 株で 4 反復とした．

3) 温室内の環境計測

温室内の気温および相対湿度は，それぞれ温室中央

部の高さ 1.5 m の位置に通風筒を設置し，温度・湿度データロガー（RTR-502B，（株）ティアンドデイ）を用いて，8月1日～31日の期間に10分間隔で測定し，これらの値から飽差（HD）を求めた．

温室内の照度は，データロガー（TR-74Ui，（株）ティアンドデイ）を用いて，それぞれ温室中央部のミニトマト群落上（高さ 1.7 m）にセンサを設置し，8月1日～7日の期間，9：00～15：00に15分間隔で測定した．

4) 生育調査

処理期間中における花房と葉の出現速度を調査するため，第1花の開花が認められた花房を含めた開花花房数と，葉長 3 cm 以上の展開葉数を，各区4株の4反復について8月14日～9月25日の期間，2週間おきにカウントした．また，収穫果房数は，栽培終了後にカウントした．

葉面積は，第1花の開花が認められた上位1花房目と，上位5花房目および上位9花房目の直上葉を，それぞれ上位葉，中位葉，下位葉とし，9月28日にサンプリングを行った．これらを葉面積計（AREA METER

MK2, Delta T Devices 社) で測定した。その後, 乾物重 (80℃で48時間以上乾燥) を計測し, 比葉面積を算出した。また, 葉のサンプリングによる株への影響を抑えつつ, 秋季以降の葉面積の傾向を把握することを目的として, 上位3花房目, 上位5花房目および上位7花房目の直上葉の葉長と葉幅を, 11月20日に計測した。なお, これらは各区2株の4反復で調査した。

5) 果実調査

収穫調査は, 8月21日～翌年5月31日の期間, 週2～3回ずつ行い, 商品果と規格外果に分けて, それぞれの個数および重量を調査した。なお, 湿度上昇により裂果の増加が懸念されたため, 規格外果を裂果とその他(小果, チャック果)で区分した。また, 糖度調査は, 月1回収穫調査の際に行い, 各区の15g程度の3果を4反復で供試した。縦方向に2分割し, 断面から採取した果汁3滴をデジタル糖度計(PR-101α, (株)アタゴ)で測定した。

結果

栽培期間のうち8月の外部細霧冷房区の温室内環境を遮光区と比較したところ、気温については、日平均で 2.6°C 、昼平均（6:00～18:00）で 4.9°C 、日最高で 7.4°C 低かった（第1-1表）。相対湿度については、日平均で12.9ポイント、昼平均で23.0ポイント、日最低で24.7ポイント高かった。飽差（HD）については、日平均で $6.2\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、昼平均で $11.4\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、日最高で $16.7\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 低かった。なお、気温、飽差の全項目で外部細霧冷房区が外気よりも低く、相対湿度の全項目で、外部細霧冷房区が外気よりも高かった。

外部細霧冷房装置稼働中の温室内照度は、外部細霧冷房区が遮光区よりも4%高かった（第1-2表）。

定植から9月にかけての開花花房数、葉数について、‘CF千果’では8月14日の開花花房数以外は差がなかったが、‘TY千果’では開花花房数、葉数ともに外部細霧冷房区が多かった（第1-3表）。8月14日から28日にかけての増加葉数は、両品種とも外部細霧冷房区が多かった。なお、花房間葉数に処理による差はなかった。

9月28日調査時点の葉面積，乾物重，比葉面積は，上位葉と中位葉で外部細霧冷房区が大きかった（第1-4表）。下位葉は，葉面積，乾物重には差がなく，比葉面積のみ外部細霧冷房区が大きかった。また，11月20日調査時点の葉長，葉幅について，いずれの葉位においても外部細霧冷房区が大きい傾向であり，特に‘CF千果’で顕著であった（第1-5表）。

収量について，商品果個数は差がなく，平均果重が大きかった外部細霧冷房区で商品果重量が多かった（第1-6表）。その傾向は‘CF千果’で顕著であり，商品果重量で約20%の差があった。また，裂果は‘TY千果’で差がなく，‘CF千果’では遮光区が多かった。月別収量について，‘CF千果’では，外部細霧冷房区で8月，10月，12～2月および5月の商品果重量が多かった（第1-7表）。‘TY千果’では，8～10月，12月および1月の商品果重量が多かった。

糖度は，9月14日の調査時点では，外部細霧冷房区が1°程度低かったが，その後は，一定の傾向はなく，期間を通じて大きな差はなかった（第1-8表）。

考 察

本節では，植物を栽培している条件での長期的な環境特性を明らかにしながら，ミニトマトの生育，収量への影響について検討した．栽培期間中の温度，相対湿度，飽差は大幅に低下しており，ミニトマトの生育によって環境が改善されていたことが確認された．その結果，大幅な収量増加につながったと考えられるため，以下，その要因について個々に考察する．

1) 温度の低下

トマトの生育適温は $25\sim 30^{\circ}\text{C}$ であり（河合，2021）， 30°C 以上の温度では，高温になるほど光合成が低下する（鳥生ら，1982）．本試験での8月の温室内気温は，遮光区では昼平均が 34.2°C ，日最高が 38.8°C となっており（第1-1表），光合成が低下していたと考えられた．一方，外部細霧冷房区では昼平均が 29.3°C ，日最高が 31.4°C と遮光区よりも低く抑えられており，光合成低下が軽減されたと考えられた．

また，高温条件では，個葉の拡大速度は増加するものの，高温のために葉が拡大する期間は大幅に短くな

り，その結果，個葉の葉面積は小さくなる（フューヴェリンク・オケーロ，2020；Verkerk，1955）．従って，気温の高かった遮光区で葉面積が小さく，気温の低かった外部細霧冷房区で葉面積が大きくなったと考えられた（第1-4表）．これまでの報告で，収量を増加させるためには，十分なLAIを確保し，群落受光量を増加させることが重要（東出，2018；金子ら，2015）とされており，また，夏季の慣行ミニトマト栽培では，光合成量の観点での適正LAIよりも低いことが確認されている（香西・河崎，2022）．本試験では，外部細霧冷房区の葉面積が大きくなったことから，適正LAIに近づき，受光量が増加したと考えられた．また，葉長と葉幅，または葉幅のみから個葉面積を推定できることが明らかにされている（樋江井，2018）．11月20日時点の葉長，葉幅は，株のいずれの位置においても外部細霧冷房区が大きかった（第1-5表）ことから，この時点の葉面積も外部細霧冷房区が大きかったと推定される．つまり，外部細霧冷房装置の稼働を10月4日に停止したにもかかわらず，11月20日時点での葉面積が大きかった．この要因としては，外部細霧冷房処理中

の条件のよい環境で分化した葉が展開したためと、それまでの葉面積拡大で受光量が増加していた可能性が考えられる。さらに、ミニトマトの成熟に必要な日平均気温の積算温度は700～800℃日であり、冬季では概ね3か月かかる（中野，2020a）ため、8～11月にかけての葉面積拡大の効果が翌年1～2月までの増収に寄与したものと考えられた。

葉の展開速度は、主に温度により影響され、17～23℃ではほぼ温度に比例して増加する（De Koning, 1994）。しかし、今回の結果では、温度の低い外部細霧冷房区で‘TY千果’の開花花房数および葉数が多くなっており、‘CF千果’についても一定期間の増加葉数が多くなっていった（第1-3表）。このことから、一定以上の高温条件下では、葉の展開速度が抑制されるが、外部細霧冷房区では、温度低下により葉の展開速度抑制が緩和され、葉数が増加した可能性が示唆された。なお、葉の展開が抑制される温度や原因については、今後の研究課題である。

また、果実重については、気温が低かった外部細霧冷房区で大きく、気温が高かった遮光区で小さかった

(第 1-6 表)。このことは、夏季高温条件下の栽培において、高温ほど果実重が小さくなるという長菅ら(2018)の報告と一致する。

以上より、温室内の温度低下の影響として、葉面積の拡大に伴い受光量が増加するとともに、平均果重が大きくなり、これらにより収量が増加したと考えられた。

2) 湿度の上昇，飽差の低下

夏季の温室内のように著しく飽差が大きく湿度が低い場合、植物は気孔を閉じることでガス交換を抑制し、光合成能力が低下する(島田, 1992)。本試験では、外部細霧冷房処理により、温度の低下に伴い飽差(HD)も大幅に低下した(第 1-1 表)。これにより、気孔が開放され、二酸化炭素の吸収量が増加し、葉面積や収量の増加につながったと考えられる。

また、外部細霧冷房により平均果重が増加した(第 1-6 表)ことの要因については、温度の低下に加えて、湿度の影響もあると考えられる。つまり、湿度上昇に伴い、植物体からの蒸散は急激に低下し(長岡ら, 1984)、それに伴い、果実への水分流入量が増加し平均

果重が大きくなるという木野本ら（2013）の報告があり，本試験の結果はこれと一致する．また，9月に糖度が低下した（第1-8表）ことについても，同様の原因と考えられた．

3) 温室内日射量

外部細霧冷房装置の稼働期間は，温室内にPOフィルムを展張するが，本試験では温室外部の遮光資材を展張していない．そのため，外部細霧冷房区の温室内照度は高かったが，その差はわずか4%であった（第1-2表）．これは，両区ともに使用2年目のPOフィルムであったものの，外部細霧冷房稼働中は常時通風しており，前年のものも含め砂埃などの付着が多かったためと考えられた．

以上より，植物が栽培されている条件での長期的な温室内環境を評価するとともに，ミニトマトの生育，収量に及ぼす影響を調査したところ，外部細霧冷房により，大幅な温度低下と相対湿度上昇効果が確認され，葉の発生速度や個葉面積が増加した．さらには過剰な蒸散が抑えられることにより，平均果重が増加し，生産性が向上した．なお，効果には品種間差があり，品種選定によっ

て収量をより高めることが可能であると考えられた。

第1-1表 外部細霧冷房が温室内の気温、相対湿度および飽差（HD）に及ぼす影響^z

区名	気温（℃）			相対湿度（％）			飽差（g・m ⁻³ ）		
	日平均	昼平均 ^y	日最高	日平均	昼平均	日最低	日平均	昼平均	日最高
外部細霧冷房区	28.1	29.3	31.4	85.1	81.6	66.2	4.3	5.5	10.6
遮光区	30.7	34.2	38.8	72.2	58.6	41.5	10.5	16.9	27.3
（参考）外気	29.5	32.2	35.8	71.3	60.6	44.3	9.7	14.4	22.5

^z各項目は、2020年8月1日～8月31日の1日ごとの数値を平均

^y昼平均は、外部細霧冷房装置の稼働時間帯（6～18時）の平均

第1-2表 外部細霧冷房装置が温室内照度に及ぼす影響

区名	遮光 ^z	内張り ^y	照度 ^x (lx)
外部細霧冷房区	無し	閉	44,264 (104) ^w
遮光区	有り	開	42,765

^z「ら～くらくスーパーホワイトライト L35」（日本ワイドクロス（株））

^y「ソーチェ」（三菱ケミカルアグリドリーム（株），使用2年目）

^x温室中央部付近の高さ1.7 mの1か所において、8/1～8/7の9：00～15：00の時間帯に15分間隔で測定した温室内照度の平均値

^w（ ）内の数値は遮光区対比

第1-3表 外部細霧冷房がミニトマトの開花・花房数および葉数に及ぼす影響

区名	品種	8/14			8/28			9/11			9/25				
		開花 花房数 (花房)	葉数 (枚)	第1花房 下葉数 (枚)	開花 花房数 (花房)	葉数 (枚)	増加 葉数 ^z (枚)	開花 花房数 (花房)	葉数 (枚)	増加 葉数 (枚)	開花 花房数 (花房)	葉数 (枚)	増加 葉数 (枚)	最上位開花 花房上葉数 (枚)	花房間 葉数 ^y (枚)
外部細霧冷房区	CF千果	5.9	26.1 b ^w	5.4	8.6 a	33.7 b	7.6	10.9 a	40.1 b	6.4	12.9 a	45.1 b	5.0	4.7	3.0
	TY千果	5.8	27.6 a	8.3	8.6 a	35.9 a	8.3	10.8 a	42.0 a	6.1	12.6 a	47.3 a	5.3	4.1	3.0
	CF千果	5.8	26.0 b	5.6	8.6 a	33.1 b	7.1	10.8 a	39.4 b	6.3	12.8 a	44.7 b	5.3	4.4	2.9
	TY千果	5.3	26.3 b	8.7	7.6 b	33.4 b	7.2	9.8 b	39.9 b	6.4	11.6 b	45.3 b	5.4	4.5	3.0
分散分析 ^x	処理	**	***	n.s.	**	***	***	**	***	n.s.	**	***	n.s.	n.s.	n.s.
	品種	**	***	***	**	***	*	**	***	n.s.	***	***	n.s.	n.s.	*
	交互作用	n.s.	**	n.s.	**	***	n.s.	**	*	n.s.	**	*	n.s.	n.s.	n.s.

