

Effect of a Simply Installed Pad and Fan Cooling System on Photosynthesis, Fruit Yield and Quality of Tomato under Salinity Stress

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2019-03-22 キーワード (Ja): キーワード (En): pad and fan cooling system, cooling of horticultural structure, tomato, salinity stress, photosynthesis, stomatal conductance, total soluble solid, blossom-end rot 作成者: 村上, 健二, 生駒, 泰基, 山崎, 敬亮, 吉田, 祐子, 長崎, 裕司, 濱本, 浩, 嶋津, 光鑑 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24514/00001827

簡易設置型パッドアンドファン冷房が塩ストレス下の トマトの光合成速度，果実収量および品質に及ぼす影響

村上健二・生駒泰基・山崎敬亮・吉田祐子・長崎裕司¹・浜本 浩²・嶋津光鑑³

Key words : パッドアンドファン，施設冷房，トマト，塩ストレス，光合成速度，気孔コンダクタンス，糖度，尻腐れ

目 次

I 緒 言	29	1 試験1：簡易PF装置による冷房処理（簡易PF冷房）が塩ストレスを与えた直後のトマトの光合成速度に及ぼす影響	34
II 材料および方法	30	2 試験2：簡易PF冷房が塩ストレスを継続的に与えたトマトの光合成速度，果実収量および品質に及ぼす影響	37
1 簡易PF装置，栽培施設，栽培方法，測定方法	30	IV 考 察	38
2 試験1：簡易PF装置による冷房処理（簡易PF冷房）が塩ストレスを与えた直後のトマトの光合成速度に及ぼす影響	33	摘 要	39
3 試験2：簡易PF冷房が塩ストレスを継続的に与えたトマトの光合成速度，果実収量および品質に及ぼす影響	33	引用文献	39
III 結 果	34	Summary	41

I 緒 言

わが国の施設園芸においては，主要な果菜類であるトマトの高糖度果実を生産する技術が開発されている^{1, 14, 16}。トマトの果実を高糖度にするためには，果実への光合成産物の転流を維持しつつ根からの水の流入が制限されるように，培養液濃度やかん水量を管理して栽培する。その栽培管理の1つである塩ストレス処理は，養液栽培においてNaClを添加して培養液の浸透ポテンシャルを低下させることにより，根の水分吸収を制限する栽培法である⁹。例えば，低段密植栽培で高糖度トマトを生産する場合，果実の生育ステージに合わせて，電気伝導度（EC）が1～2 dSm⁻¹の培養液にNaClを添加して

ECを8～25dSm⁻¹まで上昇させる¹⁴。その結果，-0.07～-0.10MPaであった培養液の水ポテンシャルは，-0.34～-1.03MPaまで低下し，果実糖度が上昇する。

一般に，塩ストレス処理によりトマトの果実糖度は上昇するが，その反面，1果重が減少することと，尻腐れ果が発生しやすくなることが問題となる¹⁰。水ストレスにより葉からの蒸散量が根からの吸水量を上回る時間が継続すると，次第に植物体内の水ポテンシャルが低下し，蒸散量を減らすため気孔開度が小さくなる。その結果，CO₂ガスの葉内への拡散が制限されて光合成速度が低下する⁷。トマト果実の尻腐れ果発生の原因は果実先端部におけるカルシウム不足であるが，トマト果実先端へのカルシウムイオンの移動は蒸散流（マスフロー）に依存する⁵。

（平成26年6月26日受付，平成28年3月15日受理）
農研機構近畿中国四国農業研究センター
環境保全型野菜研究領域

¹ 企画管理部

² 現 農研機構野菜茶業研究所

³ 岐阜大学応用生物科学部

そのため、尻腐れ果の発生を抑えるには、根の水分吸収を制限していても、気孔を閉鎖させずに蒸散を持続させる必要がある。

一方、わが国の夏季の園芸施設内における日中の気温は40℃を上回ることも多く、さらに、近年の異常気象も相まって、夏季の高温対策が必須となっている⁸⁾。35℃を超えるような園芸施設内の高温は、飽差の増大によって葉からの蒸散量を増加させる。このような高温条件下で高糖度トマトを狙って根の吸水を制限する栽培を行うと、葉の蒸散量と根の吸水量の差が拡大するために過剰な水ストレスが生じる。園芸施設内における日中の降温と加湿により飽差を低下させることができる従来型のパッドアンドファン（従来型PF）装置や細霧冷房装置などの蒸発冷房法の利用は、以上の理由から高温期の高糖度トマトの生産に有効である³⁾。しかし、既存の蒸発冷房法は中小規模の園芸施設では普及しておらず、その理由として以下の問題点が指摘されている¹²⁾。従来型PF装置については、①設置コストが細霧冷房装置より2～3倍高く³⁾、非常に高価である。②既存の園芸施設への設置が困難である。また、細霧冷房装置については、①作物を濡らさない噴霧制御が未確立である。②小規模園芸施設ではコスト高となる。

現在、中小規模の園芸施設での利用や施設内における育苗の局所冷房用に利用が期待される蒸発冷房装置として、簡易設置型パッドアンドファン（簡易PF）装置が開発されている¹²⁾。

そこで本研究では、高糖度トマトの生産を目的とした塩ストレスを付与する栽培において、高温乾燥期の過剰な水ストレスによるトマトの光合成速度および果実収量の低下を回避するために、簡易PF装置による加湿冷房がトマトの光合成速度、果実収量および品質に与える影響を調査した。

なお、本研究の一部は、農林水産省委託プロジェクト実用技術開発事業22062（既存の自然換気型温室に利用可能な簡易設置型パッドアンドファン冷房の開発）により実施した。

本研究の遂行にあたり、トマトの栽培管理および各種測定に多大な協力をいただいた農研機構近畿中国四国農業研究センター研究支援センターの岩本辰弘氏、ならびに契約職員の秋定有紀氏、また論文作成にあたり有益なコメントをいただいた萩森学博士に深く感謝いたします。

II 材料および方法

1 簡易PF装置、栽培施設、栽培方法、測定方法

1) 簡易PF装置

写真1に、本研究で使用した簡易PF装置を示した。本装置は、2010年に岐阜大学で試作された。装置は、重さ6.2kgで、発泡スチロール製（厚さ1cm）の筐体（幅99cm×奥行46cm×高さ46cm）、セルローズパッド（パッド、幅85cm×奥行15cm×高さ30cm）、送風ファン（幅30cm×高さ30cm、FY-20VF5、パナソニック株）、給水チューブで構成されている。

