日射強度に応じた遮光が夏秋栽培トマトの生育、収量 および果実品質に及ぼす影響

川口岳芳^{1*}・上藤満宏¹・伊藤栄治¹・越智資泰^{1a}・木場剛志²・
堀野克己²・日高功太³・尾崎行生⁴

¹ 広島県立総合技術研究所農業技術センター 739-0151 広島県東広島市八本松町原

² 株式会社寿エンジニアリング 731-4215 広島県安芸郡熊野町

³ 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構九州沖縄農業研究センター 839-8503 福岡県久留米市御井町

⁴ 九州大学大学院農学研究院 819-0395 福岡市西区元岡

Effect of Shading Corresponding to Solar Radiation on Growth, Quality, and Yield of Tomato in Summer–Autumn Cultivation

Takeyoshi Kawaguchi^{1*}, Mitsuhiro Uefuji¹, Eiji Ito¹, Motoyasu Ochi^{1a}, Koji Koba²,
Katsumi Horino², Kota Hidaka³ and Yukio Ozaki⁴

¹Hiroshima Prefectural Technology Research Institute, Agricultural Technology Research Center,
Hara, Hachihonmatsu, Higashihiroshima, Hiroshima 739-0151

²Kotobuki Engineering Co., Ltd., Kumano, Aki, Hiroshima 731-4215

³NARO Kyusyu Okinawa Agricultural Research Center, Mii, Kurume, Fukuoka 839-8503

⁴Faculty of Agriculture, Kyushu University, Motoooka, Nishi, Fukuoka 819-0395

Abstract

An automatic shading system that can control the opening and closing of shading material according to the intensity of solar radiation was devised in order to minimize the decrease in growth and yield of tomato in summer-autumn harvesting cultivation due to high temperature and excessive solar radiation in summer. The control method was established according to the photo-synthetic properties of tomato, and the effect of application of the system on its growth and yield was assessed. Based on the measurement results of the photosynthetic rate of individual leaves and the light environment of the plant community, it was found that the upper limit of the appropriate range of the setting is PPFD 1200 ~ 1600. It was also noted that the lower limit was $670 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ or more, which is less than the upper limit multiplied by the light transmittance of the shading material. Based on the measurement results of the photosynthetic rate and response time of stomatal conductance associated with light intensity, the control interval at which the solar radiation sensor senses the light intensity and opens and closes the shading material should be as short as possible within the range not less than the time required for the opening and closing of the shading material. Furthermore, it was shown that the yield of marketable fruits increased and fruit cracking was reduced without a decrease in the stem diameter or succulent growth by shading based on the control method in summer-autumn harvesting tomato cultivation.

Key Words : fruit cracking, photosynthesis, plant community, stoma, transpiration

キーワード : 群落, 蒸散, 気孔, 光合成, 裂果

1. 技術開発の背景

広島県におけるトマトの生産概況は、2015年実績では、栽培面積45 ha、販売量3,450 tとなっている（広島県園芸振

興協会, 2017）。主な産地である県北部の高標高地（海拔400～600 m）では、夏季の冷涼な気候を利用し、3～4月に定植し、5～12月に収穫する夏秋栽培（野菜・茶業試験場, 1989）が行われている。本作型は、広島県における大玉トマト生産量の約6割を占め、今後もさらに増加を図る方針である（広島県園芸振興協会, 2017）。しかし、近年、高標高地においても、夏季の高温および強日射により、開花および結実の不良（岩堀ら, 1963; 吉田ら, 2002）、生育および収量の低下、ならびに障害果の発生（岩堀・高橋, 1964; 橋ら, 1990; 宇井・高野, 1995）などが顕著である。また、同心円状および放射状裂果など障害果は、果実への直射日

2020年6月13日 受付。2021年3月9日 受理。

本報告の一部は園芸学会平成26年度秋季大会で発表した。

本報告の一部は農研機構生物系特定産業技術研究支援センター「攻めの農林水産業の実現に向けた革新的技術緊急展開事業（うち産学の英知を結集した革新的な技術体系の確立）」において実施した。

* Corresponding author. E-mail: t-kawaguchi86668@pref.hiroshima.lg.jp

^a 現在：広島県立農業技術大学校

光が強いと多発し（加藤，1993；鈴木，2014；鈴木・柳瀬，2005），これらの対策技術の開発が急務である。

夏季の高温および強日射の対策として，ヒートポンプやパッド&ファンなどの利用がある（石井，2015）が，アーチ型パイプハウスでは遮光資材の被覆（齋藤ら，2009）が一般的である。しかし，遮光資材の常時被覆は，朝夕や曇雨天時の日射量の少ない時間帯も遮光することとなり，日射量不足による茎葉重の減少（斎藤，2015a）や光合成量低下による収量減少（斎藤，2015c）が生じる。これらのことから，朝夕や曇雨天時の日射量を減じることなく，夏季の高温および強日射による生育，収量および果実品質の低下を軽減するためには，強日射時のみ遮光する方法が有効であると考えられる。遮光による効果については，これまで一定の日射量（吉田・中園，2006）や積算日射量（井手ら，2011）に基づく遮光処理により，株の乾物重や収量の増加が報告されている。

そこで，筆者らは，中小規模のパイプハウスにも導入でき，太陽光の放射照度（以下，日射強度）に応じて遮光資材の開閉を自動制御できるシステム（以下，自動調光システム，川口・上藤，2016，特許公開2016-182074；川口ら，2017，特許公開2017-184721）を開発し，その制御盤（日射操作くん，（株）寿エンジニアリング）を実用化した。

しかし，本システムの遮光資材を開閉する日射強度などの適正な制御設定については明らかでない。そこで，本報では夏秋栽培において，植物の光合成速度および蒸散速度などから，本システムの遮光資材を開閉する制御値として適正な日射強度の設定範囲を検討し，これに基づく遮光方法が生育，収量および果実品質に及ぼす影響について明らかにしたので報告する。