^z前回調査時点から増加した葉数

^y花房間葉数 = (葉数 - 最上位開花花房上葉数 - 第1花房下葉数) / (開花花房数 - 1)

^x分散分析：繰り返しのある二元配置分散分析 (n=16) により, ***, **, *はそれぞれ0.1%, 1%, 5%水準で有意差あり, n.s.は有意差なしを示す

^w同列内の異符号間にはTukeyの多重検定により5%水準で有意であることを示す

第1-4表 外部細霧冷房がミニトマトの葉面積に及ぼす影響^z

区名	品種	開花上位1花房目 ^y			開花上位5花房目			開花上位9花房目		
		葉面積 (cm ²)	乾物重 (g)	比葉面積 (cm ² ・g ⁻¹)	葉面積 (cm ²)	乾物重 (g)	比葉面積 (cm ² ・g ⁻¹)	葉面積 (cm ²)	乾物重 (g)	比葉面積 (cm ² ・g ⁻¹)
外部細霧冷房区	CF千果	29.5	0.16	181	66.6	0.55	123	214.9	2.30	93
	TY千果	34.9	0.16	211	101.3	0.76	136	253.8	2.65	96
遮光区	CF千果	9.6	0.07	138	33.5	0.31	108	163.0	1.95	84
	TY千果	23.5	0.14	170	60.3	0.51	119	257.8	2.74	94
分散分析 ^x	処理	***	**	***	***	***	**	n.s.	n.s.	*
	品種	*	n.s.	***	***	***	*	**	**	*
	交互作用	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

^z2020年9月28日に各花房の直上葉をサンプリングし計測（上位1花房目は3～5花開花）

^y第1花の開花が認められた花房を上から数えて1番目の花房

^x繰り返しのある二元配置分散分析 (n=8) により, ***, **, *はそれぞれ0.1%, 1%, 5%水準で有意差あり, n.s.は有意差なしを示す

第1-5表 外部細霧冷房がミニトマトの葉長および葉幅に及ぼす影響^z

区名	品種	開花上位3花房目 ^y		開花上位5花房目		開花上位7花房目	
		葉長 (cm)	葉幅 (cm)	葉長 (cm)	葉幅 (cm)	葉長 (cm)	葉幅 (cm)
外部細霧冷房区	CF千果	35.9 a ^w	26.3 a	33.8	27.5 b	26.4	21.3 b
	TY千果	34.4 a	28.3 a	36.9	33.0 a	29.3	24.9 a
遮光区	CF千果	27.4 b	19.1 b	25.6	17.4 c	22.3	14.7 c
	TY千果	32.2 ab	27.1 a	32.5	27.8 b	28.2	24.6 ab
分散分析	処理	***	**	***	***	*	***
	品種	n.s.	***	***	***	***	***
	交互作用	*	*	n.s.	*	n.s.	**

^z2020年11月20日に各花房の直上葉を計測

^y第1花の開花が認められた花房を上から数えて3番目の花房

^x繰り返しのある二元配置分散分析 (n=8) により, ***, **, *はそれぞれ0.1%, 1%, 5%水準で有意差あり, n.s.は有意差なしを示す

^w同列内の異符号間にはTukeyの多重検定により5%水準で有意差があることを示す

第1-6表 外部細霧冷房がミニトマトの収量に及ぼす影響

区名	品種	商品果			規格外果			
		個数 (個/株)	重量 (g/株)	平均果重 (g)	裂果		その他 ^z	
					個数 (個/株)	重量 (g/株)	個数 (個/株)	重量 (g/株)
外部細霧冷房区	CF千果	725	10,028 c ^x	13.8 b	34 b	521 b	13	88
	TY千果	809	11,988 a	14.8 a	9 c	143 c	12	127
遮光区	CF千果	696	8,347 d	12.0 c	51 a	612 a	19	104
	TY千果	804	11,118 b	13.8 b	10 c	150 c	16	141
分散分析 ^y	処理	n.s.	***	***	***	*	***	n.s.
	品種	***	***	***	***	***	n.s.	***
	交互作用	n.s.	*	**	***	*	n.s.	n.s.

^z小果, チャック果

^y繰り返しのある二元配置分散分析 (n=4) により, ***, **, *はそれぞれ0.1%, 1%, 5%水準で有意差あり, n.s.は有意差なしを示す

^x同列内の異符号間にはTukeyの多重検定により5%水準で有意差があることを示す

第1-7表 外部細霧冷房がミニトマトの月別収量に及ぼす影響

	商品果重量 (g/株)						分散分析 ²				
	外部細霧冷房区		遮光区				処理	品種	交互作用		
	CF千果	TY千果	CF千果	TY千果	CF千果	TY千果					
8月	365	261	183	94	***	**	n.s.				
9月	1,105	bc ^y	1,745	a	908	c	1,271	b	***	***	*
10月	1,039		995		949		803		**	*	n.s.
11月	549		664		656		869		***	***	n.s.
12月	641	c	935	a	381	d	816	b	***	***	*
1月	936	b	1,166	a	597	c	1,006	b	***	***	**
2月	1,114	b	1,217	ab	795	c	1,364	a	n.s.	***	***
3月	1,275		1,440		1,247		1,458		n.s.	***	n.s.
4月	1,597		1,962		1,560		1,825		n.s.	***	n.s.
5月	1,407	b	1,603	a	1,071	c	1,612	a	**	***	***
合計	10,028	c	11,988	a	8,347	d	11,118	b	***	***	*

²繰り返しのある二元配置分散分析 (n=4) により, ***, **, *はそれぞれ0.1%, 1%, 5%水準で有意差あり, n.s.は有意差なしを示す

^y同行内の異符号間にはTukeyの多重検定により5%水準で有意差があることを示す

第1-8表 外部細霧冷房がミニトマトの糖度 (°Brix) ²に及ぼす影響

区名	品種	9/14	10/12	11/16	12/14	1/18	2/12	3/12	4/16	5/24	
外部細霧冷房区	CF千果	5.5	6.4	7.7	7.2	7.5	8.4	b ^x	8.9	8.4	7.6
	TY千果	6.6	7.5	8.2	7.8	8.0	9.2	a	8.8	8.8	8.4
遮光区	CF千果	6.3	6.6	7.2	7.8	6.9	8.5	b	8.9	8.5	7.7
	TY千果	7.7	7.6	8.0	7.9	7.8	8.7	ab	8.8	8.9	8.4
分散分析 ^y	処理	***	n.s.	*	**	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	品種	***	***	***	*	***	***	n.s.	*	***	
	交互作用	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	

²果実を縦方向に分割し, 断面から果汁を3滴採取し, 糖度計 ((株) アタゴ, PR-101a) を用いて測定

^y繰り返しのある二元配置分散分析 (n=12) により, ***, **, *はそれぞれ0.1%, 1%, 5%水準で有意差あり, n.s.は有意差なしを示す

^x同列内の異符号間にはTukeyの多重検定により5%水準で有意差があることを示す

第 3 節 総合考察

第 1 章では，効率的かつ効果の高い暑熱対策技術の確立に向け，外部細霧冷房の環境特性を明らかにしながら，ミニトマトの生育，収量への影響について検討を行った。

その結果，外部細霧冷房により，外気と比較して温室内の温度が低下するとともに相対湿度が上昇し，いずれも変動は小さく抑えられた。これにより，葉および花房の発生速度が増加するとともに，個葉面積が大きくなることで受光量が増加したと考えられた。さらに，高温条件の緩和と過剰な蒸散が抑えられることにより，平均果重が増加し生産性が向上した。

外部細霧冷房は，連続運転が可能であること，葉濡れの発生がないことが，従来の温室内で噴霧する細霧冷房と大きく異なる。細霧冷房の連続運転が間欠運転よりも収量性に優れるという明確な報告はないものの，飽差をフィードバック制御する水蒸気飽差インテリジェントコントローラが開発され，その増収効果が示されている（渡邊ら，2016）。また，葉濡れの発生

は、病害の発生リスクを高めるだけでなく、光合成の観点からも、気孔でのガス交換阻害や Rubisco の量の減少により光合成機能が低下するとの報告（半場・守屋，2003）があり，外部細霧冷房はこれらの点で有利であると考えられる．

なお，連続運転が可能な点，葉濡れの発生がない点については，パッドアンドファンも同様である．ただし，パッドアンドファンは，装置の構造上，新規施設への導入に限定される（渡邊ら，2014）とともに，導入コストが，細霧冷房システムの設備費に比べて 2.0～2.5 倍程度大きい（山口，2020）．外部細霧冷房装置を既存温室に後付けする場合の導入コストは定まっていないものの，従来の細霧冷房装置に換気扇と内張を追加する程度で済むことを勘案すると，外部細霧冷房の方が有利であると考えられた．なお，外部細霧冷房装置のさらなる低コスト化，他の昇温抑制技術との組合せ，経営的により有利な作型の検証，さらには他品目への応用が今後の研究課題である．

第 2 章 遮光資材の違いが夏季のミニトマト栽培における温室内環境および収量に及ぼす影響

第 1 節 遮光資材の色の違いが夏季の温室内環境とミニトマトの収量に及ぼす影響

第 1 章では、効率的かつ効果の高い暑熱対策技術の確立に向け、外部細霧冷房の環境特性を明らかにしながらミニトマトの生育および収量への影響について検討を行った。外部細霧冷房は、温室内の温度抑制効果、相対湿度上昇効果が高く、装置のみを既存の温室へ設置することでコスト削減が可能となるものの、一定の導入コスト必要であり、中小規模の生産者には導入が難しい。一方、遮光については、温室内へ入射する熱・エネルギーを削減する手段であり、低コストで導入可能な技術である（古在ら，2016）。このことから、現在多くの生産者に利用されている。しかし、日射量の減少による減収（Wadaら，2006）のリスクがあるほか、色や素材などの遮光方法が生産者により異なるため、遮光資材の効果的な利用方法を示す必要がある。

遮光資材には様々な種類があり（後藤，2015），材質によって光透過性や光反射率が異なる（河崎ら2013）．そのため，遮光資材の種類が温室内の温度や光環境条件にも影響すると考えられる．最近では白色の資材が遮熱資材として利用されることが多く，その主な理由は，光の反射率が高いためと言われている．しかし，そもそも白色であるということは，反射率が高く，かつ表面で乱反射が起こっているという性質があるため，散乱光も多くなっている可能性が考えられるが，遮光資材の色の違いによって温室内の散乱光量がどう変わるかの明確な知見はない．

そこで本研究では，夏季のミニトマト栽培における効果的な遮光資材の利用方法の確立に資するため，異なる色の遮光資材の特性について，特に散乱光に着目し，温室内環境を評価した．また，散乱光によって温室内の光分布が均一化することにより植物は光を効果的に利用できるため，群落全体の光合成量が増加する（Liら，2014；斎藤ら，1992）．散乱光量の多い遮光資材を見いだすことができれば，昇温を抑制しつつ遮光による収量減少の緩和につながり，商品果率の向上も

期待できることから，最終的な収量は増加すると考えられる．したがって，温室内環境と併せてミニトマトの生産性についても検討した．具体的には，遮光資材の色の違いが夏季の温室内環境とミニトマトの収量に及ぼす影響について調査した．

材料および方法

1) 処理内容

試験は，農研機構西日本農業研究センター四国研究拠点（現在：善通寺研究拠点，香川県善通寺市）において，透明 PO フィルム（厚さ 0.15 mm，花野果，住化積水フィルム（株））を展張した丸屋根型単棟パイプハウス（間口 5.4 m，奥行き 10 m，棟高 3.3 m，軒高 1.8 m，側窓換気幅 1.1 m，南北棟）を 3 棟供試して行った．供試資材には製造・販売会社の規格表に示されている遮光率で約 40% の 3 種類の色の遮光資材を用い，白色資材（以下，白色区）として，「ワリフ明涼 40」（ポリエチレン製不織布，ENEOS テクノマテリアル（株）），銀色資材（以下，銀色区）として，「ダイオミ

ラー 40HB-6」(ポリエチレン・ポリエステル・アルミ蒸着，ラッセル織，ダイオ化成(株))，黒色資材(以下，黒色区)として「ダイオネット黒 410」(ポリエチレン，カラミ織，ダイオ化成(株))を1棟ずつ外部から被覆した．なお，遮光処理期間は2020年7月20日～9月18日とした．供試品種は，ミニトマト(*Solanum lycopersicum* L.) ‘CF千果’，‘TY千果’(タキイ種苗(株))，および単為結果性品種‘エコスイート’(愛三種苗(株))で，各品種・各区ともに1反復当たり12株の2反復とした．

2) 耕種概要

2020年6月10日，培養土(土太郎，スミリン農産工業(株))を充填した72穴セルトレーに播種し，閉鎖型育苗装置(苗テラス，三菱ケミカルアクア・ソリューションズ(株))内で，日長16h，昼温25℃/夜温18℃，CO₂濃度1,000ppmの環境とし，EC1.6dS m⁻¹の培養液(ハイテンポ Ar，N:P₂O₅:K₂O=7.3:0:3およびハイテンポ Cu，N:P₂O₅:K₂O=0:4.5:6.5，いずれも住友化学(株)，ハイテンポ ArとCuを1:3で混入)で管理した．

3週間後の7月1日に、本葉4枚となった苗を、幅55 cm、深さ17 cmの隔離型養液土耕栽培槽に株間25 cm（栽植密度 2.67株 m^{-2} ）で定植し、その後は培養液（タンクミックスA、 $\text{N} : \text{P}_2\text{O}_5 : \text{K}_2\text{O} = 10 : 13 : 33$ およびタンクミックスB、 $\text{N} : \text{P}_2\text{O}_5 : \text{K}_2\text{O} = 8 : 0 : 2$ 、いずれもOATアグリオ（株））を生育に応じて、 $\text{EC}1.2 \sim 1.5 \text{ dS m}^{-1}$ の濃度で $0.3 \sim 2.0 \text{ L/株/日}$ の範囲で培地から排液が確認できる程度に量を調整しながら適宜給液した。整枝は1本仕立て、2条振り分け斜め誘引とし、葉数18～25枚程度となるよう下葉から随時摘葉した。着果処理として、9月末まで0.15%パラクロロフェノキシ酢酸（4-CPA、石原トマトトーン、石原バイオサイエンス（株））150倍液を7日間隔で、第1花の開花が認められた花房を含めた上位3花房に噴霧した。温室の温度管理は、換気温度 25°C とし、側窓のみで管理した。

3) 調査項目

温室内光環境の調査については、透過光の光スペクトルを携帯型分光放射計（MS-720、英弘精機（株））で2020年8月14日の13:00～14:00に、全天日射量を温室内の1.8 mの高さに設置した日射センサ（ML-01、