セルローズパッド（パッド）



給水チューブ

送風ファン

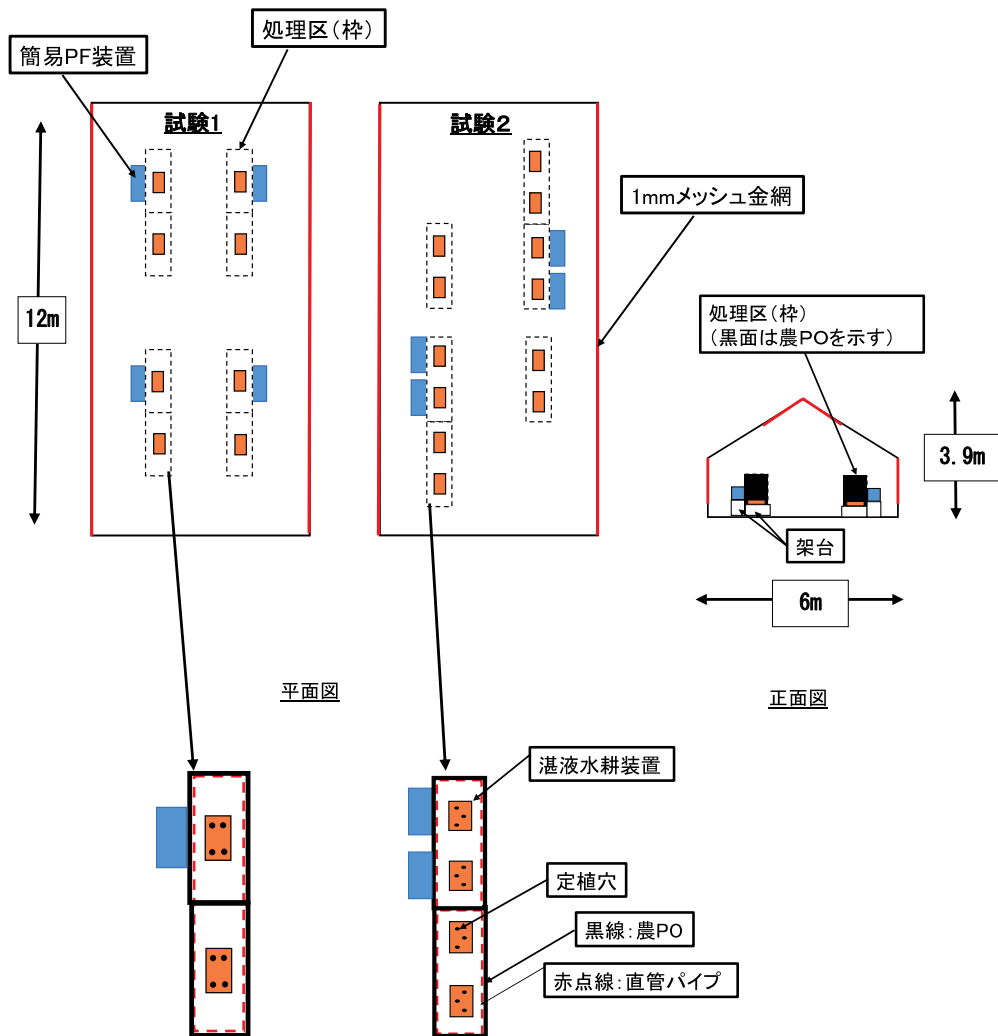
写真1 使用した簡易PF装置

パッドと送風ファンは、筐体前面と側面の片方にそれぞれ組み込まれ、パッドを湿らせるための給水チューブは、筐体内のパッド直上に設置されている。この簡易PF装置では、側面の送風ファンによって空気が筐体内に吸引され、筐体内に送り込まれた空気が前面にある湿らせたパッドを通過する際に気化冷却によって加湿冷気として本装置から放出される。送風ファン稼働時の風速および風量は、それぞれ1台あたり 0.09ms^{-1} および $83\text{m}^3\text{h}^{-1}$ であり、装置の稼働時間は、毎日8時から20時に設定した。

農研機構近畿中国四国農業研究センター綾部研究拠点（京都府綾部市）のガラス温室で行った。ガラス温室の大きさは間口 6.0m ×奥行 12.0m ×棟高 3.9m （容積 214m^3 ）で、ガラス温室には開口部の面積が 21.6m^2 の天窗（ 1mm メッシュ金網付）と 25.6m^2 の側窓（ 1mm メッシュ金網付）が設置されており、被覆部面積に対する開口部面積の割合は約38%である。本研究では、天窗と側窓を常時開放した状態でガラス温室を使用した。供試ガラス温室の屋根に遮熱剤（レディヒート、マルデングローージャパン株）を、試験1では2011年7月13日に、試験2では2012年7月15日に塗布した。第1図および写真2で示したように、ガラス温室内の架台（高さ 0.4m ）

2) 栽培施設

試験は、2011年（試験1）、2012年（試験2）に



簡易PF装置、処理区(枠)、湛液水耕装置の拡大図

第1図 ガラス温室、簡易PF装置、処理区(枠)、湛液水耕装置の配置と大きさの関係
 注) 図中のガラス温室、簡易PF装置(ガラス温室内)、処理区(枠:ガラス温室内)の大きさは、実際の大きさに比例している。



写真2 トマト栽培試験の様子

上に農業用直管パイプで枠を設けた。枠の大きさは、試験1では幅1.8m×奥行0.7m×高さ1.0m、試験2では幅2.4m×奥行0.7m×高さ1.0mとした。枠の上面は開放し、側面については四方を空気の動きを遮断するため農業用ポリオレフィンフィルムで囲ったものを無処理区とした。この側面の一方に簡易PF装置を設置したものをPF処理区とした。PF処理区あたりのPF装置の設置台数は、試験1では1台、試験2では2台とした。