2. 技術開発の概要

1) 材料および方法

(1) 自動調光システムにおける制御値の検討（実験1）

i) システムの概要

本システムは，制御部と駆動部から構成される。遮光資材の開閉は，時間または日射強度による制御が可能であり，日射制御については，パイプハウス内あるいは外に設置した日射センサが日射強度を感知し，遮光資材の開閉を制御する。日射センサの設置位置は，パイプハウス内に設置した遮光資材の下に位置する植物茎頂部分，あるいは遮光資材の上にあたる外張り直下，パイプハウスの外の3箇所が考えられる。日射センサの設置位置を植物茎頂部分とする場合は，植物体が晒される光環境に基づき，本システムを稼働することが可能であるが，センサの測定値がパイプなどの遮蔽物の影響を受けやすい。一方，日射センサの設置位置をパイプハウス内の外張り直下あるいは外とする場合は，いずれもパイプなどの遮蔽物の影響を回避できるが，外張りの汚れや遮光資材の遮光率を考慮し，実際の植物体の光環境を算出した設定値とする必要がある。

第1図に日射センサをパイプハウス内茎頂部分に設置し

第1図 日射センサをパイプハウス内茎頂部分に設置した場合の本システムの日内における稼働および日射強度の推移イメージ（上：無処理時，下：調光時）

A：制御インターバル，B：遮光の状態

C：無遮光の状態

D：遮光資材の開閉設定上限値

E：開閉設定下限値

FおよびGは遮光と無遮光の状態が混在するため以下に詳細を示す

F：①；日射強度が設定下限値を超え不感帯に入る，無遮光状態を維持

②；無遮光状態での日射強度が設定上限値を上回り，遮光資材の展張を開始し，遮光状態となる

③；遮光状態での日射強度が不感帯にあるため遮光状態を維持

④；遮光状態での日射強度が設定上限値を上回る，遮光状態を維持

G：①；遮光状態での日射強度が設定上限値を下回り不感帯に入る，遮光状態を維持

②；遮光状態での日射強度が設定下限値を下回り，遮光資材の収納を開始し，無遮光状態となる

③；無遮光状態での日射強度が不感帯にあるため無遮光状態を維持

④；無遮光状態での日射強度が設定下限値を下回る，無遮光状態を維持

た場合の，本システム稼働時の遮光資材の挙動および日射強度の推移イメージを示す。設定した遮光資材の開閉制御インターバル（第1図A）に基づき，日中設定上限値を上回る（第1図B）と遮光資材を展張して遮光状態となり，ハウス内の日射強度が削減される。一方，夕方や曇天時に下限値を下回る（第1図C）と遮光資材を収納して無遮光状態となり，ハウス内の日射強度が増加する。上限値～下限値の範囲内（第1図DおよびE，以下，不感帯）で日射強度が変化する場合，遮光資材の頻繁な開閉によるトラブルやシステム駆動部の消耗を回避するため，直前の遮光または無遮光状態を維持する。

ii) 耕種概要

実験は広島県立総合技術研究所農業技術センター（広島県東広島市八本松町，北緯34度27分，東経132度43分，海拔224m）内の厚さ0.1mmの農業用ポリオレフィン系フィルム（スカイコート5，タキロンシーアイ（株））を展

張したパイプハウス（南北棟）において実施した。品種は、‘りんか409’（株）サカタのタネ）および‘桃太郎サニー’（タキイ種苗（株））を供試した。両品種とも2014年3月26日にセル成型苗用培地（与作N150, ジェイカムアグリ（株））を充填した200穴セルトレイに1穴当たり1粒播種し、明期を8～17時、25°C、メタルハライドランプ（MF1000・L-J2/BU-PS, 三菱電機（株））を用い光合成有効光量子束密度（以下、PPFD） $600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、暗期を18°Cに設定したグロスチャンバー（HSK-MRS-1, （株）広島設備開発）に搬入した。4月10日までの15日間育苗した後、マサ土とバーク堆肥（有機物70%, N:P₂O₅:K₂O=1.5%:1.1%:0.4%, 久米産業（株））を1:1（V/V）、さらに、有機入り配合肥料（N:P₂O₅:K₂O=10%:8%:9%, 広島県製肥（株））を1鉢当たり1.25g混和し充填した10.5cmポリポットに鉢上げし、パイプハウス（間口6m, 奥行き15m）内で二次育苗した。育苗時は1日2回30分間の底面給水により灌水した。また、温風加温器により最低気温10°C, 換気温度20°Cで管理した。

5月14日にパイプハウス（間口6m, 奥行き15m, 圃場実面積65m²）内に設置した栽培ベンチ（岡田ら, 2013）に株間35cmで1ベンチ当たり31株（栽植密度193株・a⁻¹）定植した。栽培ベンチは、南北に幅25cm, 長さ11mおよび深さ25cmとし、培地表面の高さを地上40cmとした。各ベンチは15cmの間隔で並べ2本を1組とし、2組を1.5mの間隔で配置した。マサ土、バーク堆肥、ピートモスおよびパーライトを2:1:3:1（V/V）で混合した培地を、1株当たり12L充填した。仕立て方法は、主枝1本仕立てとした。誘引方法はつる下ろし誘引とし、地表から2mに固定した直径22mmの直管パイプから誘引紐（つりっ子紐, ナスニックス（株））をつるし、クリップ（クキロック, タキゲン製造（株））で植物体を固定し、茎頂が常に1.8mの高さになるように誘引した。栽培期間中は、畝面から深さ10cmの土壌水分張力がpF 2.1に達した時点を灌水開始点とし、畝面に敷設した灌水チューブ（ストリームライン80, ネタフィムジャパン（株））により1回当たり5mm相当量を灌水した。栽培期間中の施肥は、広島県の栽培指針（広島県東部農業技術指導所, 2016）に基づき、複合肥料（養液土耕2号, N:P₂O₅:K₂O=14%:8%:25%, OATアグリオ（株））を用い、1株1日当たりのN成分を第4段果房開花期までは0～300mgまで徐々に増加、その後削減し、第12段果房開花期には120mgとなるように時期別に調整し点滴灌液した。