英弘精機（株）で10分毎に測定した。散乱光量の測定は、8月6、12、13日の11:00～12:00に、温室内の1.8 mの高さに日射センサ（ML-01、英弘精機（株））を設置し、その上部30 cmの位置で、直達光を遮断するように幅5 cm、長さ70 cm、厚さ3 cmの黒色板をかざした状態で日射量を各調査日3回測定し散乱光量とした（第2-1図）。そして、同時に測定した全天日射量で除することで散乱光率とした。なお、遮光率は、全天日射量を測定した上記日射センサを用い、遮光処理期間中に同等の構造である無遮光の丸屋根型単棟パイプハウス（厚さ0.15 mmの透明POフィルム展張）との比較で算出した。また、温室内気温は、温室中央部の高さ1.5 mの位置に通風筒を設置し、データロガー（RSW-21S、エスペックミック（株））を用いて10分間隔で測定した。

収穫調査は、8月12日から11月2日まで週2回行い、商品果と裂果、小果、乱形果およびチャック果を含めた不良果の個数および重量を調査した。また、糖度調査は、収穫調査の際に月1回行い、外観形質が平均的な果実を1反復当たり3果の2反復で供試した。それぞれの果実を縦方向に2分割し、切断面から採取

した果汁 3 滴をデジタル糖度計（PR-101α，（株）アタゴ）で測定し，平均した．

結 果

遮光資材を被覆した温室内の光環境への影響について，透過光スペクトルは，処理区の間には大きな差はなく，いずれも屋外と同様の傾向であった（第 2-2 図）．遮光期間中の全天日射量は，白色区が銀色区および黒色区に対し約 20% 多かった（第 2-3 図）．遮光率は，白色区 27%，銀色区 40% および黒色区 38% と算出され，白色資材については，製造・販売会社の規格表の遮光率とは異なる値となった．散乱光率は，処理区間に顕著な差が見られ，白色区 > 銀色区 > 黒色区の順に高かった（第 2-1 表）．

温室内気温への影響について，日平均気温はいずれの処理区も同等であったが，日中平均および日最高気温は，黒色区が高く，銀色区が低かった（第 2-2 表）．

収量への影響について，商品果個数は，いずれの品種においても白色区が銀色区と比較して多く，商品果重量

は白色区が銀色区および黒色区と比較して有意に重かった（第2-3表）。不良果個数は，‘CF千果’において白色区が有意に少なく，その他の2品種においては処理区間に差がなかった。不良果率は，‘CF千果’では白色区が銀色区および黒色区と比較して有意に低く，‘エコスイート’では白色区が銀色区と比較して有意に低かった。‘TY千果’は処理区間に差がなかった。総果実重量はいずれの品種も白色区が銀色区および黒色区と比較して有意に重かった。なお，収穫果房数は，処理区間に差がなかった（データ略）。また，栽培期間全体では，糖度は，いずれの品種も処理区間に差はなかった（第2-3表）。

考 察

本節では，夏季のミニトマト栽培における遮光資材の有効な利用方法の確立を目的として，異なる色の遮光資材の特性について，特に散乱光に着目し，温室内環境を評価するとともにミニトマトの生産性について検討した。

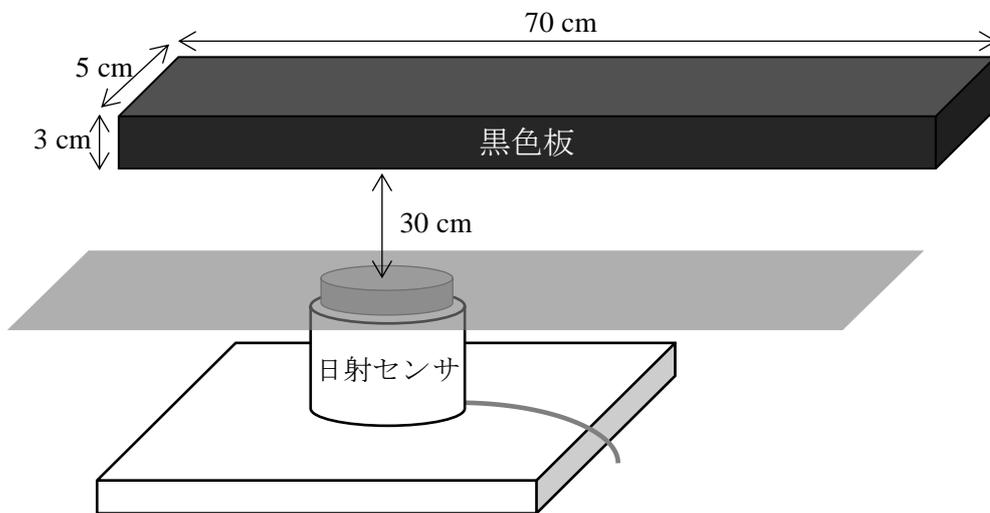
まず，光環境の評価として，透過光スペクトルは，屋外，つまり太陽光と大きな差は見られなかった（第2-2図）．黒色化学繊維の光透過性は非選択的であり，被覆下の透過光は，太陽光に近いスペクトルの波形となる（木村・神田，2013）ため，黒色と同じ無彩色で明度が違うのみである白色の資材についても，透過特性としては同様であったと推察される．また，銀色資材については，アルミの添加量や添加方法の違いにより，光質選択性がない資材や一部の波長域の透過率がわずかに低下する資材があるなど一定の傾向はない（神田・藤原，2006）との報告があり，本研究で供試した銀色資材に関しては，選択性が現れにくい資材であったと推察される．遮光率は，「JIS L 1055 カーテンの遮光性試験方法」（日本規格協会・繊維評価技術協議会，2009）によって定義されているが，本研究では，製造・販売会社の規格表の遮光率と異なる結果となった．このことは，被覆方法，具体的には資材の引っ張り程度によって遮光率が変動すること，直達光と散乱光の割合の違いによって「JIS L 1055 カーテンの遮光性試験方法」の試験箱内と屋外とで異なる計測値とな

ることに起因すると考えられる。散乱光率は、白色資材が最も高い値を示し（第 2-1 表）、緒言での仮説と一致した。すなわち、白色の資材は反射率が高く、かつ表面で乱反射が起こっているために温室内に入射した透過光の散乱光量が増加していると考えられた。

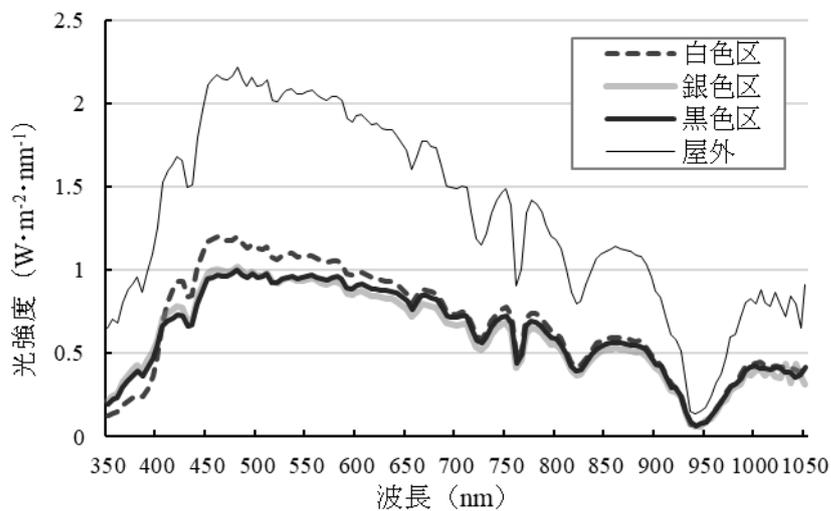
次に、温室内気温への影響については、日中平均と日最高気温は黒色の資材が高く、銀色の資材が低い傾向であった（第 2-2 表）。光吸収性の高い遮光資材は日中、光を吸収して資材温度が高くなり、被覆下への熱放射が大きくなる（岡田，1997）。また、資材ごとの光吸収率は、黒色が最も高く、次いで白色、銀色（アルミ蒸着）の順となり、それに伴い資材自体の温度も黒色、白色、銀色（アルミ蒸着）の順となる（森山ら，2009）。同様に、本研究で温室内気温が、黒色、白色、銀色（アルミ蒸着）の順に高かったことは、本研究で供試した温室が比較的軒高の低いパイプハウスであり、資材の色による放射熱の違いの影響を受けやすかったためと考えられた。

収量については、総果実重量が最も重く、不良果が少ない傾向にあった白色資材で商品果重量が最も重か

った（第 2-3 表）。トマトの総乾物生産は受光量の関数として表すことができ（東出，2018），一定の範囲内であれば受光量が多いほど収量も増加する。本研究で供試した白色資材の遮光率が，製造・販売会社の規格表と異なる値となったため，白色資材の透過光量が銀色および黒色資材に対し約 20% 多くなり（第 2-3 図），増収につながったと思われる。一方で，散乱光の増加は，水平方向および垂直方向の光分布の改善，下位葉の陰葉化の抑制による群落の光合成量増加，また，上位葉の葉温低下による光阻害の低減に作用する（Li ら，2014；斎藤ら，1992）ことから，本研究においても，散乱光量の最も多かった白色資材で光合成量の増加により総果実重量が重くなった可能性が考えられる。さらに，散乱光量の増加は，果実への直達光が減少することにもなるため，局所的な温度上昇を避けることができ，障害果実が減少する（杉山，2021；田尻ら，2012）。本研究においても，白色資材を使用することで裂果などの不良果が減少する傾向が見られ，商品果個数および重量の増加につながった可能性も考えられた。

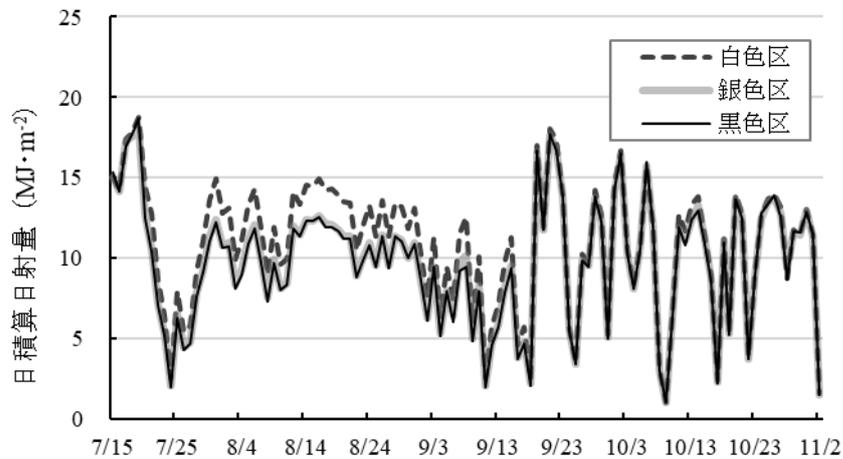


第2-1図 散乱光の測定方法



第2-2図 透過光スペクトルの調査結果

携帯型分光放射計 (MS-720, 英弘精機 (株)) を用いて, 2020年8月14日13:00~14:00に測定



第2-3図 日積算全天日射量の推移

日射センサ (ML-01, 英弘精機 (株)) により
10分間隔で測定
遮光期間：2020年7月20日～9月18日

第2-1表 散乱光率^zの調査結果

区名	8月6日 ^y	8月12日	8月13日	平均
白色区	59.2 a ^x	60.0 a	55.7 a	58.3 a
銀色区	41.3 b	37.0 b	35.1 b	37.8 b
黒色区	24.1 c	20.9 c	17.5 c	20.8 c

^z散乱光率 (%) = 散乱光量 / 全天日射量 × 100

^y各測定日の午前11時～12時に1日3回ずつ測定した平均

^x同列内の異符号間には角変換後の値によるTukeyの多重検定で5%水準の有意差あり(n=3)

第2-2表 遮光資材の違いが温室内気温^zに及ぼす影響

区名	日平均 (°C)	日中平均 ^y (°C)	日最高 (°C)
白色区	30.3 a ^x	33.9 ab	37.0 ab
銀色区	30.3 a	33.7 b	36.5 b
黒色区	30.7 a	34.6 a	37.5 a

^z2020年8月の1日ごとの平均

^y8時～17時の平均

^x同列内の異符号間にはTukeyの多重検定で5%水準の
有意差あり (n=31)

第2-3表 遮光資材の違いがミニトマトの収量に及ぼす影響

品種	区名	商品果			不良果 ^z		総果実		不良果率 ^y (%)	糖度 (°Brix)
		個数 (個/株)	重量 (g/株)	平均果重 (g)	個数 (個/株)	重量 (g/株)	個数 (個/株)	重量 (g/株)		
CF千果	白色区	237 ab ^v	2,222 a	9.4 b	10 b	54 bc	247 ab	2,276 a	4.2 bc	5.9 a
	銀色区	200 cd	1,766 b	8.8 bc	28 a	144 a	229 ab	1,910 b	12.4 a	6.1 a
	黒色区	211 bcd	1,710 b	8.1 c	28 a	131 a	239 ab	1,840 b	11.7 a	6.1 a
TY千果	白色区	248 a	2,317 a	9.3 bc	6 b	36 c	255 a	2,353 a	2.5 cd	7.0 a
	銀色区	211 bcd	1,848 b	8.8 bc	5 b	25 c	216 bc	1,873 b	2.3 cd	6.7 a
	黒色区	224 abc	1,916 b	8.5 bc	8 b	35 c	232 ab	1,951 b	3.3 cd	7.2 a
エコスイート	白色区	182 d	2,423 a	13.3 a	2 b	19 c	185 cd	2,442 a	1.3 d	6.8 a
	銀色区	140 e	1,679 b	12.0 a	10 b	79 b	150 e	1,758 b	6.6 b	6.9 a
	黒色区	146 e	1,854 b	12.7 a	5 b	41 c	151 de	1,895 b	3.4 bcd	6.9 a
分散分析 ^x	遮光資材	**	**	**	**	**	**	**	**	n.s.
	品種	**	*	**	**	**	**	n.s.	**	**
	交互作用	n.s.	n.s.	n.s.	**	**	n.s.	n.s.	**	n.s.