上記の枠内にプラスチック製の培養液槽（特大ばんじゅうA：縦64cm×横38cm×深さ14cm、容量約33.4L、三甲株）に発泡スチロール製の定植パネル（縦72cm×横45cm×厚さ3cm）を載せた栽培ベッドと通気用の市販小型エアポンプで構成した湛液水耕装置を、試験1では枠あたり1台、試験2では2台設置した。簡易PF装置を設置する高さは、試験1では地面から0.55m、試験2では花房の高さとパッド（送風口）の中心が同じになるように地面から0.7mとした。

試験1、2とも、簡易PF装置はガラス温室に4台設置し、総風量は $332\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ である。これは、供試ガラス温室（ 214 m^3 ）の推定される換気量（換気回数 20回 h^{-1} ¹¹⁾として $4,280\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ ）に比べて十分小さいことから、簡易PF装置の加湿冷気が無処理区の気温や飽差に与える影響は無視できるものとみなした。

3) 栽培方法

供試品種は、トマト「ハウス桃太郎」（タキイ種苗株）とした。シャーレ内に敷いた湿らせた濾紙の

上で2日間 25°C の催芽処理を行い、セルトレイに播種した。本葉5枚展開時まで育苗後、湛液水耕装置に定植した。標準培養液として大塚A処方（OATアグリオ株）の2倍希釈液30Lを培養液槽に満たした。標準培養液は、水道水、大塚A処方の2倍濃度液、1N NaOHおよび5% H_2SO_4 を用いて、 $\text{EC } 1.0\sim 1.5\text{dSm}^{-1}$ 、 $\text{pH } 5.5\sim 6.5$ に調整し、3～4日ごとに半量交換した。

4) 測定方法

自作の通風乾湿球温度計で10分ごとに乾球温度（気温）と湿球温度を測定した。塩ビ製の通風筒（長さ30cm×直径4cm）の表面をアルミホイルで覆い、片側に小型ファン（風速 2.3ms^{-1} ）を取り付けて反対側から吸気した。通風筒の中央下部には湿球給水用のタンクを装着した。乾球温度測定用として通風筒内の吸気側とタンクの間、湿球温度測定用として通風筒内のタンク直上に、それぞれ温度センサーを設置して、温度測定用データロガー（おんどとりTR-71Ui, 株ティアンドデイ、温度センサーは標準センサー使用）で温度データを記録した。湿球温度測定用のセンサーでは、感知部を包んだガーゼをタンクへ垂らして感知部へ給水した。以下の式を用いて、測定した乾球温度と式（1）から乾球温度の空気の飽和水蒸気圧を、乾球温度と湿球温度から水蒸気圧（式（2））を計算し、その差である飽差（VPD：vapor pressure deficit）を算出した（式（3））²⁾。

$$e_s(T) = 6.1078 \cdot \exp\left(\frac{17.269 \cdot T}{T + 237.3}\right) \quad (1)$$

$$e(T_d) = e_s(T_w) - 0.000662 \cdot P \cdot (T_d - T_w) \quad (2)$$

$$\text{VPD} = e_s(T_d) - e(T_d) \quad (3)$$

$e_s(T)$ は温度 T ($^\circ\text{C}$) の空気の飽和水蒸気圧 (hPa)、 $e(T_d)$ は乾球温度 T_d ($^\circ\text{C}$)、湿球温度 T_w ($^\circ\text{C}$) である空気の水蒸気圧、 P は大気圧 ($\approx 1,013\text{hPa}$)、 $e_s(T_d)$ は乾球温度 T_d ($^\circ\text{C}$) の空気の飽和水蒸気圧である。

試験1、2とも通風乾湿球温度計を簡易PF装置のパッドから0.35m離れた枠内中央で植物体に接触しないように設置した。通風乾湿球温度計を設置し

た定植パネルからの高さは、試験1では0.15 m、試験2では0.3 mとした。

光合成速度と気孔コンダクタンスは、光合成蒸散測定装置 (LI-6400, LI-COR, Inc.) を用い、晴天日の10時から14時までの間に測定した。測定開始時 (10時) に、光合成蒸散測定装置の測定チャンバー (長辺 3 cm × 短辺 2 cm : 測定面積 6 cm²) 内の光合成有効光量子束 (PPF) を光合成蒸散測定装置付属の光量子センサー (LI-190S, LI-COR, Inc.) で測定したガラス温室のPPFに、気温を枠内の気温に制御し、下位葉から8~14葉の小葉を測定チャンバーで挟んで測定を行った。測定中、光合成蒸散測定装置の吸気孔から枠内の空気を吸入した。1葉あたりの測定時間は、5分から10分であった。

試験2では、トマトの完熟果を収穫し、果重、1株あたりの収量、果実の乾物率、糖度、酸度、尻腐れ果発生率を調査した。糖度および酸度として、デジタル糖度・酸度計 (フルーツテスターFT-1, 東京硝子機械株) を用いてそれぞれ可溶性固形分、クエン酸換算値を測定した。本研究では、果重と1株あたりの収量は正常果だけでなく空洞果、窓あき果、尻腐れ果も含めた全収穫果で比較した。糖度、乾物率、酸度は正常果のみで比較した。全収穫果数に対する尻腐れ果発生数の割合から尻腐れ果発生率を算出した。

2 試験1：簡易PF装置による冷房処理 (簡易PF冷房) が塩ストレスを与えた直後のトマトの光合成速度に及ぼす影響

処理区 (枠) として、標準培養液を用い、簡易PF冷房を行わない①標準培養液-無処理区 (対照区)、標準培養液を用い、簡易PF冷房を行う②標準培養液-PF区 (PF区)、塩ストレスを与えて、簡易PF冷房を行わない③塩ストレス-無処理区 (塩ストレス区)、ならびに塩ストレスを与えて、簡易PF冷房を行う④塩ストレス-PF区を設けた。1処理2反復とした。

2011年7月5日から催芽処理を行い、7月7日に200穴セルトレイに播種した。子葉が展開した幼苗を7月15日に72穴セルトレイに移植し、苗を7月29日に湛液水耕装置に定植した。定植株数は、湛液水耕装置1台あたり4株 (株間44 cm, 条間28 cmの