iii) PPFDおよび気温がトマト個葉の光合成速度および蒸散速度に及ぼす影響

遮光資材を開閉する上限値および下限値の設定範囲を明らかにするため、PPFDおよび気温が品種別の光合成速度および蒸散速度に及ぼす影響を検討した。

概ね第7花房が開花した7月2～3日に、第6段果房上葉の完全に展開した小葉を光合成総合解析システム

（LI-6400XT, LI-COR社）の測定チャンバーで挟み、チャンバー（6400-40, LI-COR社）内の気温およびPPFDをそれぞれ20および30°C, 0～2000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ とし、品種別のPPFDおよび温度に伴う光合成速度および蒸散速度を計測した。測定チャンバー内の相対湿度を50%, CO₂濃度を400ppmとし、両品種3株について、10:00～15:00の間、各設定温度でLED冷光光源のPPFDを変化させ、概ね2～3分後の安定した時点の値を計測値とした。

iv) PPFDの増減がトマト個葉の光合成速度および気孔コンダクタンスに及ぼす影響

刻々と変化する日中の日射強度を日射センサが感知する遮光資材の開閉制御インターバルを決定するため、PPFDの増減が光合成速度および気孔コンダクタンスに及ぼす影響を検討した。

7月4日に実験1のiii)と同節位葉の小葉を同様の相対湿度およびCO₂濃度に設定した測定チャンバーで挟み、チャンバー内の気温を30°Cに維持し、PPFDを100から1200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ に増加および1200から100 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ に減少させ、0～480秒後の各項目の推移を計測した。計測株数は両品種3株とした。

v) 夏秋トマト栽培における群落内の相対日射強度の解明

栽培期間中の群落の光環境を考慮した本システムの設定範囲を明らかにするため、高さ別の群落内積算日射量を計測し、茎頂に対する相対日射強度を算出した。

群落内の積算日射量は、30°C以上の高温条件下でも正確に積算日射量の測定が可能（山田ら, 2004）な簡易積算日射量測定フィルム（オプトリーフ, O-1D, 大成ファインケミカル（株））を、パイプハウス内南北中央の2本1組の栽培ベンチの西、東および中央部に高さ180cmまで10cm間隔で設置し、一定期間据え置いた。その後、専用の小型分光光度計（オプトリーフ測定器, D-Meter RYO-470, 大成ファインケミカル（株））により退色比率を計測した。積算日射量の計測期間は、8月14～21日、21～25日および9月2～5日の3回3反復とした。また、10月14日に両品種から無作為に抽出した20株について、開花房の段数や植物体の茎頂から各果房までの長さなどの生育状況を計測した。

(2) 遮光方法が夏秋トマトの生育および収量に及ぼす影響（実験2）

自動調光システムの有効性を明らかにするため、実験1で明らかにした制御値の設定範囲に基づいた遮光方法が生育、収量および果実品質に及ぼす影響について検討した。

実験は2014～2015年において2作実施した。2014年の耕種概要については、実験1と同様とした。2015年の耕種概要についても2014年と同様とし、3月25日に播種し、4月8日までの14日間グロスチャンバー内で育苗した後、鉢上げし、5月11日に定植した。実験場所、供試品種、播種、育苗、定植、仕立て、灌水および施肥方法は、実験1と同様とした。

遮光処理として、3棟のパイプハウスを用いて、それぞ

れ栽培期間中をとおして遮光しない区（以下、対照区）、梅雨明け後～8月下旬に遮光資材（遮光率35%，らーくらくスーパーホワイト，日本ワイドクロス（株））をハウス内天井部分に常時被覆した区（以下、遮光区）およびハウス内天井部分に被覆した同遮光資材を日射強度に応じて自動で開閉する区（以下、調光区）を設けた。なお、遮光資材の遮光率は、常時遮光で一般的に用いられ、効果が認められている35%とした。遮光区の遮光資材の被覆期間については、2014年は7月17日～8月31日、2015年は7月19日～8月31日とした。また、調光区は、モーター（DC24V，くるファミ Ace 用 DC 原動機，（株）誠和）駆動のカーテン装置（SH ハンディ，（株）誠和）に開発した自動調光制御盤（日射操作くん，（株）寿エンジニアリング）を接続し開閉制御した。日射センサの設置位置は、植物体の光環境に基づきシステムを稼働させるため、植物茎頂部分にあたる施設内中央部の高さ約1.8mとした。遮光資材の開閉下限値および上限値は、実験1のiii)およびv)の結果より算出した範囲で設定した。2014年の下限値および上限値は、それぞれPPFD 900 および $1300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ とし、上限値～下限値は不感帯とした。2015年の設定値は、2014の実験における生育状況の達観から遮光のタイミングがやや早いと判断し、それぞれPPFD 1000 および $1350 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ とした。遮光資材の開閉制御インターバルについては、実験1のiv)の結果を参考に2014年は5分、2015年は10分とした。調光区における遮光資材の自動稼働期間については、2014年は7月17日～8月31日、2015年は5月11日～11月30日とした。また、2015年は換気のため施設の妻面を全開とした。着果処理は、4-chlorophenoxy acetic acid 液剤（トマトーン，石原バイオサイエンス（株））の100倍液にジベレリン10ppm（ジベレリン水溶剤，Meiji Seika ファルマ（株））を混和し、1週間に2回ハンドスプレーを用いて開花している花に散布した。1果房当たりの着果数は最大4果とし、摘心は、2014年は10月6日、2015年は10月5日に第18段果房の上位3葉を残して行った。1区当たりの株数および面積は、各処理区のベッド中央の連続した株について、2014年は5株、 2.6 m^2 、2015年は4株、 2.1 m^2 とし、いずれも4反復とした。