^z裂果, 小果, 乱形果, チャック果

^y不良果率=不良果個数/総果実個数×100 統計処理には角変換後の値を用いた

^x繰り返しのある二元配置分散分析 (n=2, 糖度のみn=5) を行い, **, *はそれぞれ1%, 5%水準で有意差あり, n.s.は有意差なしを示

^v同列内の同符号間にはTukeyの多重検定により5%水準で有意差なし

第 2 節 遮光資材の特性調査

前節の試験において，遮光資材の色の違いが夏季の温室内環境とミニトマトの収量に及ぼす影響について，散乱光に着目しながら調査した．本節では，さらなる遮光資材の特性評価として，白色資材同士でも製品によって特性に違いがあるかどうかを検証するため遮光率および散乱光率について調査した．

材料および方法

1) 処理内容

2種類の白色資材について，それぞれ3段階の遮光率の資材を用い，実際の遮光率および散乱光率を調査した．供試資材は，「ワリフ明涼 20」，「ワリフ明涼 30W」および「ワリフ明涼 50」（いずれもポリエチレン製不織布，ENEOS テクノマテリアル（株），規格表の遮光率 20%，30% および 50%）（以下，明涼区），「ら～くらくスーパーホワイト L25」，「ら～くらくスーパーホワイト L45」 および 「ら～くらくスーパーホワイト L65」

(いずれもポリエチレン製，日本ワイドクロス(株)，規格表の遮光率 20～25%，40～45% および 60～65%) (以下，スーパーホワイト区) の白色資材の合計 6 種類とし，それに加え，黒色資材である「ダイオネット 410」(ポリエチレン製，ダイオ化成(株))(以下，ダイオネット) を対照とした．調査は，試験 1 で用いた温室と同じ敷地内の十分なスペースが確保できる場所で行った．横 2 m ×奥行き 2 m ×高さ 1 m の枠を農業用直管パイプで設置し，2.2 m 四方に切り取った遮光資材を枠の上部に水平に展張し，各項目について調査した．また，遮光資材を展張しない無遮光の状態についても同様に調査した．

2) 調査項目

散乱光率は，前節の方法(第 2-1 図)に準じ，日射センサ(ML-01，英弘精機(株))を枠内の高さ 60 cm の位置に設置し，その上部 30 cm の位置で，直達光を遮断するように幅 5 cm，長さ 70 cm，厚さ 3 cm の黒色板をかざした状態で日射量を測定し，黒色板なしの状態との比較で算出した．なお，遮光率については，遮光資材除去直後の全天日射量との比較で算出した．

2020年12月2日～2021年3月23日における晴天日の
10:00～14:00の間で、合計10回測定した。

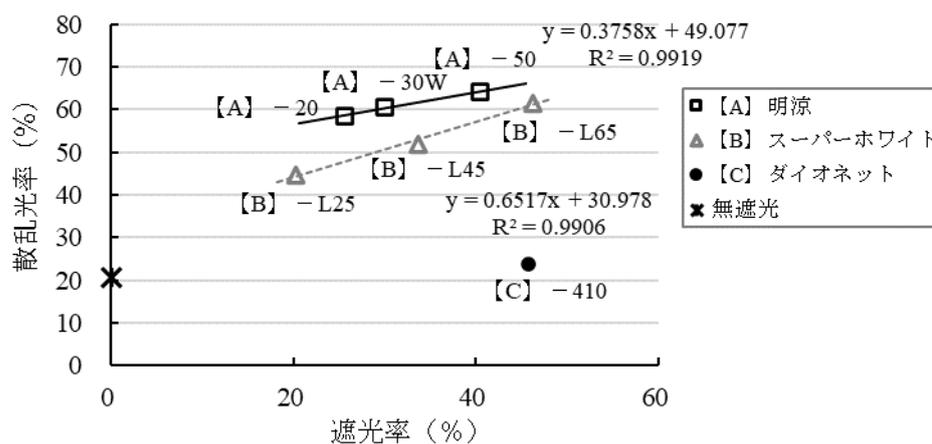
結果

各資材の遮光率は、種類によって製造・販売会社の規格表の遮光率と実測値との間に差があった（第2-4図）。散乱光率は、いずれの白色資材も対照の黒色資材と比較して高く、遮光率が高いほど散乱光率も高かった。なお、白色資材同士の比較では、明涼区がスーパーホワイト区に比べて高く、回帰式の傾きも小さいことから、低い遮光率では差が大きかった。

考察

本節では、白色資材について異なる製品による光環境の特性の差を検証したところ、遮光率と散乱光率の関係の回帰式が高い決定係数で得られ、いずれの資材も遮光率が高いほど散乱光率が高くなり、また、同じ白色資材でも製品によって回帰式の傾き（遮光率と散

乱光率の関係)が異なった(第2-4図)。これは、素材、製法や間隙率の違いが影響している可能性があると考えられる。なお、遮光率が製造・販売会社の規格表の遮光率と異なっていた点と、白色資材は2種類とも対照の黒色資材と比較して散乱光率が高かった点については、前節の試験と同様の結果であり、遮光資材を利用する際には、実際の遮光率を把握しておく必要があるとともに、光合成の効率化の観点では白色資材が望ましいと考えられた。



第2-4図 資材の違いによる遮光率と散乱光率の関係

晴天日の10~14時の間で測定 (n=10)

地面からの高さ：日射センサ60 cm, 黒色板90 cm,

遮光資材100 cm

第 3 節 総合考察

第 2 章では，異なる色の遮光資材の特性について，特に散乱光に着目し，温室内環境を評価するとともにミニトマトの生産性について検討した．その結果，散乱光率が白色資材で最も高く，次いで銀色，黒色となり，色の違いにより大きな差があった．また，生産性については，白色資材で最も収量が多くなり，その要因としては，遮光率が製造・販売会社の規格表と異なる値となり，光透過量つまり受光量が最も多かつたためと考えられた．それに加え，白色資材を用いることで，温室内の散乱光量が増加し，受光環境の改善に伴う光合成量の増加と，温室内気温の抑制や果実への光の集中が緩和されることによる障害果の減少により，収量増加につながる可能性も示唆された．したがって，生産現場で収量向上を目的として遮光資材を利用する場合，遮光率だけでなく，散乱光率も考慮する必要がある，これについて最も優れるのは白色資材であると考えられた．なお，同じ白色資材同士でも製品によって遮光率と散乱光率の関係が異なり，製品によっ

ては低い遮光率でも比較的高い散乱光率となるため、品目や時期が適合すれば栽培上有利になると思われる。コスト面では、黒色資材が、一般的に低価格で耐候性に優れる（魚本，2004）が、白色資材を選定した場合、収量増加によりコスト上昇分よりも収益増加が上回ることが予想されるため、収益の向上が期待できる。なお、遮光率については、資材によっては製造・販売会社の規格表の遮光率と異なる場合があるため、生産現場であっても、研究の場面であっても、展張の際には、実際に遮光率または光量を測定する必要がある。また、遮光率および散乱特性についての共通の評価基準を作成することが求められる。

本研究では、白色、銀色および黒色のそれぞれ1種類の遮光資材を用いて、温室内環境とミニトマトの生産性への影響を調査するとともに、白色資材同士の比較では、2種類の資材について特性を評価し、一定の傾向は明らかとなった。しかし、実際に販売されている資材の種類は多数あり、素材、製法や間隙率などの違いも多様であるため、これらが温室内環境へ及ぼす、より詳細な影響については今後の研究課題である。

第 3 章 施設栽培ミニトマト 7 月定植長期どり作型における高収益化のための栽植密度コントロールの影響評価と最適栽植密度のシミュレーション

第 1 章では、効率的かつ効果の高い暑熱対策技術の確立に向け、外部細霧冷房の環境特性を明らかにしながらミニトマトの生育および収量への影響について検討し、その有効性を明らかにした。また第 2 章では、遮光に白色資材を用いることで温室内の散乱光率が高まり、受光環境の改善に伴う光合成量の増加と、温室内気温の抑制や果実への光の集中が緩和されることによる障害果の減少などにより、収量が高まることを明らかにした。

ただし、第 1 章で検討した外部細霧冷房は既存の温室に後付けが可能であるものの、機器の取付けに一定のコストが必要であり、第 2 章で検討した遮光についても、遮光資材の購入費が必要となる。しかし、緒言でも述べたとおり、中小規模の生産者にとっては、できるだけ導入コストが低い技術が望まれる。

植物は、日射によって地表に降り注がれる熱の一部

を、葉からの蒸散作用により潜熱として消費することにより、気温や地表面温度の上昇を抑制できる（野島・長谷川，1995）。また、トマトは吸水量のうち95%以上が蒸散に使われる（細野・細井，2002）。これらのことから、温室内の栽植密度を高め、蒸散量を増加させることにより、群落内の温度上昇と高温障害の緩和が可能と考えられる。

ミニトマトの栽植密度は、現在主流となっている8～9月定植の促成長期どり作型では、栽培期間をとおして2株・m⁻²前後となっている（熊本県野菜振興協会，2012；香川県，1997；和歌山県農林水産部，2009）が、これは主に冬季の葉面積指数（LAI）の最適化を主眼とした栽植密度であり、夏秋期の栽植密度は必ずしも適切ではない可能性がある。一方、オランダなどでは、日射量の高い時期に側枝を伸ばし、茎密度を高めることで収量を最適化させる栽培管理方法がとられている（De Koning，1994）。つまり、日射量の大きい夏季においては、現状の栽植密度が最適ではなく、密植することで、早期にLAIを確保でき群落の光合成量が増加し多収化できる可能性が高いと考えられる。

そこで本章では，9～10月に一定量の収量が見込める7月定植の長期どり作型を前提としたうえで，栽培初期である夏季のみ密植にし，秋に摘心し冬に慣行の栽植密度に減らすことで，高温期における群落内の温度上昇と高温障害を回避しつつ，群落光合成量の増加により多収化が可能となる新たな栽培体系の開発を試みた。

第1節 夏季の密植が生育と収量に及ぼす影響

前述のとおり，温室内の栽植密度を高め，蒸散量を増加させることにより，群落内の温度上昇と高温障害の緩和が期待できることから，本節では，ミニトマト促成長期どり作型において，高温期である初期に密植し，その際の温室内の環境およびミニトマトの生育と収量に及ぼす影響を評価した。

材料および方法

1) 栽培概要

試験は，農研機構西日本農業研究センター四国研究拠点（現在：善通寺研究拠点，香川県善通寺市）において，透明POフィルム（厚さ0.15 mm，花野果，住化積水フィルム（株））を展帳した単棟パイプハウス（間口6 m，奥行13 m，棟高3.6 m，軒高2 m，側窓換気幅1.2 m，南北棟）を2棟供試して行った．供試品種は，ミニトマト（*Solanum lycopersicum* L.）‘CF千果’，‘TY千果’（タキイ種苗（株）），および単為結果性品種‘エコスイート’（愛三種苗（株））とした．

2020年6月10日，72穴セルトレーに培養土（土太郎，スミリン農産工業（株））を充填し播種を行い，閉鎖型育苗装置（苗テラス，三菱ケミカルアクア・ソリューションズ（株））内で，日長16 h，昼温25℃／夜温18℃，CO₂濃度1,000 ppmの環境の下，EC1.6 dS・m⁻¹の培養液（ハイテンポ Ar，N：P₂O₅：K₂O = 7.3：0：3 およびハイテンポ Cu，N：P₂O₅：K₂O = 0：4.5：6.5，いずれも住友化学（株），ハイテンポ Ar および Cu を 1：3 で混入）で管理した．3週間後の7月1日に，本葉4枚となった苗を袋培地栽培システム（金子ら，2006）に1袋（30 L）当たり4株ずつ定植し，その後は培養液（タ

ンクミックス A, $N : P_2O_5 : K_2O = 10 : 13 : 33$ およびタンクミックス B, $N : P_2O_5 : K_2O = 8 : 0 : 2$, いずれも OAT アグリオ (株)) を生育に応じて, $EC 1.2 \sim 1.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ の濃度で $0.3 \sim 2.0 \text{ L/株/日}$ の範囲で袋培地から排液が確認できる程度に量を調整しながら適宜給液を行った。また, 整枝は 1 本仕立て, 2 条振り分け斜め誘引とし, 葉数 18~25 枚程度となるよう下葉から随時摘葉した。着果処理として, 9 月末まで 0.15% パラクロロフェノキシ酢酸 (4-CPA, 石原トマトトーン, 石原バイオサイエンス (株)) 150 倍液を 7 日間隔で噴霧し, 10 月以降は電動ハンディブローアによる送風振動受粉 (中山, 2010) を 3~4 日間隔で行った。温室の温度管理は, 側窓, 換気扇 (FGX8436, フルタ電機 (株), 羽根径 80 cm, 消費電力 400 W, 妻面上部に各棟 1 台設置) とともに換気設定温度 25°C (冬季は換気扇のみで管理), 暖房設定温度 12°C とし, 栽培期間をとおして遮光は行わなかった。

2) 処理内容

夏季の密植の影響を調査するため, 2 棟のうち 1 棟を, 定植時の栽植密度が一般的な促成栽培の水準であ

る $2.35 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ とする対照区とし，もう 1 棟を，その 2 倍の栽植密度である $4.71 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ とする夏季密植区として区を設定した．いずれも畝幅 1.7 m とし，換算上の株間で，対照区が 25 cm ，夏季密植区が 12.5 cm となるよう袋培地を配置した．夏季密植区については，9 月 17 日に半数の株を摘心し，摘心した株の収穫がほぼ終了した 11 月 30 日に株の撤去を行い，それ以降は，対照区と同じ $2.35 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ とした．なお，供試株数は，対照区が栽培期間を通じて各品種 18 株の 2 反復，夏季密植区が定植から 11 月 30 日まで各品種 36 株，それ以降は 18 株の 2 反復とした．