2条植え) とした。簡易PF装置による冷房処理 (簡易PF冷房) を8月14日に開始した。

簡易PF冷房開始後の栽培管理は、渡辺¹⁴⁾の提唱した低段密植による高糖度トマト栽培法に従った。8月27日の21時に、標準培養液30 Lに350 gのNaClを添加し、塩ストレス処理の最終段階に相当する25dSm⁻¹ (培養液の水ポテンシャル: -1.03MPa) までECを上昇させた。翌8月28日の10時に光合成蒸散測定装置の測定チャンバー内のPPFを740 μmol m⁻² s⁻¹に、気温を対照区および塩ストレス区では32.0℃に、PF区および塩ストレス-PF区では27.3℃にそれぞれ設定し、光合成速度と気孔コンダクタンスを測定した。測定は、1処理2反復8株のうち、7株の葉 (葉長36~41 cm) の小葉 (1株あたり1枚) について行った。

3 試験2：簡易PF冷房が塩ストレスを継続的に与えたトマトの光合成速度、果実収量および品質に及ぼす影響

処理区として、①標準培養液-無処理区 (対照区)、②塩ストレス-無処理区 (塩ストレス区) および③塩ストレス-PF区を設けた。1処理2反復とした。

2012年4月3日から催芽処理したトマト種子を、4月5日に128穴セルトレイへ一穴おきに播種した。発芽し成長した苗を5月14日に湛液水耕装置へ定植した。定植株数は、湛液水耕装置1台あたり3株 (株間38 cm, 条間10 cmの千鳥植え) とした。6月7日から、トマトトーン (日産化学工業株) 15ppmを第3花開花時の第1花房に散布した。果実の肥大を確認した後に花房あたり3~4果に摘果した。株は主枝1本仕立てとし、第1花房から2節上位で摘心した。簡易PF冷房は6月18日に開始した。

試験2では、一定の収穫量と果実糖度が確保できるように持続的に塩ストレスを付与した。すなわち、果実の直径が平均約1.5 cmになった6月21日に、30 Lの標準培養液に160 gのNaClを添加した。その後、水道水、大塚A処方²⁾の2倍濃度液、1 N NaOHおよび5% H₂SO₄を用いて、培養液のECを10~12dSm⁻¹ (培養液の水ポテンシャル: -0.45~-0.51MPa)、pHを5.5~6.5に調整した。さらに、3~4日ごとにECが10dSm⁻¹の新鮮な培養液を用いて半量交換した。6月29日 (塩ストレス処理開始8日後) の10

時に光合成蒸散測定装置のチャンバー内のPPFを $1,400\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に、気温を対照区および塩ストレス区では 30.2°C に、塩ストレス-PF区では 25.7°C にそれぞれ設定し、光合成速度と気孔コンダクタンスを測定した。測定は、1処理2反復12株のうち、8株の小葉（1株あたり1枚）について行った。

7月17日から7月29日に果実の収穫調査を行った。尻腐れ果発生率以外のデータについては、湛液水耕装置1台3株の平均を1反復として処理区あたり4反復とした。ただし、果重、乾物率、糖度、酸度では、1株ごと（3～4果）の平均値を算出し、その3株の平均を1反復とした。尻腐れ果発生率は無反復とした。

Ⅲ 結 果

1 試験1：簡易PF装置による冷房処理（簡易PF冷房）が塩ストレスを与えた直後のトマトの光合成速度に及ぼす影響

第1表にトマトの光合成速度および気孔コンダクタンスを測定した時の気温と飽差を示した。対照区および塩ストレス区の平均気温は 30.7°C 、PF区および塩ストレス-PF区の平均気温は 27.0°C であっ

た。一方、飽差については、PF区および塩ストレス-PF区の平均値は 2.7hPa であり、対照区および塩ストレス区の平均値、 10.0hPa より 7.3hPa 小さかった。

第2図に光合成速度に及ぼす培養液および簡易PF冷房の影響を示した。光合成速度は、PF区>対照区>塩ストレス-PF区>塩ストレス区の順に高くなる傾向を示した。さらに、培養液および簡易

第1表 光合成速度、気孔コンダクタンス測定時における気温と飽差（試験1，2011年8月28日）

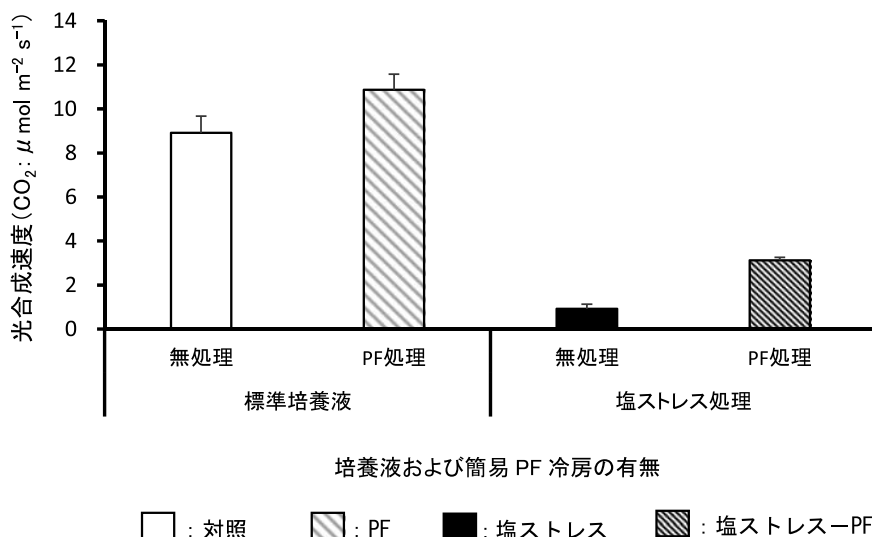
処理区	気温($^\circ\text{C}$)	飽差(hPa)
対照および塩ストレス	30.7 ± 0.3	10.0 ± 0.6
PFおよび塩ストレス-PF	27.0 ± 0.0	2.7 ± 0.3
有意性	**	**