2014年は6月27日～12月15日、2015年は6月22日～11月30日の間、1週間に2回、白熟期に達した果実を収穫し、広島県の出荷規格（広島県野菜振興協会，1997）に準じ、規格別に果実数および重量を記録した。果実糖度は、収穫期間中1旬ごとに1反復5果をデジタル屈折糖度計（PR-100，（株）アタゴ）により測定した。なお、尻腐れ果、乱形果、チャック果、窓あき果および裂果を障害果とした。裂果については、放射状裂果と同心円状裂果に分け、放射状裂果は亀裂の長さにより10mm未満、10～30mmおよび30mm以上に分類した。2014年は12月15日、2015年は11月30日に栽培を打ち切り、実験終了時の成長量として、茎長、節数および茎径を調査した。また、栽培打ち切り時に

白熟期に達していなかった果実は、未熟果に分類した。

栽培期間中の施設内環境は、パイプハウス内中央部の高さ1.8mの位置に各測定機器を設置して計測した。施設内気温は強制通風シュルター（ファン付きラジエーションシールド VTI-RSF-1，（株）ビジョンテック）内に設置した自記温度計（ワイヤレスデータロガー RTR576H，（株）ティアンドデイ），照度（lx）は自記照度計（TR-74Ui，（株）ティアンドデイ）を用いて、それぞれ15分ごとに測定した。測定した照度は、太陽光（400～700nm）の換算式（相賀，1992）に基づき、54で除してPPFD（ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ），さらに、4.57で除して日射強度（ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ）に換算した。統計処理は、EXCEL 統計 Ver5.0（（株）エスミ）を用い、分散分析およびTukey法により検定した。

2) 結 果

(1) 自動調光システムにおける制御値の検討（実験1）

iii) PPFD および気温がトマト個葉の光合成速度および蒸散速度に及ぼす影響

気温20℃における個葉の光合成速度については、いずれの品種でも概ねPPFD $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ まではPPFDの増加に伴い増加したが、さらにPPFDが増加すると増加量は緩慢であった（第2図A）。蒸散速度については、いずれの品種でもPPFD 0～ $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ では大きな変化はみられなかったが、さらにPPFDが増加すると急激に増加した（第2図B）。

気温30℃における個葉の光合成速度については、いずれの品種でもPPFD $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ まではPPFDの増加に伴いほぼ直線的に増加したが、さらにPPFDが増加するとPPFD 1600 および $2000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ でやや増加がみられたものの、概ね増加量は緩慢であった（第2図C）。蒸散速度については、いずれの品種でもPPFD $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上で急激に増加し（第2図D），その増加程度は‘桃太郎サニー’が‘りんか409’と比較して大きかった。

iv) PPFDの増減がトマト個葉の光合成速度および気孔コンダクタンスに及ぼす影響

PPFD増加後の光合成速度および気孔コンダクタンスは、‘桃太郎サニー’が‘りんか409’と比較して高く推移した（第3図AおよびB）。また、PPFD増加に伴う光合成速度と気孔コンダクタンスの変化は、いずれの品種も非常に速く、増加120秒後にはほぼ定常状態となった。

一方、PPFD減少後の気孔コンダクタンスは、‘桃太郎サニー’が‘りんか409’と比較して高く推移した（第3図D）。また、PPFD減少に伴う光合成速度と気孔コンダクタンスの変化は、PPFDの増加時と同様にいずれの品種も非常に速く、減少120秒後にはほぼ定常状態となった（第3図CおよびD）。

v) 夏秋トマト栽培における群落内の相対日射強度の解明

10月14日の生育状況については、開花と肥大型の花房段数は、‘りんか409’で17.2および14.3段、‘桃太郎サニー’で17.5および14.4段であった（データ省略）。また、

第2図 PPFDおよび気温がトマト2品種の光合成速度および蒸散速度に及ぼす影響
^z 図中の垂線は標準誤差 (n=3) を示す

第3図 PPFDの増減がトマト2品種の光合成速度および気孔コンダクタンスの推移に及ぼす影響
 (A) および (B) : PPFD 100 → 1200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
 (C) および (D) : PPFD 1200 → 100 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
^z 図中の垂線は標準誤差 (n=3) を示す

茎頂から果房へ転流する光合成産物の寄与度が高い(矢戸ら, 1991) 果実肥大期の果房直下3葉までの節数および長さは, 'りんか409' で13.8節および109 cm, '桃太郎サニー' で14.6節および124 cmであった。

群落内の相対日射強度は, 群落の下層ほど低く, 肥大期の果房直下3葉が位置する高さ70~80 cmの相対日射強度は, 西側および東側では80%, 中央部では60%と低かった(第4図)。

(2) 遮光方法が夏秋トマトの生育および収量に及ぼす影響 (実験2)

栽培期間中の施設内における日平均気温は, 2014年の場合, 対照区, 遮光区および調光区でそれぞれ, 20.1~

25.6°C, 19.8~25.3°Cおよび19.9~25.2°C(10~12月は欠測)で推移した。2015年の場合, それぞれ14.3~26.5°C, 14.3~25.6°Cおよび14.4~26.7°Cで推移した(データ省略)。また, 両年の7~8月における施設内の日最高気温は, 対照区, 遮光区および調光区でそれぞれ, 34.6~39.2°C, 34.2~39.7°Cおよび33.9~38.4°Cで推移した。2014年の場合0.7~3.3°C, 2015年の場合0.6~0.8°C, 対照区と比較して調光区が低かった(データ省略)。施設内における1日当たりの積算日射量は, 2014年の場合, 対照区, 遮光区および調光区でそれぞれ, 5.0~8.1 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 3.6~8.1 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ および4.5~7.9 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ (9~12月は欠測)で推移した。2015年の場合, それぞれ2.6~8.7 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 2.6~8.7 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ お