3) 調査項目

温室内の気温および相対湿度は，それぞれ温室中央部の高さ 1.5 m の位置に通風筒を設置し，温度・湿度データロガー（RSW-21S，エスペックミック（株））を用いて，10 分間隔で測定した．

花粉稔性の指標として，アセトカルミンを用いて花粉を染色する方法（Fernandez-Muñoz ら，1994）により正常花粉率を調査した．7 月 14 日から 10 月 6 日の期間に，各区 3 花の 2 反復ずつを，週 1 回，顕微鏡観察に

より調査した。また，定植から夏季密植区の摘心までに開花した第1～11果房について，各調査果房の3果房上の開花時に，調査果房内で既に開花が終了した花を含めて開花数を調査するとともに，肉眼で着果したと判断できた果実を着果数として調査し，さらに着果数を開花数で除することで着果率を算出した。なお，これらは各区6株の2反復の調査とした。

葉面積は，順次摘葉方式葉面積調査法（細井，1997）により，8月20日に各区上位1～18枚目まで1株当たり個葉1枚ずつサンプリングを行い，葉面積計（LI-3100，LI-COR社）で測定した。また，葉数21枚とした際の株当たり葉面積と栽植密度からLAIを推定した。ただし，19枚目以降の個葉面積は16～18枚目の平均値を用いた。

収穫調査は，8月12日から翌年5月31日まで週2回ずつ行い，商品果と裂果，小果，乱形果，チャック果を含めた不良果の個数および重量を調査した。また，糖度調査は，月1回ずつ収穫調査の際に行い，各区の平均的な3果を2反復で供試した。果実を縦方向に2分割し，切断面から採取した果汁3滴をデジタル糖度

計（PR-101 α ，（株）アタゴ）で測定した。

結 果

温室内環境への影響について，8月の気温は，日平均では差がなかったものの，日中平均（8：00～17：00）および日最高では夏季密植区が低く，相対湿度については，日平均，日中平均，日最低いずれも夏季密植区が高かった（第3-1表）。また，7月および10月は気温と相対湿度のいずれも差がなく，9月は気温のいずれも差がなく相対湿度の日中平均と日最低で夏季密植区が高かった。

着果への影響について，正常花粉率，着果率では，品種間による差のみで処理区間に差はなかったが，開花数，着果数では，夏季密植区が少なかった（第3-2表）。

葉面積は，株全体では差がなかったものの，上位葉では夏季密植区が大きかった。また，株当たりの葉数を21枚として推定したLAIも夏季密植区が2倍以上高かった（第3-3表）。

収量への影響について，株当たり収量を第 3-4 表，面積当たり収量を第 3-5 表に示す．株当たりの早期収量では，‘CF 千果’と‘TY 千果’で夏季密植区の商品果数が少なく，‘エコスイート’で同等であったが，商品果重量は処理による差はなかった．平均果重は，‘CF 千果’のみ差があり，夏季密植区が重かった．また，不良果数は夏季密植区が少なく，不良果重量は，‘TY 千果’で同等であったが，‘CF 千果’と‘エコスイート’で夏季密植区が少なかった（第 3-4 表）．

株当たりの全期間収量では，商品果数は夏季密植区が少なかったが，商品果重量は，処理による差がなかった．平均果重は，‘CF 千果’で夏季密植区が重かったが，‘TY 千果’と‘エコスイート’では同等であった．また，不良果数，重量は，いずれも夏季密植区が少なかった．

面積当たりの早期収量では，商品果数，重量は，夏季密植区が多かったが，不良果数，重量は処理による差はなかった．面積当たりの全期間収量では，早期収量の傾向と同様に，商品果数，重量は，夏季密植区が多かったが，不良果数，重量は，処理による差はなかった．

なお，糖度は，全期間を通じて，処理による差はなかった（第 3-5 表）。

考 察

本節では，高温期における群落内の温度上昇と高温障害を回避しつつ，光合成量の増加により多収化が可能となる新たな栽培体系を開発するため，栽培初期である夏季のみ密植にし，秋に摘心し冬に慣行の栽植密度に減らした場合の温室内環境およびミニトマトの生育と収量への影響を評価した。

まず，密植にした場合の温室内環境について調査したところ，8月の温室内気温が低下するとともに相対湿度が上昇した（第 3-1 表）。これは，密植により蒸散量が増加したことで，気温上昇が抑制（野島・長谷川，1995）されたためと考えられる。

トマトの花粉稔性や着果率は高温による影響を受け，昼／夜温 28／22℃から 1℃でも上昇することで着果率が低下し，昼／夜温 32／26℃では着果率，花粉の稔性が著しく低下する（佐藤，2006）が，今回の結果

では、処理区間の気温差が正常花粉率および着果率低下の抑制につながらなかった（第3-2表）。これは、今回の温度低下が8月の日中平均気温で 0.5°C 、日最高気温でも 0.6°C 程度と比較的小さかったためと考えられ、さらに着果率に関しては、今回の栽培方法では着果処理として4-CPAを散布しており、単為結果したために、今回の小さい気温差では着果率に影響がなかったと考えられる。なお、密植によって果房当たりの着果数が減少したことについては、株間が狭くなることで花芽分化数が減少する（斎藤ら、1963）ため、開花数が減少し、そのまま着果数の減少にもつながったと考えられる。

一方、トマトの個葉の葉面積は高温条件下で小さくなり高湿度下で大きくなる（フューヴェリンク・オケーク、2020；Verkerk, 1955）ため、今回の結果では夏季密植区の上位葉において葉面積が大幅に増加しており（第3-3表）、温度低下と湿度上昇のいずれかまたは両方の効果が認められたと考えられる。なお、中位葉以下、特に下位葉における差がみられなかったのは、梅雨明け前に展開した葉であるためと、また、生育初

期で植物体が小さく群落全体の葉面積も小さかったことから、温室内の環境に影響を及ぼすほどの蒸散量が得られず、密植の影響が出にくかったためと思われる。なお、このことは7月の温室内気温および相対湿度に差がなかった（第3-1表）ことと一致する。

株当たりの収量については、前述のとおり総着果数が夏季密植区で少なくなった（第3-2表）が、対照区の不良果が多かったことや、‘CF千果’では夏季密植区の平均果重が増加したことにより、収量は同等となった（第3-4表）。この傾向が、早期収量、全期間収量ともに認められたため、面積当たり商品果重量では、栽植本数が2倍である夏季密植区が、特に早期商品果重量では約2倍、全期間商品果重量でも2～4割と大幅に増加した（第3-5表）。なお、今回の不良果の大半を占めていた裂果と小果に関して、まず裂果については、果実に対する日射を遮断することでコルク層の発達を抑え、放射状裂果発生が抑えられた（鈴木ら、2009）との報告がある。夏季密植区では、密植によって果実への日射量が減少していたと考えられるため、裂果の減少が予想される。また、小果については、受

精後高温にあった果実ではホルモン処理の有無にかかわらず小粒果が多く出現しているとの報告（岩堀・高橋，1964）があり，夏季密植区では，密植によって気温が低下したことや，相互遮蔽による日射量の減少による幼果自身の温度低下の可能性があったことから，小果の減少も予想される．いずれにしても，密植により夏季の障害果発生を抑制できる可能性が示唆されたが，今回の試験における裂果や小果の抑制原因の特定は困難であるため，今後さらに検討する必要がある．

第3-1表 ミニトマト栽培における夏季の密植が温室内の気温および相対湿度に及ぼす影響

月	区名	気温 ² (°C)			相対湿度 (%)		
		日平均	日中平均 ^a	日最高	日平均	日中平均	日最低
7月 ^y	夏季密植区	26.2	28.4	29.9	85.1	73.4	64.5
	対照区	26.5	28.7	30.2	83.5	69.2	60.3
	t検定 ^w	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
8月	夏季密植区	30.1	33.3	35.4	72.7	61.1	49.6
	対照区	30.4	33.8	36.0	69.0	52.9	43.2
	t検定	n.s.	*	*	**	***	***
9月	夏季密植区	25.0	27.9	29.6	81.9	69.7	60.5
	対照区	25.3	28.2	30.0	77.3	60.8	51.7
	t検定	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	**	**
10月	夏季密植区	19.4	23.2	24.7	84.0	65.8	55.2
	対照区	19.4	23.2	24.7	81.4	58.8	48.5
	t検定	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

²気温および相対湿度は，データロガー（RSW-21S，エスペックミック（株））を温室中央部に1か所ずつ設置し，10分間隔で測定した

^y各項目は，各月における1日ごとの数値を平均した

^a日中は午前8時から午後5時とし，その時間帯の値を平均した

^w***, **, *はそれぞれ0.1%水準，1%水準，5%水準で有意差あり，n.s.は有意差なしを示す（n=30~31）

第3-2表 夏季の密植がミニトマトの花粉，開花，着果に及ぼす影響

区名	品種	株あたり葉面積 ^z (cm ²)			
		上位葉	中位葉	下位葉	合計
夏季密植区	CF千果	434	759	1480	2,673
	TY千果	438	903	1535	2,876
	エコスイート	273	676	1191	2,140
対照区	CF千果	267	551	1471	2,289
	TY千果	243	605	1687	2,535
	エコスイート	184	622	1241	2,047
分散分析 ^w	処理	*	n.s.	n.s.	n.s.
	品種	n.s.	n.s.	*	n.s.

^z7月14日から10月6日の処理期間の平均値（各区3花×2反復，n=13）

^y第1～11果房について，各果房の3果房上の開花時に調査した平均値（各区6株×2反復）

^x各株，各果房の着果率の平均値

^w繰り返しのある二元配置分散分析（正常花粉率 n=6，その他 n=12）を行い，

***，**はそれぞれ0.1%，1%水準で有意差あり，n.s.は有意差なしを示す

着果率は角変換後の値を用いた

第3-3表 夏季の密植がミニトマトの葉面積に及ぼす影響

区名	品種	株あたり葉面積 ^z (cm ²)				LAI ^y
		上位葉	中位葉	下位葉	合計	
夏季密植区	CF千果	434	759	1480	2,673	1.72
	TY千果	438	903	1535	2,876	1.72
	エコスイート	273	676	1191	2,140	1.33
対照区	CF千果	267	551	1471	2,289	0.76
	TY千果	243	605	1687	2,535	0.84
	エコスイート	184	622	1241	2,047	0.63
分散分析 ^x	処理	*	n.s.	n.s.	n.s.	**
	品種	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.

^z上位1～18枚目までの個葉1枚ずつを，上位葉（1～6枚目），中位葉（7～12枚目），下位葉（13～18枚目）に分け，それぞれ合計した

^y19枚目以降の個葉面積は16～18葉目の平均値を用い，葉数21枚とした際の株当たり葉面積と栽植密度（夏季密植区：4.71株・m⁻²，対照区：2.35株・m⁻²）から算出した

^x繰り返しのない二元配置分散分析により，**，*はそれぞれ1%，5%水準で有意差あり，n.s.は有意差なしを示す

第3-4表 夏季の密植がミニトマトの株当たり収量に及ぼす影響

区名	品種	早期収量 ^z						全期間収量 ^y					
		商品果			不良果 ^x			商品果			不良果		
		個数 (個/株)	平均果重 (g)	重量 (g/株)	個数 (個/株)	重量 (g/株)	重量 (g/株)	個数 (個/株)	平均果重 (g)	重量 (g/株)	個数 (個/株)	重量 (g/株)	
夏季密植区	CF千果	165 c ^y	10.0 b	1,658	7	69 c	482	5,623	11.7 b	70	582		
	TY千果	208 b	8.9 bc	1,855	2	16 c	602	7,208	12.0 b	15	141		
	エコスイート	143 cd	12.6 a	1,803	8	73 bc	416	6,282	15.1 a	30	244		
対照区	CF千果	194 b	8.7 c	1,688	18	168 ab	503	5,411	10.8 c	81	652		
	TY千果	242 a	8.1 c	1,968	6	33 c	674	7,583	11.3 bc	26	220		
	エコスイート	136 d	13.7 a	1,871	19	217 a	418	6,582	15.7 a	47	429		
分散分析 ^w	処理	**	n.s.	*	**	***	*	n.s.	*	*	*		
	品種	***	***	*	**	***	***	***	***	***	***		
	交互作用	**	**	n.s.	n.s.	*	n.s.	**	**	n.s.	n.s.		

^z8月～10月の収量

^y8月～翌年5月の収量

^x裂果, 小果, 乱形果, チャック果

^w繰り返しのある二元配置分散分析 (n=2) を行い, ***, ***, *はそれぞれ0.1%, 1%, 5%水準で有意差あり, n.s.は有意差なしを示す

^v繰り返しのある二元配置分散分析により5%水準で有意差がないことを示す

^v同列内の同符号間にはTukeyの多重検定により5%水準で有意差がないことを示す

第3-5表 夏季の密植がミニトマトの面積当たり収量および糖度に及ぼす影響

区名	品種	早期収量 ^z						全期間収量 ^y					
		商品果			不良果 ^x			商品果			不良果		
		個数 (個・m ⁻²)	重量 (g・m ⁻²)	糖度 ^v (°Brix)	個数 (個・m ⁻²)	重量 (g・m ⁻²)	重量 (g・m ⁻²)	個数 (個・m ⁻²)	重量 (g・m ⁻²)	糖度 ^v (°Brix)	個数 (個・m ⁻²)	重量 (g・m ⁻²)	重量 (g・m ⁻²)
夏季密植区	CF千果	779	7,809	34	326	1,604	17,796	199	1,624	6.9			
	TY千果	978	8,735	12	75	1,985	22,211	43	391	7.7			
	エコスイート	672	8,491	37	343	1,371	19,946	93	760	7.7			
対照区	CF千果	457	3,968	42	394	1,183	12,717	189	1,533	6.7			
	TY千果	569	4,625	15	77	1,583	17,819	61	518	7.7			
	エコスイート	320	4,397	45	510	983	15,468	110	1,007	7.6			
分散分析 ^w	処理	***	***	n.s.	n.s.	***	***	n.s.	n.s.	n.s.			
	品種	***	*	**	***	***	***	***	***	***			
	交互作用	n.s.											