注1) 簡易PF冷房による気温と飽差への影響は、無処理（対照区、塩ストレス区）の平均と、PF処理（PF区、塩ストレス-PF区）の平均を比較した。

2) 対照区および塩ストレス区、PF区および塩ストレス-PF区ともに、2処理区4反復の平均である。

3) 数値は10時から14時までの10分ごとの平均値 \pm 標準誤差（ $n=25$ ）を示す。

4) 対応のある10分ごとのデータに対するt検定により、**は1%水準で有意差あり。

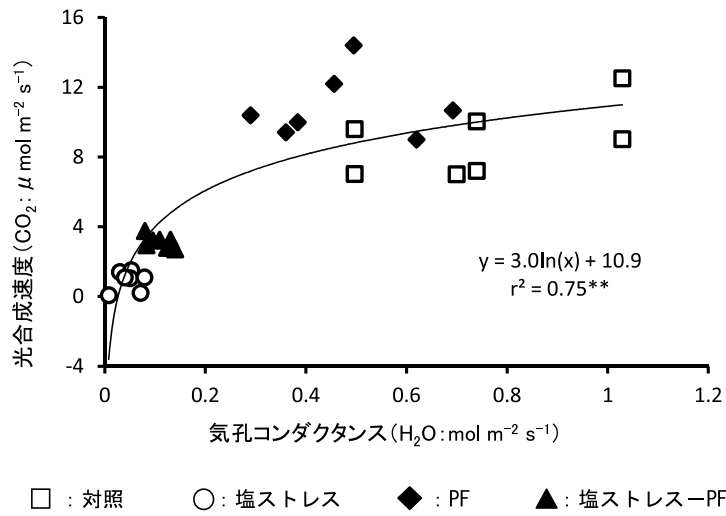


第2図 光合成速度に及ぼす培養液および簡易PF冷房の影響（試験1，2011年8月28日）

注1) 培養液は、標準培養液（対照区、PF区）と塩ストレス処理（塩ストレス区、塩ストレス-PF区）の2種類を示す。

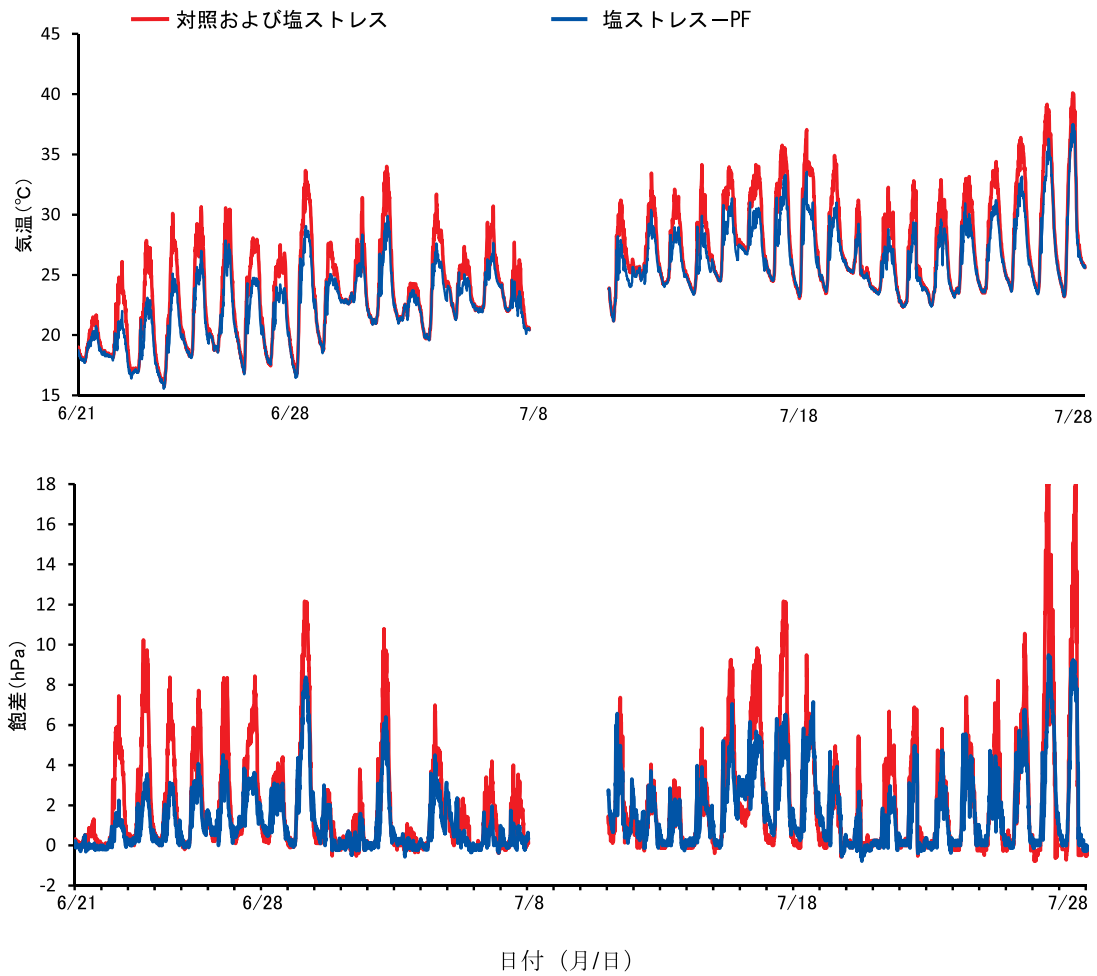
2) 簡易PF冷房の有無は、無処理（対照区、塩ストレス区）とPF処理（PF区、塩ストレス-PF区）を示す。