第4図 パイプハウス内地点別の相対日射強度

および $2.7 \sim 7.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ で推移した（データ省略）。また、両年の7～8月における施設内の日内の日射強度の最高値は、対照区、遮光区および調光区でそれぞれ、 $405 \sim 435 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (PPFD $1850 \sim 1990 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $278 \sim 408 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (PPFD $1270 \sim 1860 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) および $301 \sim 345 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

(PPFD $1380 \sim 1580 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) で推移し、遮光区と比較して調光区が安定した値であった。

茎長および節間長は、実験年、供試品種および遮光方法による有意な差がみられた（第1表）。茎長については、2014年の‘桃太郎サニー’および2015年の両品種において、対照区と比較して遮光区および調光区が大きかった。節間長については、2014年の‘桃太郎サニー’および2015年の‘りんか409’において、対照区と比較して遮光区および調光区が大きかった。節数については、実験年、供試品種および遮光方法による有意な差はみられなかった。茎径については、実験年による有意な差がみられ、2015年の‘りんか409’において、対照区および調光区と比較して遮光区が小さかった。

総収量、可販果の収量および果実数は、いずれの実験年、供試品種においても、遮光方法による有意な差がみられた（第2表）。総収量については、2014年の両品種において、対照区と比較して調光区が多くなった。特に‘りんか409’では、調光区は遮光区と比較しても有意に多くなった。可販果の収量および果実数については、いずれの実験年および供試品種においても、対照区と比較して調光区が多くなった。特に、2015年では、調光区は遮光区と比較しても

第1表 遮光方法が夏秋トマト2品種の地上部の成育に及ぼす影響

年	供試品種	遮光方法	茎長 ^z (cm)	節数 ^y (節)	節間長 ^x (cm)	茎径 ^w (mm)
2014	りんか409	無遮光 (対照)	484	61.9	7.8	11.2
		遮光	496	62.1	8.0	11.0
		調光	493	61.9	8.0	11.1
	桃太郎サニー	無遮光 (対照)	508 b ^v	62.9	8.1 b	11.4
		遮光	531 a	62.7	8.5 a	11.4
		調光	540 a	63.8	8.5 a	11.2
2015	りんか409	無遮光 (対照)	475 b	63.4	7.5 b	11.2 b
		遮光	507 a	62.8	8.1 a	10.6 a
		調光	503 a	63.1	7.9 ab	11.4 b
	桃太郎サニー	無遮光 (対照)	539 b	62.2	8.6 b	11.0
		遮光	563 a	62.8	8.9 a	10.5
		調光	542 ab	62.8	8.6 b	10.9
分散分析	年 (A)		** ^u	NS	*	*
	供試品種 (B)		**	NS	**	NS
	遮光方法 (C)		**	NS	**	NS
	A × B		*	**	**	*
	B × C		NS	NS	NS	NS
	A × C		NS	NS	NS	NS
	A × B × C		*	NS	NS	NS

^z 子葉節から第17段果房直上3葉残し摘心した位置までの長さ

^y 子葉節から第17段果房直上3葉残し摘心した位置までの節数

^x 子葉節から第17段果房直上3葉残し摘心した位置までの茎長を節数で除した値

^w 第3, 6, 9, 12および15段果房直下の茎径の平均値

^v 同一年および供試品種において、異なる英文字間には、Tukeyの多重検定により5%水準で有意差があることを示す

^u *は5%, **は1%水準で有意, NSは有意差がないことを示す (n=4)

有意に多くなった。可販果の1果重については、いずれの実験年においても、遮光方法による有意な差がみられた。2015年の‘桃太郎サニー’では、対照区および遮光区と比較して調光区が小さかった。障害果および果実糖度、ならびに未熟果については、いずれも供試品種、実験年による有意な差がみられたが、遮光方法による有意な差はみられなかった。裂果の総収量は、実験年、供試品種および遮光方法による一貫した傾向がみられなかったが、2015年の‘りんか409’において、対照区と比較して調光区が有意に少なかった。また、裂果種類別の収量は、同心円状裂果および放射状裂果のいずれも供試品種による有意な差がみられた。同心円状裂果は‘りんか409’が多く、放射状裂果は特に2014年において‘桃太郎サニー’が多くなった。

3) 考 察

トマトの光合成速度と光の関係について、東出 (2015) は、光合成は作物の乾物生産および成長において最も重要な過程であるとし、個葉における光—光合成速度の関係は、非直角双曲線に近似し、弱いPPFDでは増加に伴い光合成速度が直線的に増加し、さらに増加すると飽和に達するとしている。また、景山・小西 (1988) は5万lx (PPFD $930 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、巽・堀 (1969) は7～8万lx (PPFD $1300 \sim 1480 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) で光合成速度が飽和に達するとしている。本実験においても、PPFDと光合成速度とは同様の関係がみられ、20°Cおよび30°CのいずれにおいてもPPFD $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ まではPPFDが高いほど光合成速度が速かった (第2図)。これらのことから、個葉の光合成速度を維持するにはPPFD $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上必要であり、本システムの遮光資材を開閉する設定下限値とすることが適正であると判断した。

次に、PPFDと蒸散速度については、稲田ら (2010) は、気孔開度の評価指標としての水蒸気気孔拡散電導度は、0～600 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ではPPFD増加に伴い増大するが、それ以上では頭打ちになるとしている。本実験における蒸散速度は、PPFD $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下では、稲田ら (2010) の報告と同様に、いずれの品種および気温でも低位に維持されたが、PPFD $1600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ では、急激に増加した。このことから、個葉の蒸散速度は、PPFD $1200 \sim 1600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ で急増し、その変曲点がこの範囲にあると考えられた。また、PPFDがさらに増加すると蒸散量の増加により葉の萎れなどの生育への悪影響を招くと考えられた。これらのことから、本システムの遮光資材を開閉する設定上限値の適正な範囲は、PPFD $1200 \sim 1600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ であると判断した。なお、30°Cにおいて‘りんか409’では、PPFDの増加に伴う光合成速度および蒸散速度の増加程度が‘桃太郎サニー’と比較して小さかった。これらの品種間差異については、今後高温および水ストレス耐性の面からの詳細な検討が必要である。