^z8月～10月の収量

^y8月～翌年5月の収量

^x裂果, 小果, 乱形果, チャック果

^w繰り返しのある二元配置分散分析 (n=2) を行い, ***, ***, *はそれぞれ0.1%, 1%, 5%水準で有意差あり, n.s.は有意差なしを示す

第 2 節 群落光合成量の推定と最適栽植密度のシミュレーション

前述のとおり，夏季に密植とすることで，高温期における群落内の温度上昇と高温障害を回避しつつ，群落光合成量の増加により多収化が期待できる．前節では，密植による蒸散量増加により温室内気温の低下が確認でき，早期，全期間ともに，面積当たり収量が大幅に増加することを明らかにした．本節では，密植による増収の要因を光合成量の観点からも検証すること，また，夏季におけるミニトマトの最適な栽植密度を明らかにすることを目的として，植物群落における日射量と葉面積に基づいた物質生産の考え方（Monsi・Saeki, 1953）により群落の物質生産量を推定する既報（東出，2018；久枝ら，2007；Saitoら，2020）の手法を参考に群落光合成量のシミュレーションを行った．

材料および方法

1) 調査項目

前節の夏季密植区のうち‘CF千果’を供試し，LAI別の群落光合成量を推定するため，群落内の光合成有効光量子束密度（PPFD），純光合成速度，温室内日射量を調査した．なお，個葉ごとの葉面積は，前節で測定したデータを用いた．

群落内のPPFDは，8月20日（晴れ）にロング光量子センサ（LI-191SB，LI-COR社）を，上位葉6枚目，12枚目，15枚目のそれぞれ高さで畝方向と直交するよう群落内に差し込み，水平面のPPFDを2か所ずつ測定し，それぞれ群落上のPPFDと比較することで，群落内の相対PPFDを求めた．

純光合成速度は，10月6日に光合成蒸散測定装置（LI-6400，LI-COR社）を用い，上位葉5枚目と25枚目において，測定条件を気温35℃，相対湿度約70%，CO₂濃度400 ppm，PPFD 0～2,000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ として測定した．

温室内日射量は，日射センサ（ML-01，英弘精機（株））を群落の上に設置し，データロガー（RU-21-V，エスペックミック（株））を用いて10分間隔で測定した．なお，得られた放射照度（ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ）を変換係数

2.3 として単位変換（彦坂，2016）し，PPFD（以下，換算 PPFD）（ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）を求めた。

2) シミュレーションの方法

群落光合成量のシミュレーションの流れを第 3-1 図に示す。まず，株の上位から個葉面積を積算していくことで，上位葉 6 枚目，12 枚目，15 枚目の高さ別の LAI を算出し，これらの LAI と群落内の相対 PPFD との関係から，LAI 階層別の相対 PPFD を推定する指数近似曲線を得た。これに，実測した放射照度を単位変換して得られた換算 PPFD から，LAI 階層ごとの群落内換算 PPFD を推定した。次に，上位葉 5 枚目と 25 枚目のそれぞれにおいて，光合成蒸散測定装置で得られた PPFD ごとの純光合成速度の実測値から最小二乗法により，式 1 の非直角双曲線で示される光－光合成曲線（Thornley, 1976）を得た。

$$P = \frac{\theta I + P_{\max} - \sqrt{(\theta I + P_{\max})^2 - 4\theta I P_{\max}}}{2\theta} - R \quad [\text{式 1}]$$

P：純光合成速度（ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）

P_{\max} ：最大光合成速度（ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）

R：暗呼吸速度（ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）

\emptyset : 初期勾配

θ : 凸度

I : PPF D ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

そして、得られた光－光合成曲線の各パラメーターを、上位葉と下位葉の間の未測定 LAI 階層について線形補間法により 0.1 単位ごとに補完（上位葉より上は上位葉と同じとみなし、下位葉より下は下位葉と同じとみなす）を行ったうえで、前述の LAI 階層ごと、1 時間ごとの換算 PPF D を式 1 に代入することで、時間・LAI 階層別の純光合成速度を算出し、1 か月分を合算することで、それぞれの区の LAI における月別群落光合成量を推定した。

次に、最適 LAI を推定するため、上記と同様、LAI 階層ごとの受光量から階層ごとの純光合成速度を算出し、上位から積算していくことで光合成量が最大化する LAI を求めた。そのうえで、葉数を 21 枚とした株当たり葉面積で最適 LAI を除することで、最終的に最適栽植密度を推定した。

結果

群落内の相対 PPF D については，葉位別の LAI と相対 PPF D との関係から決定係数 0.961 の近似曲線 ($y = e^{-1.075x}$) が得られた (第 3-2 図)。なお，得られた近似曲線から本ミニトマト栽培における吸光係数 (K) は 1.075 と推察された。

純光合成速度について，上位葉では， $1,000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 付近から，下位葉では $500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 付近から上昇が緩やかになり，最大速度は上位葉で高く，下位葉の方で低かった (第 3-3 図)。また，光補償点は，上位葉 $57.9 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，下位葉 $40.6 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ と下位葉で低かったことから，下位葉では陰葉化していたことが確認された。

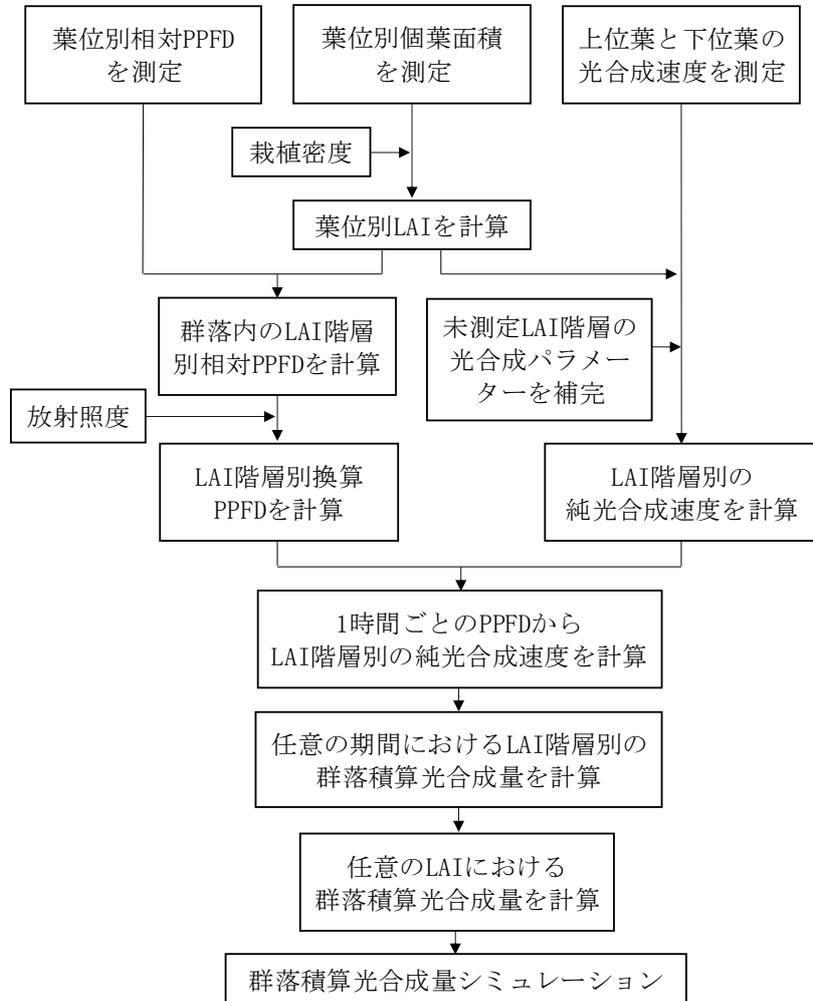
LAI 別の積算光合成量を試算し，光合成量が最大化する LAI を月別に推定したところ，8 月が 1.9，9 月は 1.4，10 月で 1.2 となった (第 3-4 図)。さらに，その LAI から栽植密度に換算すると，それぞれ $5.21 \text{株} \cdot \text{m}^{-2}$ ， $3.84 \text{株} \cdot \text{m}^{-2}$ ， $3.29 \text{株} \cdot \text{m}^{-2}$ となった。

考 察

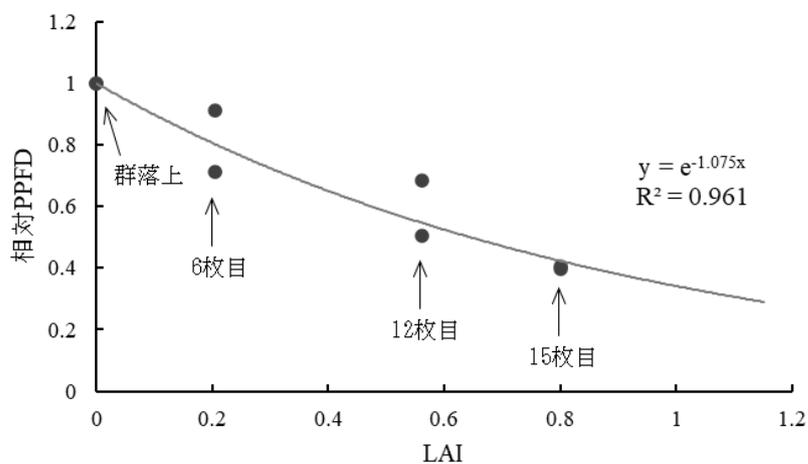
本節では、群落内 PPFD と個葉の光合成速度から、夏季密植区、対照区それぞれの積算光合成量を試算した。その結果、密植により LAI が高いと推定される夏季密植区において、8月と9月の群落光合成量が多いと予想されることから、これが初期収量増加の大きな要因であると考えられた。なお、今回の光合成速度の測定条件では温度を 35℃ の一定としており、実際には、葉温が高くなるにつれ呼吸は指数関数的に増加する（狩野、1992）ため、呼吸量を過大に評価している可能性がある。一方で、日射量の増加する時期に側枝を伸長させる茎数増加は、果房数および着果数を増加させることによって収量を増加させるとの報告（岩崎ら、2018）もあり、今回の夏季密植区の増収は、LAI の増加による光合成量の増加だけではなく、栽植密度の増加による面積当たり着果数の増加が関与していると考えられた。

また、LAI 別の積算光合成量を試算し、光合成量が最大化する LAI 値を月別に推定したところ、8月の最

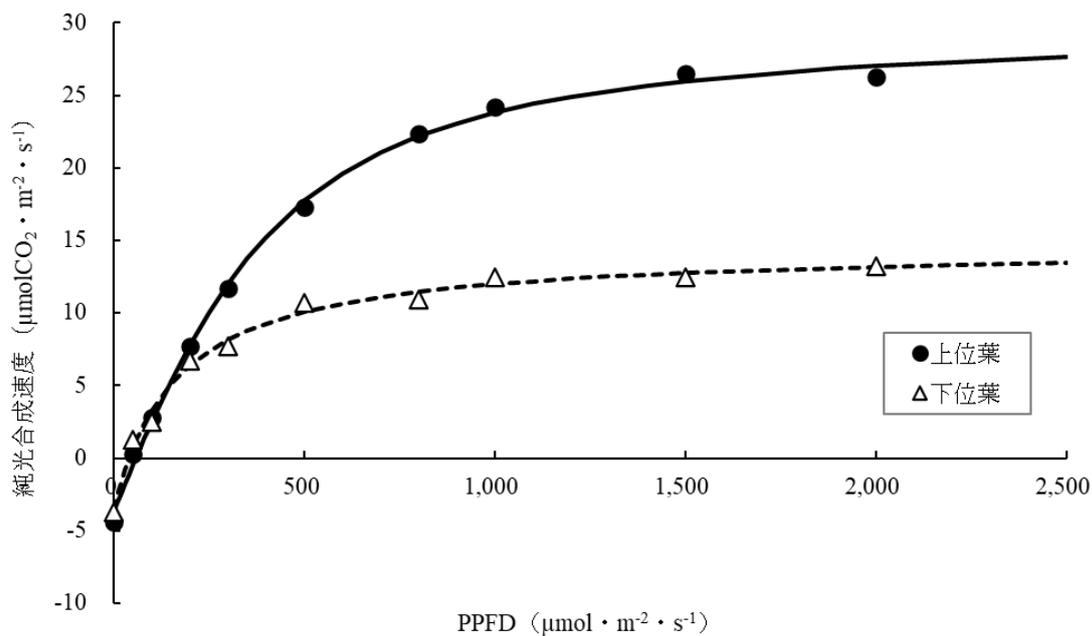
適値 1.9（第 3-4 図）は，株当たりの葉数を 21 枚として推定した夏季密植区の LAI である 1.7 と近い値にあることから，今回の処理密度が妥当であったことが確認できた．なお，大玉トマトでは LAI が 3 までは LAI の増加による収量増加の余地がある（東出，2018）とされているが，今回の高温期におけるミニトマトのミュレーション結果で最適 LAI が比較的低かった理由として，群落の受光面積のうち葉面積が占める割合が茎や花房に比べて相対的に小さく，吸光係数が比較的大きいこと（第 3-2 図）が考えられる．また，今回得られた最適 LAI は，日射量の減少に伴い 8 月から 10 月と徐々に低くなっているが，前述のとおり秋以降の呼吸速度の低下を考慮した場合でも，日射量の減少に伴い最適 LAI も低下するため，秋以降の LAI を低く管理する必要がある．つまり，今回行った処理のように，9 月中に半数の株を摘心し，11 月中に株を除去することによって LAI と着果数を適正に管理することが，本栽培体系により高収益化を目指すうえで重要と考えられた．