3) 垂線は標準誤差（ $n=7$ ）を示す。



第3図 塩ストレスを与えた直後のトマトの光合成速度と気孔コンダクタンスの関係（試験1，2011年8月28日）

注1) r^2 は寄与率を，**は1%水準で有意であることを示す。

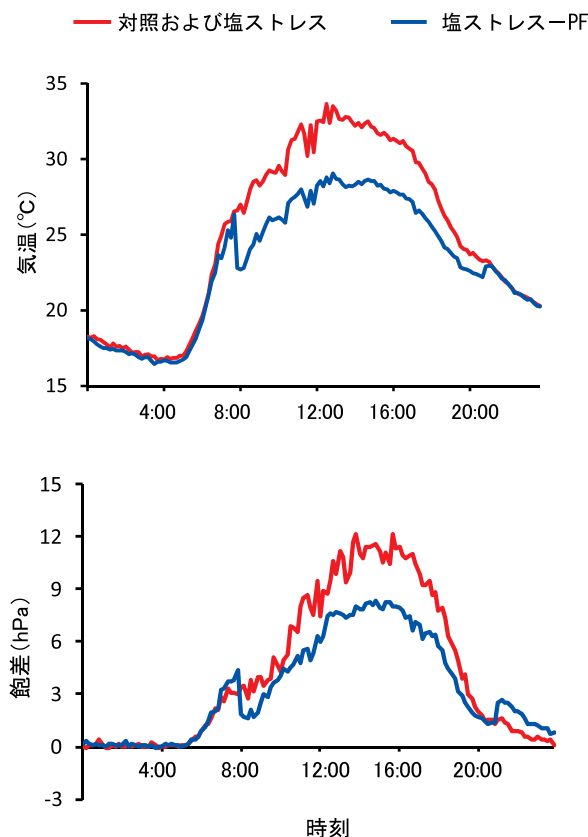


第4図 塩ストレス処理期間における気温と飽差の推移（試験2，2012年）

注1) 7月8日から7月11日までは，データが欠測している。

PF冷房の有無を主効果とする2元配置分散分析を行った。その結果、培養液および簡易PF冷房の有無によって、光合成速度に1%水準の有意差が認められた。しかし、交互作用では有意差が認められなかった。これらの結果から光合成速度は簡易PF冷房によって上昇し、塩ストレスによって低下することが明らかになった。

光合成速度と気孔コンダクタンスの関係を第3図に示した。光合成速度 (y) と気孔コンダクタンス (x) の間には、 $y = 3.01x + 10.9$ の関係が認められた。気孔コンダクタンスは、塩ストレス処理によって低下し、それに伴い光合成速度も低下した。気孔コンダクタンスが0からおよそ $0.2 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の範囲では、気孔コンダクタンスの変化によって光合成速度が大きく変動したが、 $0.2 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上では光合成速度の変動は小さかった。また、標準培養液では、簡易PF冷房によって気孔コンダクタンスがやや低下する傾向を示したが、逆に塩ストレス条件下では、簡易PF冷房によって気孔コンダクタンスおよび光合成速度が上昇する傾向を示した。

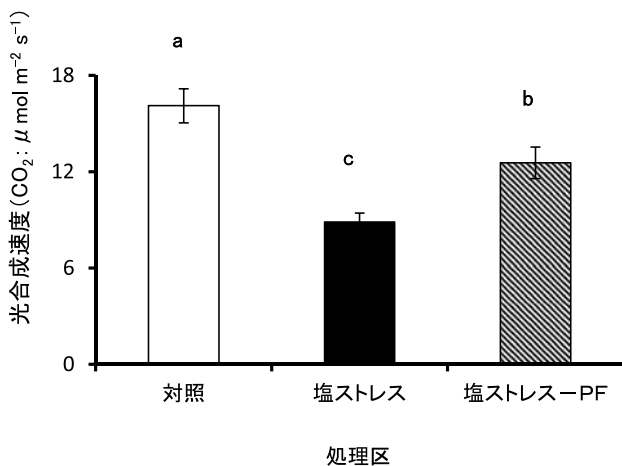


第5図 塩ストレス処理期間における気温と飽差の日変化 (試験2, 2012年6月29日)

第2表 簡易PF装置稼働時 (2012年6月18日~7月28日 (最終収穫日前日)), ならびに光合成速度と気孔コンダクタンス測定時 (2012年6月29日) における気温と飽差 (試験2)

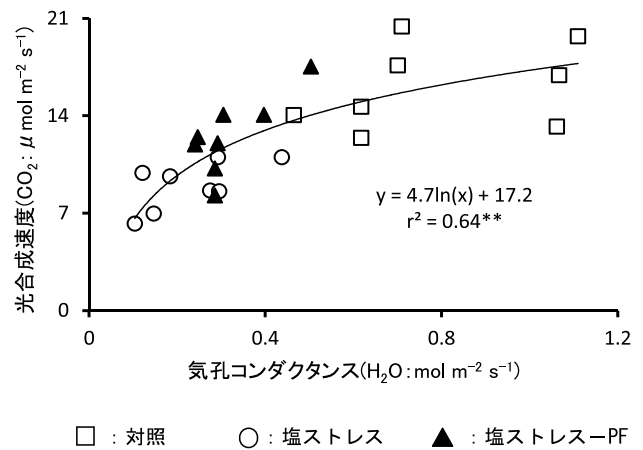
処理区	簡易PF装置稼働時		光合成速度, 気孔コンダクタンス測定時	
	気温 (°C)	飽差 (hPa)	気温 (°C)	飽差 (hPa)
対照および塩ストレス	27.4±0.0	3.9±0.0	31.0±0.0	8.0±1.7
塩ストレス-PF	25.2±0.0	2.1±0.0	27.0±1.0	3.0±1.0
有意性	**	**	**	**

注1) 簡易PF冷房による気温と飽差への影響は、無処理 (対照区, 塩ストレス区) の平均と、PF処理した塩ストレス-PF区の平均を比較した。
 2) 対照区および塩ストレス区は、2処理4反復の平均である。
 3) 塩ストレス-PF区は、1処理2反復の平均である。
 4) 光合成速度, 気孔コンダクタンス測定時における気温と飽差は、10時から14時における10分ごとの平均である。
 5) 簡易PF装置稼働時の気温および飽差は、8時から20時における10分ごとの平均である。ただし、7月8日から7月11日までのデータは欠測のため含んでいない。
 6) 数値は平均値±標準誤差を示す。
 7) 対応のある10分ごとのデータに対するt-検定により、**は1%水準で有意差あり。



第6図 簡易PF冷房が塩ストレスを継続的に与えたトマトの光合成速度に及ぼす影響（試験2，2012年6月29日）

注1) 異なるアルファベット間にはTukeyの検定により5%水準で有意差あり。
2) 垂線は標準誤差 (n = 8) を示す。



第7図 塩ストレスを継続的に与えたトマトの光合成速度と気孔コンダクタンスの関係（試験2，2012年6月29日）

注1) r²は寄与率を，**は1%水準で有意であることを示す。

第3表 簡易PF冷房が塩ストレスを継続的に与えたトマトの果実収量，品質に及ぼす影響（試験2，収穫期間2012年7月17日～7月29日）

処理区	果重(g)	収量(g/株)	乾物率(%)	糖度(%)	酸度(%)	尻腐れ果(%)
対照	233±11.4 a	799±71 a	5.50±0.20 c	7.01±0.03 c	0.84±0.04 b	0
塩ストレス	177± 3.2 b	625±30 b	7.24±0.11 b	8.70±0.08 b	1.09±0.04 a	11.6
塩ストレス-PF	156± 7.0 b	613±34 b	7.70±0.09 a	9.17±0.08 a	1.06±0.06 a	0