実験1のiv)において、PPFDの増減に伴う光合成速度および気孔コンダクタンスの反応は非常に速く、いずれの品

種においてもPPFDの増減120秒後には定常状態となった (第3図)。これまで、PPFDの急激な変化に伴う光合成速度の反応について詳細な報告はみられないが、本実験において、個葉の光合成速度や気孔コンダクタンスが施設内の光環境に敏感に反応したことから、これらの反応に応じた繊細な遮光制御が有効であると考えられた。しかし、実際の栽培施設においては、遮光資材の開閉、つまり展開あるいは収納に要する時間が概ね5～10分であり、前述の反応速度の120秒より長い。このことから、遮光資材の開閉制御インターバルは遮光資材の開閉に必要な時間以上の範囲でできるだけ短くすることが望ましいと考えられた。また、品種によりPPFD増減前後の気孔コンダクタンスの値 (第3図BおよびD) が異なったことは、実験1のiii) (第2図) と同様に、品種間差異について、今後検討が必要であると考えられた。

実験1のv)の群落内の光環境については、東出 (2015) は、個体群落レベルの乾物生産を考える場合、個葉の光合成速度も重要であるが、群落の吸光係数も考慮すべきとしている。群落内部の光環境については、高山ら (2010) が栽植密度 $2.5 \text{株} \cdot \text{m}^{-2}$ の自然光型植物工場において、高さ1.2mの群落を3層に分割した場合の相対日射強度は、上層、中層および下層でそれぞれ95、65および38%であるとしている。本実験において、肥大期の果房直下3葉に相当する高さ70～80cmの相対日射強度は、高山ら (2010) の植物工場における中層と同等の約60%であった (第4図)。実験1-iii)と本実験の結果から、果実肥大期の果房直下3葉が、前述の設定下限値としたPPFD $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (第2図) の時、茎頂部分は $670 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ と算出される。これらのことから、日射センサを施設内の植物茎頂部分に設置する場合、遮光資材開閉の設定下限値はPPFD 670以上、上限値は $1200 \sim 1600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の範囲で設定することが適正であると判断した。

実験2において、2014年の施設内の日最高気温は、対照区と比較して調光区が0.6～3.3°C低い傾向であった。また、施設内の日射強度の日最高値については、いずれの年度でも対照区が最も高く、遮光区では、遮光資材の被覆前は対照区と同等に高く、被覆後は最も低かった。一方、調光区では、日射強度に応じた遮光資材の開閉により安定した値が維持され、生育および収量の向上に寄与したと考えられた。なお、2015年の日最高気温の処理区間の差が小さかったことは、施設の妻面を全開し積極的に換気したためと推察された。また、栽培期間中の調光区の日射強度は、盛夏期の晴天日では遮光区に近い値、一方、曇天日では無遮光区に近い値で推移し (データ省略)、概ね設定した強日射時のみの遮光制御が可能であった。しかし、本実験で設定した下限値では、上限値を超え、遮光状態となった時点で下限値を下回り再び無遮光状態に戻る現象 (第1図F②とG②の繰り返し) が頻発した。この遮光資材の開閉の繰り返しは、2014および2015年の設定値では、無遮光時

第2表 遮光方法が夏秋トマト2品種の収量、果実糖度および裂果に及ぼす影響

年	供試品種	遮光方法	総収量 ^z (kg/a)	可販果 ^y				裂果						
				収量 (kg/a)	果実数 (果/a)	1果重 (g/果)	障害果 ^x (kg/a)	未熟果 ^w (kg/a)	Brix (%)	総収量 (kg/a)	同心円状 (kg/a)	放射状 ^v (kg/a)		
												～10mm	10～30mm	30mm～
2014	りんか409	無遮光 (対照)	1394 b ^u	901 b	6215 b	145	139	129	5.4	245	92	24	36	92
		遮光	1433 b	1038 ab	7064 ab	147	92	123	5.5	193	59	24	31	78
		調光	1595 a	1213 a	8289 a	146	111	115	5.3	198	84	46	36	32
	桃太郎サニー	無遮光 (対照)	1148 b	667 b	4873 b	137	182	165	6.2	151	14	26	27 b	84
		遮光	1256 ab	769 ab	5047 ab	152	179	132	5.9	189	35	25	46 ab	83
		調光	1384 a	911 a	6533 a	140	170	133	5.9	217	26	50	70 a	71
2015	りんか409	無遮光 (対照)	1631	1033 b	6895 b	150	148	181	5.6	295 a	133	45	52	66
		遮光	1622	1139 b	7300 b	156	113	221	5.5	198 ab	85	55	30	28
		調光	1694	1296 a	8651 a	150	94	205	5.6	158 b	46	65	31	16
	桃太郎サニー	無遮光 (対照)	1514	917 b	5940 b	154 a	268	187	6.1	209	15	68	74	52
		遮光	1570	956 b	6205 b	154 a	253	224	5.9	197	11	68	86	32
		調光	1544	1094 a	7459 a	147 b	182	183	6.0	133	6	54	31	42
分散分析	年 (A)		** ^t	**	**	**	NS	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	供試品種 (B)		**	**	**	NS	**	NS	**	NS	**	**	**	**
	遮光方法 (C)		**	**	**	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	A × B		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	B × C		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	A × C		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
A × B × C		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	

^z 可販果, 障害果, 裂果 (同心円状, 10 mm 以上の放射状), 2S 未満の果実および未熟果の合計重量

^y 2S (80 ~ 100 g 未満), S (100 ~ 130 g 未満), M (130 ~ 160 g 未満), L (160 ~ 200 g 未満), 2L (200 ~ 250 g 未満), 3L (250 g ~) かつ 10 mm 未満の放射状裂果の合計重量