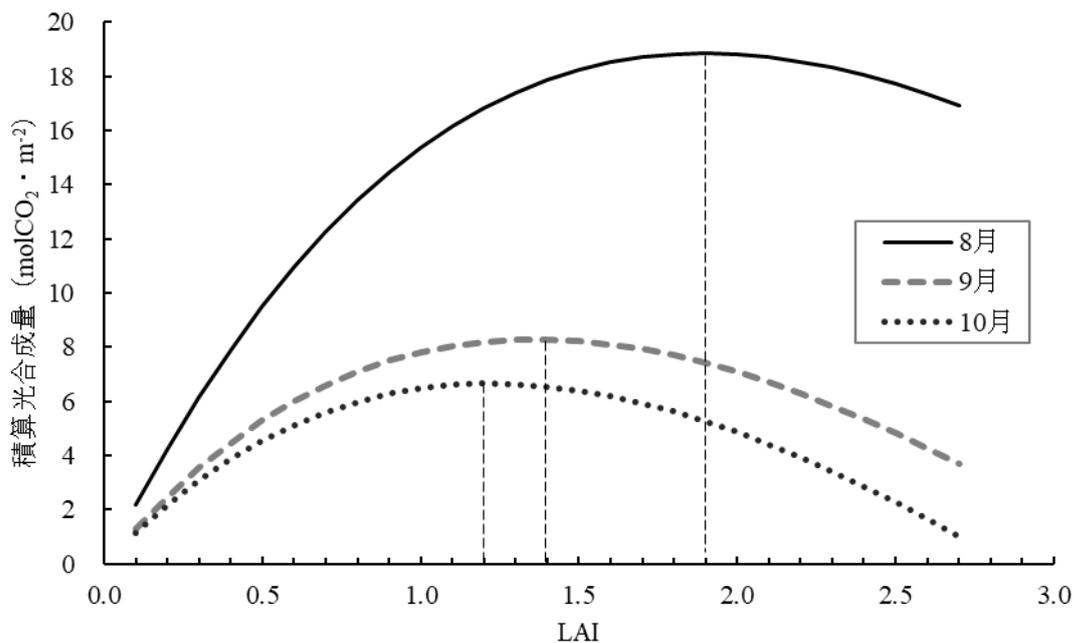
第3-1図 群落光合成量シミュレーションの流れ



第3-2図 夏季密植区におけるミニトマトのLAIと相対PPFDとの関係
 品種：CF千果 2020年8月20日測定
 ロング光量子センサ (LI-191SB, LI-COR社) 使用
 上位葉6枚目, 12枚目, 15枚目の位置で測定 (2反復) した



第3-3図 ミニトマトのPPFDと純光合成速度との関係
 品種：CF千果 (夏季密植区)
 2020年10月6日に光合成蒸散測定装置 (LI-6400, LI-COR社) で測定
 測定条件：気温35°C, 相対湿度約70%, CO₂濃度400 ppm
 上位葉は, 展開葉上位5枚目, 下位葉は, 展開葉上位25枚目を測定



第3-4図 ミニトマトのLAIと月別群落積算光合成量との関係

品種：CF千果

積算日数および積算日射量：8月（31日間，530.1MJ・m⁻²），

9月（30日間，314.7MJ・m⁻²），10月（31日間，287.1MJ・m⁻²）

縦破線は，各月において光合成量が最大化するLAIを示す

第 3 節 総 合 考 察

第 3 章 では， 高 温 期 に お け る 群 落 内 の 温 度 上 昇 と 高 温 障 害 を 回 避 し つ つ ， 光 合 成 量 の 増 加 に よ り 多 収 化 が 可 能 と な る 新 た な 栽 培 体 系 を 開 発 す る た め ， 栽 培 初 期 で あ る 夏 季 の み 密 植 に し ， 秋 に 摘 心 し 冬 に 慣 行 の 栽 植

密度に減らした場合のミニトマトへの影響を評価するとともに、光合成量が最大化する最適 LAI と最適栽植密度の推定を行った。その結果、7月定植の長期どり作型において、生育初期である7月以降の高温期を中心に密植にし、9月に株の半数を摘心しつつ11月まで栽植密度が高い状態とし、それ以降に慣行の栽植密度に減らすことにより、9～10月の生産を多収化させることができる可能性が示された。本栽培体系は、種苗増加分以外の追加コストが少ないうえ、特に高単価の時期の収量が増加することで、大幅な所得向上が見込めることから、国内栽培面積の大半を占める中小規模の生産者にとっても取り組みやすく普及が期待できると思われる。さらに、密植とするだけで昇温抑制、湿度維持、高温障害緩和の効果が得られる今回の技術は、大玉トマトやその他のナス科野菜、またウリ科野菜など他品目への応用も期待でき、高温環境下における施設園芸生産の安定化技術になりうると考えられる。一方で、密植による作業性の評価や改善、また既存技術との組合せについては、今後の研究課題である。

総 括

国内のミニトマト生産は、生産量、栽培面積ともに堅調な伸びを示している。一方、市場取引価格は時期による変動が大きく、9～10月が1年のうちで最も高くなっている。生産者の収益向上のためには、この時期に多収が見込める栽培体系が必要であるが、果実の成熟日数を考えると、7月中に定植を行う必要がある。しかしながら、近年はトマト黄化葉巻病対策のため温室の開口部に0.4 mm目合以下の防虫ネットを展張することから、換気効率が低下し、夏季には温室内が非常に高温となる。その結果、さらなる生育不良や減収を招く可能性がある。したがって、夏季に温室内で栽培を行うためには、効果的な暑熱対策技術が必要となる。これまで多くの対策技術が開発されているが、いずれも導入コスト大きく、特に中小規模の生産者にとっては導入が困難な場合が多い。以上のことから、生産規模や新たな機器・資材の導入可否など生産者の状況に応じた暑熱対策技術を提案することが望ましいと考え、本研究では導入コストが異なる3種類の暑熱対策

技術について検討を行った。

まず第 1 章では，外部細霧冷房装置について検討した。第 1 節において，既存のパイプハウスへ後付けした際の環境特性を明らかにし，第 2 節においてミニトマトの生育，収量への影響について検討した。その結果，外気と比較して温室内の温度が低下するとともに相対湿度が上昇し，いずれも変動は小さく抑えられた。対照である遮光したパイプハウスとの環境比較でも，気温の低下，湿度の上昇，飽差（HD）の低下の高い効果が認められた。これらにより，ミニトマトの葉および花房の発生速度が増加するとともに，個葉面積が大きくなることで受光量が増加したと考えられた。さらに，高温条件の緩和と過剰な蒸散が抑えられることにより平均果重が増加し，生産性が向上した。外部細霧冷房装置は，連続運転ができる点と葉濡れの発生がない点でパッドアンドファンと同様のメリットがある。ただし，既存温室に後付けでき，導入コストを抑えられるため，外部細霧冷房の方が有利であると考えられた。

次に第 2 章では，夏季のミニトマト栽培において効

果的な遮光資材の利用方法の確立に資するため，異なる色の遮光資材の特性について，特に散乱光に着目し，温室内環境を評価した．第1節において，遮光資材の色の違いが夏季の温室内環境とミニトマトの収量に及ぼす影響について調査したところ，散乱光率が白色資材で最も高く，次いで銀色，黒色となり，色の違いにより大きな差があった．また，ミニトマトの生産性については，総果実重量が最も重く，不良果が少ない傾向であった白色資材で，商品果重量が最も重かった．収量増加の要因は，遮光率の違いによる受光量の影響のほか，温室内の散乱光量が増加し，受光環境の改善に伴う光合成量の増加と，温室内気温の抑制や果実への光の集中が緩和されることによる障害果の減少も考えられた．第2節では，さらなる遮光資材の特性評価として，白色資材同士でも製品によって特性の違いがあるかどうかを検証するため遮光率および散乱光率について調査した．その結果，いずれの白色資材も遮光率が高いほど散乱光率も高くなるほか，製品によって遮光率と散乱光率の関係は異なるため，同じ白色の遮光資材であっても，製品により素材，製法や間隙

率などの違いなどによって特性も異なる可能性が示唆された。

第3章では、高単価が期待できる9～10月に一定の収量が得られる7月定植の長期どり作型を前提としたうえで、栽培初期である夏季のみ密植にし、秋に摘心し冬に慣行の栽植密度に減らすことで、高温期における群落内の温度上昇と高温障害を回避しつつ、群落光合成量の増加により多収化が可能となる新たな栽培体系の開発を試みた。まず第1節において、高温期である初期に密植した際の、温室内の環境およびミニトマトの生育と収量に及ぼす影響を評価した。その結果、温室内環境は密植による蒸散量増加により温度の低下が確認できた。また、早期、全期間ともに、面積当たり収量は大幅に増加した。この要因としては、夏季において、LAIの増加に伴い光合成量が増加し、さらに面積当たりの着果数が増加したほか、裂果を中心とする障害果が減ったためと考えられた。続いて第2節では、密植による増収の要因を光合成量の観点からも検証すること、また、夏季におけるミニトマトの最適な栽植密度を明らかにすることを目的として日射量、群

落内相対 PPF D, 光 - 光合成曲線から LAI 別の積算光合成量を試算し, 光合成量が最大化する LAI と, その値から最適栽植密度を推定した。その結果, 光合成量が最大化する LAI 値は 8 月で 1.9 となり, 本研究で密植処理を行った区の LAI である 1.7 と近い値にあることから, 本研究の処理密度が妥当であり, 光合成量の観点からも密植によって増収したことが確認できた。さらに, 光合成量が最大化する LAI から最適栽植密度を推定した結果, 8 月, 9 月, 10 月はそれぞれ $5.21 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$, $3.84 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$, $3.29 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ となった。したがって, 夏季においては $5.21 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ 程度とし, 秋以降は, 日射量の減少に伴い栽植密度を夏季よりも低く管理することが望ましいと考えられた。以上より, 密植により単価の高い 9~10 月に高温の悪影響を緩和して多収化を達成し, 所得向上が期待できる新たな栽培体系の可能性が示された。

以上のことから, 本研究で検討した 3 種類の暑熱対策技術, 具体的には栽培温室の改造や機器の導入のためのコストが必要な外部細霧冷房, 比較的 low コストで導入可能な遮光, 新たな機器・資材が不要な密植につ

いては、いずれも十分な実用性を有し、それぞれコストに見合った効果が得られることから、夏季の収益を向上させる手段として、生産規模や生産者の状況に応じた提案が可能であると考えられた。具体的には、大規模生産を行っており一定の投資が可能な場合は外部細霧冷房、生産規模関係なく大きな投資が難しい場合は遮光、小規模かつ大きな投資が不可能な場合は密植を提案することが望ましい。

一方で、地球温暖化が進行する中、今後ますます夏季の高温が大きな課題となることが予想される。今回の研究では、それぞれの技術を組合せた場合の検証は行っていないが、これらの組合せ、またはその応用により、さらに厳しい栽培環境でも収量向上の効果が期待できる。以下、今回明らかになった特性をもとに、組合せの効果について考察を行う。

まず、外部細霧冷房と遮光の組合せについて検討する。外部細霧冷房は、遮光資材を展張せずとも単独で高い昇温抑制効果が得られるが、外部細霧冷房装置の構造上、温室内を上層と下層に区切るためのPOフィルムが必要であり、その分だけ日射量が減少する。近

年，近年光線透過量を維持したまま高い散乱性を有する PO フィルムが販売されており（杉山，2021），内部の PO フィルムに散乱性を有するフィルムを用いることで群落の光合成量を増加させることができ，増収につながると考えられる．

次に，外部細霧冷房と密植の組合せについて検討する．外部細霧冷房は気化冷却の原理を利用しており，密植は蒸散量を増加させることで温室内気温を低下させることができる．つまり，両者とも同様の作用によるものである．したがって，外部細霧冷房のみで十分な効果が得られる場合には費用対効果は低下すると考えられる．逆に外部細霧冷房のみでは十分でない場合には，それぞれの効果は相加的となり，単独での導入よりも効果が高まると考えられる．さらに，地中蓄熱量の多少は，昼間の透過日射量，室内気温，植被や土壌の熱的特性などが関係しており（古在ら，1985），密植により植被が大きくなることで地中蓄熱量が減少し，冷房効果が高まると考えられる．ただし，外部細霧冷房の条件下では，吸光係数や葉面積が変化するため栽植密度の調査は必要であるとともに，外部細霧冷房を

単独で導入した場合に比べて湿度が高くなることから、病害発生リスクについては検討が必要である。

次に、遮光と密植の組合せについて検討する。遮光によって一定の昇温抑制効果は期待できるが、群落受光量は減少する。受光量の変化に対しては本研究で行ったシミュレーションで対応可能であり、遮光率や受光量に応じた最適 LAI および最適栽植密度の推定ができる。ただし、散乱光率が著しく高まる白色遮光資材を用いた場合、LAI が増加しても光の減衰は直達光の場合より少ない（フューヴェリンク・キールケルス，2017）。したがって、その条件における LAI と相対 PPFD の関係のパラメーターを取得したうえで、シミュレーションをやり直す必要がある。

以上、本研究で扱った暑熱対策技術の組合せについても検討したところ、いずれ技術も組合せが可能であり、より高い効果が得られると考えられた。ただし、その場合の細かい栽培条件については、今後の研究課題である。引き続き暑熱技術の開発を行い、夏季のミニトマト生産安定化に向けて尽力していきたい。