注1) 果重，収量は，正常果だけでなく空洞果，窓あき果，尻腐れ果も含めた全収穫果から算出した。
2) 数値は平均値±標準誤差 (n = 4) を示す。
3) 同列内の異なるアルファベット間にはTukeyの検定により5%水準で有意差あり。
4) 乾物率，糖度，酸度は，正常果のみを測定した。
5) 尻腐れ果発生率の調査果数は，対照区36果，塩ストレス区43果（尻腐れ果5），塩ストレス-PF区46果である。

2 試験2：簡易PF冷房が塩ストレスを継続的に与えたトマトの光合成速度，果実収量および品質に及ぼす影響

塩ストレス処理期間における気温と飽差の推移を第4図に示した。日中の気温および飽差とも，塩ストレス-PF区の値は，塩ストレス処理期間を通じて，対照区および塩ストレス区の値より低く推移する傾向を示した。第5図に一例として6月29日における気温と飽差の日変化を示した。簡易PF装置が停止している時間帯では塩ストレス-PF区と対照区，ならびに塩ストレス区の気温および飽差の差はほとんど認められなかったが，簡易PF装置が稼働している8時から20時では，正午頃を中心にその差が大きくなった。

簡易PF装置稼働時，ならびに光合成速度と気孔コンダクタンス測定時における気温と飽差を第2表に示した。簡易PF装置稼働時の平均気温は，塩ストレス-PF区では対照区および塩ストレス区より2.2℃低かった。飽差については，塩ストレス-PF区の平均値は対照区および塩ストレス区の平均値より1.8hPa小さかった。

光合成速度と気孔コンダクタンスの測定時の平均気温は，塩ストレス-PF区では対照区および塩ストレス区より4.0℃低かった。飽差については，塩ストレス-PF区の平均値は対照区および塩ストレス区の平均値より5.0hPa小さかった。

第6図に各処理区のトマトの光合成速度を示した。光合成速度は，対照区で最も高く，塩ストレス

区で低かった。塩ストレス-PF区は、対照区よりも低かったが、塩ストレス区より有意に高かった。この時の光合成速度と気孔コンダクタンスの関係を第7図に示した。光合成速度 (y) と気孔コンダクタンス (x) の間には、 $y = 4.71n(x) + 17.2$ の関係が認められた。塩ストレス処理により気孔コンダクタンスは低下し、それにともない光合成速度も低下した。塩ストレス処理による気孔コンダクタンスおよび光合成速度の低下は、簡易PF冷房を行うことで緩和された。

第3表に各処理区のトマトの果実収量、品質を示した。果重および1株あたりの収量は、対照区が最も高く、塩ストレス-PF区と塩ストレス区の間では有意差が認められなかった。乾物率と糖度は、塩ストレス-PF区>塩ストレス区>対照区の順に高かった。酸度は、対照区が最も低く、塩ストレス区と塩ストレス-PF区では有意差が認められなかった。また、尻腐れ果は塩ストレス区で約12%発生したが、対照区と塩ストレス-PF区では尻腐れ果の発生が認められなかった。

IV 考 察

塩ストレス処理により培地の水ポテンシャルを低下させ、トマトの根からの吸水を制限すると、一時的に吸水に対して蒸散が過剰となり、植物体内の水ポテンシャルの低下により気孔が閉鎖する。そのため、気孔コンダクタンスが低下し¹⁵⁾、CO₂ガスの葉内拡散が制限される。その結果、光合成速度が低下し、最終的に収量が減少する⁷⁾。したがって、吸水に対して蒸散が一時的に過剰となるのを抑制し、気孔開度を維持することで、光合成速度および収量の低下が緩和されることが考えられる。

試験1、2では、標準培養液および塩ストレス条件下において、簡易PF冷房により気温および飽差が低下し(第1表、第2表、第4図、第5図)、トマトの光合成速度は上昇した(第2図、第3図、第6図、第7図)。簡易PF冷房による気温と飽差の低下が光合成を促進するメカニズムとして以下のことが考えられる。①気温が低下すると、高温による光合成代謝系の活性の低下が抑制される。②葉周囲の気温および飽差が低下すると、吸水と蒸散が均衡す

ることで、孔辺細胞の膨圧が維持されるため、気孔コンダクタンスが一定以上に保たれ、CO₂ガスの葉内拡散が制限されない。

試験1の標準培養液の処理区では、簡易PF冷房により光合成速度は上昇したが、気孔コンダクタンスはやや低下する傾向にあった(第3図)。気孔コンダクタンスは葉の蒸散速度から算出され、簡易PF冷房により光合成速度は上昇したことから、この気孔コンダクタンスの低下は、気孔開度が小さくなったためではなく、蒸散量が低下したことによるものと考えられる。したがって、試験1の標準培養液で簡易PF冷房を行った場合に光合成が促進されたのは、①のメカニズムによると推察される。

野並⁶⁾は、植物の代謝生理と水ポテンシャルの一般的な関係から、おおよそ-0.3~-1.3MPaの水ポテンシャルで気孔開度が小さくなるとしている。試験1および2での塩ストレスを与えた培養液の水ポテンシャルは、それぞれ-1.03MPa (25dSm⁻¹) および-0.45~-0.51MPa (10~12dSm⁻¹) であったことから、両試験ともに塩ストレスにより気孔開度は小さくなったと考えられる。本研究では、試験1、2とも、塩ストレス条件下における気孔コンダクタンスおよび光合成速度は、簡易PF冷房により上昇した(第2図、第3図、第6図、第7図)。これは、②のメカニズムによると推察される。また、標準培養液に比較して、塩ストレス条件下での光合成速度は、簡易PF冷房により大きく上昇した。このことから、簡易PF冷房による光合成促進効果は、標準培養液より、気孔開度が小さくなる塩ストレス条件下で大きいと考えられた。さらに、試験2での塩ストレス処理期間中の日中の気温および飽差は簡易PF冷房により低下し(第2表、第4図、第5図)、光合成の低下を緩和する効果は塩ストレス処理期間を通じて持続したものと推察される。