^x 尻腐れ果, 乱形果, チャック果, 窓空き果および空洞果の合計重量

^w 栽培打ち切り時に白熟期に達しなかった果実の重量

^v 放射状裂果の亀裂の長さを 10 mm 未満, 10 ~ 30 mm および 30 mm 以上に分類

^u 同一年および供試品種において, 異なる英文字間には, Tukey の多重検定により 5% 水準で有意差があることを示す

^t *** は 1% 水準で有意, NS は有意差がないことを示す (n=4)

に日射センサが感知した日射強度（第1図F②）が、それぞれPPFD 1300～1384および1350～1538 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ を継続した場合に発生すると考えられる。盛夏期の日射強度はこれらの値を即座に超える場合が多いが、上記の遮光資材の開閉が頻繁に繰り返される場合は、設定下限値を上限値に遮光資材の光線透過率を乗じた値未満に設定し回避することが望ましいと考えられた。

施設内の光環境と生育および収量の関係については、夏季の高温および強日射は、開花および結実不良、生育および収量の低下、ならびに障害果の発生などの要因となる（岩堀ら, 1963; 岩堀・高橋, 1964; 橘ら, 1990; 宇井・高野, 1995; 吉田ら, 2002）。一方で、極度の遮光による施設内の光量の減少は、茎葉重（斎藤, 2015a）、花芽分化の遅延および着花数（斎藤, 2015b）、ならびに1果重、着果数および収量の低下（斎藤, 2015c）を招くとされている。これに対し、夏秋期の中玉および大玉トマト栽培において、350 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ （PPFD 1600 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）以上の強日射時の50%遮光により、茎の伸長、茎径の肥大および増収がみられた（吉田ら, 2002; 吉田・中國, 2006）との報告がある。さらに、遮光制御方法について、井手ら（2011）は、夏季の晴天日に30分間の積算日射量を0.8 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ とすることで、常時遮光と比較して収量や植物体の乾物重が増加したとしている。調光処理を行った本実験においても、生育については、2014年の‘桃太郎サニー’および2015年の両品種において、遮光区あるいは調光区の茎長および節間長が、無遮光区と比較して有意に大きく、また、2015年の‘りんか409’において、調光区および無遮光区の茎径が遮光区と比較して有意に大きかった（第1表）。さらに、収量については、2014年の両品種の総収量、ならびに両実験年および両品種の可販果収量および果実数において、調光区が無遮光区および遮光区と比較して有意に多くなった（第2表）。これらのことから、調光処理により、朝夕や曇天時の日射量を減じることなく強日射時のみ遮光し、施設内の光環境が改善されたことが、光量不足による茎葉重、着花数および収量の低下（斎藤, 2015a, b, c）、ならびに強日射による生育および収量の低下の回避に寄与したと考えられた。

トマト果実の放射状裂果は、果実肥大に伴いがくの接着基部の柔組織がコルク化、裂開し発生する（二井内, 1963）。主要因は、強日射によるコルク層の日焼け現象（鈴木, 2014; 鈴木・柳瀬, 2005）とされ、幼果期から緑熟期の積算日射量が一定値を超えると多発する（鈴木ら, 2005, 2007）。一方、同心円状裂果は、高温時の強日射により果面の肩部が老化し、その後の降雨などにより果皮が裂開し発生する（加藤, 1993）。これに対し、齋藤ら（2009）は、夏季栽培において、6万 lx（PPFD 1111 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）以上で50%遮光することで可販果収量を維持し、裂果が軽減できたとしている。本実験で2015年の‘りんか409’の裂果総収量において、調光区が対照区と比較して有意に少な

かった（第2表）ことは、調光処理により、遮光区と同等に強日射を避け、コルク層の日焼け（鈴木, 2014; 鈴木・柳瀬, 2005）や果面の老化が軽減されたためと考えられた。

以上の結果から、夏秋トマト栽培での本システムの活用において、日射センサを施設内の植物茎頂部分に設置する場合、遮光資材を開閉する日射強度の設定上限値の適正な範囲はPPFD 1200～1600 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、下限値は670 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上とする。さらに、遮光資材の開閉の繰り返しを回避するためには、上限値に遮光資材の光線透過率を乗じた値未満に下限値を設定する。また、遮光資材の開閉制御インターバルは遮光資材の開閉に必要な時間以上の範囲でできるだけ短いことが望ましい。遮光資材の遮光率については、自動制御の場合にも現地の常時遮光と同等の35%程度が適切と思われる。これらの設定範囲とした遮光制御により、夏秋トマト栽培において茎径の低下や徒長がなく、可販果収量の増加や裂果の発生軽減がみられたことから、本技術の有効性が示された。

摘 要

夏季の高温および強日射による夏秋トマト栽培における生育および収量の低下を軽減するため、日射強度に応じて遮光資材を開閉する制御が可能な自動調光システムを考案した。さらに、光合成特性を基にシステムの制御方法を決定し、生育および収量への影響を明らかにした。個葉の光合成速度や群落の光環境の測定結果から、本システムの日射センサを施設内の植物茎頂部分に設置する場合、設定上限値の適正な範囲はPPFD 1200～1600 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、下限値は670 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上とする。また、下限値は上限値に遮光資材の光線透過率を乗じた値未満とすることが望ましい。日射センサが日射強度を感知し遮光資材を開閉する制御インターバルは、PPFDに伴う光合成速度や気孔コンダクタンスの応答時間の測定結果から、遮光資材の開閉に必要な時間以上の範囲で、できるだけ短いことが望ましい。夏秋トマト栽培において、これらの制御方法に基づく遮光方法により、茎径の肥大低下や徒長がなく可販果収量の増加や裂果の発生軽減などの有効性が示された。

引用文献

- 相賀一郎. 1992. 2章—3光バイオインダストリーのための光放射源. p.96–162. 照明学会編. 光バイオインダストリー：光応用による生物反応の制御. オーム社. 東京.
- 東出忠桐. 2015. トマト＝植物としての特性. 生理, 生態的特性. p.31–38. 農文協編. トマト大事典. 農文協. 東京.
- 広島県園芸振興協会. 2017. 平成29年度野菜振興推進計画. p.12–13. 広島県.
- 広島県東部農業技術指導所. 2016. トマト養液土耕栽培施肥およびかん水管理指標. 広島県.