謝 辞

本論文を取りまとめるに当たり，岡山大学大学院環境生命自然科学学域教授の安場健一郎博士には，終始懇切なご指導とご高閲を賜りました．また，安場博士には，社会人学生である著者のために，夜間や休日に多くの時間を割いていただきました．安場博士の熱意のこもったご指導によって，本論文を取りまとめることができました．心より感謝申し上げます．また，岡山大学大学院環境生命科学研究科教授の後藤丹十郎博士，吉田裕一博士には貴重なご助言とご鞭撻を賜りました．深く感謝いたします．同講師の遠藤みのり博士，同助教の元木航博士には有益なご示唆とご支援を賜りました．厚く御礼申し上げます．

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構基盤技術研究本部上級研究員の河崎靖博士には，本研究の契機をいただくとともに，共同研究者として，設計段階から考察まで貴重なご助言と多大なご支援を賜りました．深く感謝の意を表します．同上級研究員の畔柳武司博士氏には，共同研究者として環境データの

測定や解析について本研究を支えていただきました。厚く感謝の意を表します。徳寿工業株式会社の谷口将一氏には、第3章の研究を実施するにあたり、外部細霧冷房装置の設置に関する助言および制御装置を提供いただいた。心より御礼申し上げます。

社会人としての大学在籍にあたって、香川県農業試験場前場長の大山興央氏、現場長の岡崎力氏、野菜・花き研究課長池内隆夫氏には寛大なご配慮をいただきました。深く感謝いたします。国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構西日本農業研究センター中山間畑作園芸研究領域および香川県農業試験場野菜・花き研究課関係者の皆様には、研究の実施にあたり、多大なご協力と温かい激励をいただきました。深く感謝いたします。国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構西日本農業研究センター中山間畑作園芸研究領域主任研究員の矢野孝喜博士には、同じ研究室の社会人学生の同期として様々な相談に乗っていただいた。厚く御礼申し上げます。

最後に、研究生活を温かく見守ってくれた家族ならびに友人に心から感謝いたします。

引用文献

- 東 卓弥・西森裕夫・神谷 桂・奥野憲治．2014．外気導入型細霧冷房が夏季ハウス内環境およびミニトマトの生育・収量に及ぼす影響．和歌山農林水産試験研究機関研報．2: 7-13.
- De Koning, A. N. M. 1994. Development and dry matter distribution in glasshouse tomato: a quantitative approach. Ph.D. Thesis. Wageningen Agricultural Univ. Wageningen.
- Fernandez-Muñoz, R., J. J. Gonzalez-Fernandez and J. Cuartero. 1994. Methods of testing the fertility of tomato pollen formed at low temperature. J. Hort. Sci. 69: 1083-1088.
- 後藤英司．2015．温度制御．p. 99-110．日本施設園芸協会企画・編集．施設園芸・植物工場ハンドブック．農文協．東京．
- 半場祐子・守屋晶子．葉面の濡れがインゲン葉の光合成機能に及ぼす影響．2003．日本植物生理学会年会およびシンポジウム講演要旨集．2003: 628.

林 真紀夫．2020．細霧冷房．日本風工学会誌．45：8-12．

林 真紀夫・古在豊樹・渡部一郎．1983．温室におけるヒートポンプ利用（2）夏期夜間冷房．農業気象．39：181-189．

林 真紀夫・菅原崇行・中島浩志．1998．自然換気型細霧冷房温室の温湿度環境．生物環境調節．36：97-104．

フューヴェリンク，エペ・キールケルス，タイス．2017．植物の環境反応．p. 99-153．フューヴェリンク，エペ・キールケルス，タイス著．環境制御のための植物生理（中野明正・池田英男監訳）．農文協．東京．

フューヴェリンク，エペ・オケーロ，ロバート C.O.. 2020．発育過程．p. 71-99．フューヴェリンク エペ編著．TOMATOES 2nd Edition トマト 100 トンどりの新技術と理論（中野明正・東出忠桐・松田 怜監訳）．農文協．東京．

樋江井清隆・伊藤 緑・番 喜宏・恒川靖弘．2018．非破壊によりトマトの個葉面積を推定する回帰モデ

- ルの構築及び検証．愛知農総試研報．50: 19-26.
- 東出忠桐．2018．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: 133-146.
- 彦坂幸毅．2016．植物の光合成・物質生産の測定とモデリング．p. 58-74．共立出版．東京．
- 久枝和昇・高山弘太郎・仁科弘重・東 幸太・有馬誠一．2007．大規模トマト生産温室における生産性向上に関する研究－トマト群落における光強度とCO₂固定量の垂直分布の解析－．植物環境工学．19: 19-26.
- 細井徳夫．1997．トマト個体群の持続的維持が可能な葉面積調査法．日本農業気象学会東海支部会誌．55: 13-16.
- 細野達夫・細井徳夫．2002．施設養液栽培長段トマトの日吸水量．農業気象．58: 207-216.
- 石井雅久．2015．冷房．p. 137-148．日本施設園芸協会企画・編集．施設園芸・植物工場ハンドブック．農文協．東京．
- 岩堀修一・高橋和彦．1964．トマトの高温障害に関する研究（第3報）種々のステージの花蕾に及ぼす高

- 温の影響．園学雑．33：67-74．
- 岩崎泰永・安東赫・鈴木真実．2018．側枝を利用した
茎数増加が促成栽培トマトの生育，収量および物
質生産に及ぼす影響．農研機構研究報告 野菜花き
研究部門．2：26-33．
- 香川県．1997．主要野菜栽培指針．p. 95-107．香川県．
香川．
- 神田真帆・藤原敏郎．2006．各種被覆資材の光質選択性．
茶業研究報告．102（別）：22-23．
- 金子 壮・東出忠桐・安場健一郎・大森弘美・中野明
正．2015．収量構成要素の解析からみたトマト低段
栽培における定植時の苗ステージと栽植密度．園学
研．14：163-170．
- 金子良成・樋江井清隆・榊原正典・今川正弘．2006．低
コストで設置が簡単なトマト袋培地栽培システム
の開発．愛知農総試研報．38：45-50．
- 狩野 敦．1992．2．施設園芸作物の生育と環境．p. 11-
39．古在豊樹・狩野 敦・蔵田憲次・北宅善昭・池
田英男・大川 清・今西英雄・松井弘之・松尾昌
樹・三位正洋著．新施設園芸学．朝倉書店．東京．

- 河合 仁．2021．トマト この野菜の特徴と利用．p. 14-16．川城英夫編著．新野菜づくりの実際 果菜 I (ナス科・マメ類)．農文協．東京．
- 河崎 靖・岩崎泰永・安 東赫・鈴木真実．2013．トマト施設生産におけるCO₂長時間施用のための遮光・遮熱資材の選定．園学研(別1)：95．
- 川嶋浩樹．2009．施設野菜におけるヒートポンプの周年利用．農耕と園芸．64(6)：41-44．
- 木村泰子・神田真帆．2013．本ず被覆内の分光スペクトル特性と紫外線照射および除去が茶新芽の品質に及ぼす影響．茶業研究報告．116：1-13．
- 木野本真沙江・松本佳浩・吉田 剛．2013．細霧冷房装置利用による相対湿度の制御がトマト生体情報および収量品質に及ぼす影響．栃木農試研報．71：27-31．
- 香西修志・河崎 靖．2022．施設栽培ミニトマト7月定植長期どり作型における高収益化のための栽植密度コントロールの影響評価と最適栽植密度のシミュレーション．園学研．21：449-457．
- 古在豊樹・岩崎泰永・後藤英司・関山哲雄・丸尾 達・

- 中野明正．2016．閉鎖型温室・閉鎖型太陽光植物工場の可能性と課題．農業および園芸．91: 1204-1214．
- 古在豊樹・權在永・林真紀夫・渡部一郎．1985．温室の冷房負荷に関する研究（1）夏期夜間の負荷特性．農業気象．41: 121-130．
- 熊本県野菜振興協会．2012．耕種基準．p. 19-20．熊本県野菜振興協会．熊本．< https://k-engei.net/yasai/general/koushu_standard/>．
- Li, T., E. Heuvelink, T. A. Dueck, J. Janse, G. Gort and L. F. M. Marcelis. 2014. Enhancement of crop photosynthesis by diffuse light: quantifying the contributing factors. *Annals of Botany*. 114: 145-156.
- 三原義秋・古牧弘．1973．温室の細霧冷房（Fog&Fan）法の実施例について．農業気象．28: 231-236．
- Monsi, M. and T. Saeki. 1953. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japan. J. Bot.* 14: 22-52.

森山友幸・林三徳・井手治．2009．オープンハウスの内張り展張に適した遮光資材の特性．福岡農総試研報．28：89-93．

長岡正昭・高橋和彦・新井和夫．1984．トマト・キュウリの光合成・蒸散に及ぼす環境条件の影響．野菜試報 A．12：97-117．

長菅香織・上野広樹・松尾哲・今西俊介・松永啓．2018．夏秋期における栽培時期および果房による遭遇温度の違いがトマト果実肥大に及ぼす影響．園学研．17：327-335．

中野明正．2020a．1．基本的な栽培特性．p．18-39．中野明正編著．トマトの生産技術．誠文堂新光社．東京．

中野明正．2020b．2．トマト生産と流通の状況．p．80-87．中野明正編著．トマトの生産技術．誠文堂新光社．東京．

中山秀貴．2010．送風機を用いたトマトの送風振動受粉法．農作業研究．45：195-201．

日本規格協会・繊維評価技術協議会．JIS L 1055:2009
カーテンの遮光性試験方法．2009．

野島義照・長谷川秀三．1995．夏期における各種造園植

物の葉面からの蒸散量．ランドスケープ研究．58:
97-100.

農林水産省．2023a．令和4年産野菜生産出荷統計．e-
Stat 政府統計の総合窓口．<
https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_yasai/>.

農林水産省．2023b．令和4年青果物卸売市場調査報告．
e-Stat 政府統計の総合窓口．<
https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/seika_orosii/>.

岡田益己．1997．資材の特性とその作用を理解しよう．
P. 30-32．岡田益己・小沢 聖編著．べたがけを使
いこなす．農文協，東京．

斎藤邦行・下田博之・石原 邦．1992．水稻多収品種の
乾物生産特性の解析（第5報）個体群光合成速度
のシミュレーションによる比較．日作紀．61: 62-
73.

斎藤 隆・今野義孝・伊東秀夫．1963．トマトの生育な
らびに開花・結実に関する研究（第4報）育苗期
の床土の肥瘠，灌水量および株間が生育ならびに

- 開花・結実に及ぼす影響．園学雑．32: 186-196.
- Saito, T., Y. Mochizuki, Y. Kawasaki, A. Ohyama and T. Higashide. 2020. Estimation of leaf area and light-use efficiency by non-destructive measurements for growth modeling and recommended leaf area index in greenhouse tomatoes. Hort. J. 89: 445-453.
- 坂谷英志郎．2018．植物栽培温室．特許番号特許第6438167号．
- 佐藤 卓．2006．地球温暖化に伴うおだやかな高温ストレスがトマトの生産性と雄性器官の発達に与える影響．食と緑の科学．60: 85-89.
- 島田縁子．1992．光合成・蒸散過程の統合的理解について（I）光合成モデルと気孔開閉の仕組み．日本緑化工学会誌．17: 224-235.
- 杉山聡教．2021．PO系フィルムの散乱光特性の最近の動向と利用の考え方．施設と園芸．194: 13-18.
- 鈴木克己・佐々木英和・永田雅靖．2013．トマト果実着色不良の発生要因と対策方法に関する研究．野菜茶研報．12: 81-88.
- 鈴木隆志・野村康弘・嶋津光鑑・田中逸夫．2009．夏秋

トマト雨よけ栽培における放射状裂果の発生に及ぼす着果制限，果房被覆および二酸化炭素施用の影響．園学研．8：27-33．

田尻一裕・坂本豊房・三原順一．2012．散光性フィルム被覆におけるイチゴ「熊研い548」の収量，品質．九州農業研究発表会発表要旨．75：131．

Thornley, J. H. M. 1976. Photosynthesis. Mathematical models in plant physiology. p. 92-110. Academic Press, London, UK.

鳥生誠二・高橋和彦・金文秀．1982．果菜の光合成作用に及ぼす高温の影響．愛媛農試研報．22：17-22．

魚本年春．2004．遮光・防虫・防鳥ネット．P. 59-61．日本施設園芸協会・21世紀施設園芸研究会監修．新訂園芸用被覆資材．園芸情報センター．東京．

Verkerk, K. 1955. Temperature, light and the tomato. Mededelingen van de Landbouwhogeschool te Wageningen. 55: 175-224.

Wada, T., H. Ikeda, K. Matsushita, A. Kambara, H. Hirai and K. Abe. 2006. Effects of shading in summer on yield and quality of tomatoes grown on a single-

truss system. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 75: 51-58.

和歌山県農林水産部. 2009. 環境保全型農業栽培技術指針（改訂版）. p. 26-29. 和歌山県農林水産部. 和歌山.

<https://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/070300/071400/ecofamar/shishin/mokuzi_d/fil/zentai.pdf>.

渡邊圭太・中西幸太郎・光川嘉則・櫻井基生. 2014. 簡易設置型パッドアンドファン冷房が高温期のハウス内温度，飽差並びにトマトの生育，収量に及ぼす影響. 兵庫農林水技総セ研報（農）. 62: 14-18.

渡邊孝一・浅野洋介・栗本育三郎・糠谷綱希・狩野敦・丸尾達. 2016. 太陽光型植物工場における連続細霧発生による気温・飽差制御システムの開発. 計測自動制御学会論文集. 52: 292-298.

山口智治. 2020. パッドアンドファン冷房方式. 日本風工学会誌. 45: 13-16.