- 広島県野菜振興協会. 1997. トマト 広島県青果物標準出荷規格. p.8-9. 広島県.
- 井手 治・龍 勝利・國武みどり・小熊光輝・奥 幸一郎. 2011. 高温期のトマト低段密植栽培における積算日射量を指標とした遮光方法. 福岡農総試研報. 30: 30-33.
- 稲田秀俊・水野（山邊）あずさ・中原正一. 2010. トマトの葉の気孔拡散伝導度および蒸散速度に対する環境要因の影響. 茨城農総セ園研報. 17: 17-22.
- 石井雅久. 2015. (3) 冷房. p.137-148. 日本施設園芸協会編. 施設園芸・植物工場ハンドブック. 農文協. 東京.
- 岩堀修一・崎山亮三・高橋和彦. 1963. トマトの高温障害に関する研究（第1報）苗齢と障害の程度. 園学雑. 32: 197-204.
- 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.
- 景山詳弘・小西国義. 1988. 土耕との比較でみた水耕トマトの形態的・生理的特徴. 園学雑. 57: 408-417.
- 加藤 徹. 1993. トマトの生育障害. p.17-30. タキイ種苗宣伝出版部編. 症状から見た野菜の生育障害診断. タキイ種苗. 京都.
- 川口岳芳・上藤満宏. 2016. トマト栽培用自動調光制御方法およびその装置. 特許公開 2016-182074.
- 川口岳芳・上藤満宏・伊藤栄治. 2017. ハウス栽培制御装置及び方法. 特許公開 2017-184721.
- 二井内清之. 1963. トマトの裂果に関する研究. 園試研報 D. 1: 117-154.
- 岡田牧恵・房尾一宏・川口岳芳・山本真之. 2013. 夏秋トマト低段密植栽培における栽植密度, 作型, 収穫果房数および培地量が生育と収量に及ぼす影響. 広島総研農技セ研報. 89: 9-17.
- 齋藤裕史・佐藤睦人・太田弘志. 2009. 夏秋トマトの夏期遮光による裂果軽減効果. 東北農研. 62: 165-166.
- 斎藤 隆. 2015a. 生育ステージと生理, 生態. II 栄養成長の生理, 生態. p.49-72. 農文協編. トマト大事典. 農文協. 東京.
- 斎藤 隆. 2015b. 生育ステージと生理, 生態. III 花芽分化の生理, 生態. p.73-96. 農文協編. トマト大事辞典. 農文協. 東京.
- 斎藤 隆. 2015c. 生育ステージと生理, 生態. VI 果実の発育と成熟の生理, 生態. p.135-162. 農文協編. トマト大事辞典. 農文協. 東京.
- 宍戸良洋・尹 千鍾・湯橋 勤・施山紀男・今田成雄. 1991. トマトにおける葉の光合成, 転流・分配の経時的变化と果実肥大に対する葉位別寄与度. 園学雑. 59: 771-779.
- 鈴木克己. 2014. 障害と対策. 生理障害の原因と対策. p.641-657. 農文協編. トマト大事典. 農文協. 東京.
- 鈴木隆志・柳瀬関三. 2005. 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灌水および整枝の影響. 園学研. 4: 75-79.
- 鈴木隆志・柳瀬関三・塩谷哲也. 2005. 夏秋トマト栽培における放射状裂果の発生に関する研究（第4報）積算日射量がトマト放射状裂果の発生に及ぼす影響. 園学雑. 74（別2）: 156.
- 鈴木隆志・柳瀬関三・塩谷哲也・嶋津光鑑・田中逸夫. 2007. 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積算日射量の影響. 園学研. 6: 405-409.
- 橘 昌司・安川人央・惟任恵子. 1990. 養液栽培トマトの尻腐病が夏季の栽培で多発する理由に関する研究. 園学雑. 59（別2）: 364-365.
- 高山弘太郎・仁科弘重・久枝和昇・末岐 剛・原田 聡. 2010. 太陽光利用型植物工場のトマト群落における光合成機能の空間分布の解析. 植物環境工学. 22: 175-180.
- 巽 穰・堀 裕. 1969. そ菜の光合成に関する研究 -1- 光の強さとそ菜幼植物の同化特性. 園試研報 A. 8: 127-140.
- 宇井 睦・高野泰吉. 1995. 果実肥大期における温度と培養液濃度が水耕トマトの尻ぐされ発生に及ぼす影響. 生物環境調節. 33: 7-14.
- 山田 寿・板野阿貴子・天野勝司. 2004. リンゴ‘玉林’における果実の受光量と果実温度およびソルビトール, 早期みつ症状との関係. 園学研. 3: 91-95.
- 野菜・茶業試験場. 1989. 野菜の種類別, 基本作型別, 地域別作型分布とその呼称に関する調査結果の総覧. p.72-86. 改訂版全国野菜・花きの種類別作型分布の実態とその呼称（野菜編）. 農林水産省・野菜茶業試験場. 三重.
- 吉田裕一・羽場清人・村上賢治・榊田正治. 2002. 高温強日射時の遮光処理がトマト苗の乾物生産とエネルギー散逸に及ぼす影響. 園学雑. 71（別2）: 345.
- 吉田裕一・中園堯士. 2006. 自動遮光制御による強光ストレスの軽減がトマトの果実発育に及ぼす影響. 園学雑. 75（別2）: 290.