試験2では、トマトの果重、ならびに1株あたりの収量は、標準培養液の対照区より塩ストレス区で低かった(第3表)。これは、塩ストレスにより根からの吸水量が減少し、果実への水分流入が制限されることにより、果実の肥大が抑制された結果であると考えられる。一方、塩ストレス区の乾物率、果実糖度および酸度は、対照区より高く、果実への水分流入が減少したことにより可溶性固形物の濃度が

上昇したと考えられる。塩ストレス条件下で簡易PF冷房を行うと、果重および1株あたり収量、ならびに果実酸度への影響は認められなかったものの、乾物率および糖度はさらに上昇した。これは、塩ストレスによる光合成の低下が簡易PF冷房によって緩和された結果、果実への可溶性固形物の転流が増加したことによると考えられる。

一方、試験2の塩ストレス区では尻腐れ果が発生したのに対して、塩ストレス-PF区では尻腐れ果の発生は認められなかった。トマト果実の尻腐れ果は、蒸散流による果実へのカルシウムイオンの流入が制限されることにより発生する⁵⁾。試験2での塩ストレス条件下の気孔コンダクタンスは簡易PF冷房により上昇し、蒸散流が維持されたことから、尻腐れ果の発生が抑制されたと考えられる。また、トマト果実の尻腐れ果の発生は、果実に風速 1.0ms^{-1} で送風することにより抑制されると報告されている⁵⁾。本研究での簡易PF装置からの風速は 0.09ms^{-1} であり、尻腐れ果発生に及ぼす風速の影響については、さらなる検討が必要である。

本研究の結果から、夏季の高温期に塩ストレスを与えて高糖度トマトを生産する場合、簡易PF冷房を行うことで、気温および飽差が低下することにより光合成が促進され、糖度が上昇すること、ならびに尻腐れ果の発生が抑制されることが明らかになった。

本研究で使用した簡易PF装置は試作品であるが、長崎ら⁴⁾は、市販の簡易PF装置をトマトの土耕栽培に用いる場合、施設床面積 20m^2 あたりに1台必要であるとした。一方、本研究の塩ストレス条件下では、簡易PF冷房による増収効果は明らかではなかったが、渡邊ら¹³⁾は、夏季のトマトの土耕栽培で簡易PF冷房により着果率が向上し、1果重が大きくなることで、増収すると報告している。また、同氏らは、簡易PF装置の導入コストは約20万円/aであり、1棟が 300m^2 程度の中小規模の園芸施設では細霧冷房装置より安価であると試算した。今後、本研究での知見に加え、このような簡易PF装置の実際的な使用法についての検討や経営試算を行うことで、夏季の高温期での中小規模の園芸施設におけるトマト栽培において簡易PF装置の利用が進むものと期待される。

摘 要

本研究では、塩ストレスを与えたトマトの光合成速度、果実収量および品質に及ぼす簡易設置型パッドアンドファン（簡易PF）装置による冷房の影響について検討した。試験は、高温条件下でNaClを添加した培養液を用いて2回行った。培養液の電気伝導度（EC）は、1回目の試験では 25dSm^{-1} 、2回目では 10dSm^{-1} とした。塩ストレス処理によって気孔コンダクタンスおよび光合成速度が低下したが、簡易PF冷房により株周囲の気温、飽差は低下し、気孔コンダクタンスおよび光合成速度の低下が緩和された。果重、1株あたりの収量および果実酸度については簡易PF冷房の有無による差異は認められなかったが、果実糖度および乾物率は簡易PF冷房により上昇した。また、塩ストレス条件下での尻腐れ果の発生率は約12%に達したのに対して、簡易PF冷房を行うとその発生は認められなかった。簡易PF装置からの加湿冷気は、塩ストレスによる気孔の閉鎖を抑制することにより、光合成速度の低下を緩和した。その結果として、果実糖度および乾物率が上昇したと考えられる。さらに、気孔の閉鎖が抑制されたことで、葉の蒸散流が維持され、果実先端部へのカルシウムイオンの流入が低下しなかったため、尻腐れ果の発生が抑制されたと考えられる。

引用文献

- 1) 阿部晴夫・飯塚 浩・茂木正道 1994. 簡易な根域水分制御システムの開発. 群馬農研D. 8: 11-26.
- 2) 林真紀夫 1988. 湿度諸量の求め方. 久保祐雄・岡田益巳編, 農業気象の測器と測定法. 農業技術協会, 東京. 68-72.
- 3) —— 2006. 細霧冷房およびパッド&ファンによる夏季高温期の降温技術. 施設と園芸. 133: 10-16.
- 4) 長崎裕司・村上健二・嶋津光鑑・坂井田洋司 2013. 簡易設置型パッドアンドファンによるハウス内暑熱環境改善. 2013年度(平成25年度)近畿中国四国農業研究成果情報: <http://www.>

- naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/warc/2013/warc13_s11.html?utm_source=results&utm_medium=rss.
- 5) 仁科弘重・趙 日煥・田中基司・橋本 康 1993. 果実送風によるトマト尻腐れ発生防止とそのメカニズムの解明. 植物工場学会誌. 5 (1): 26 - 38.
 - 6) 野並 浩 2001 a. 植物水分生理. 養賢堂, 東京. 6 - 7.
 - 7) ——— 2001 b. 植物水分生理. 養賢堂, 東京. 202 - 225.
 - 8) 農林水産省 2011. 平成22年度 高温適応技術レポート: http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/pdf/h22_tekiou_gijyutu_report.pdf.
 - 9) Sakamoto, Y., S. Watanabe, T. Nakashima and K. Okano 1999. Effects of salinity at two ripening stages on the fruit quality of single-truss tomato grown in hydroponics. *J. Hort. Sci. Biotech.* 74 (6): 690 - 693.
 - 10) Saito, T., N. Fukuda and S. Nishimura 2006. Effects of salinity treatment duration and planting density on size and sugar content of hydroponically grown tomato fruits. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 75 (5): 392 - 398.
 - 11) 佐瀬勘紀 2003. 温室の形態と換気率の関係. (社) 日本施設園芸協会編, 五訂 施設園芸ハンドブック. 園芸情報センター, 東京. 186 - 187.
 - 12) 嶋津光鑑 2013. 既存の自然換気型温室に利用可能な簡易設置型パッドアンドファン冷房の開発. 農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業 (新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業) 研究紹介2013: http://www.s.affrc.go.jp/docs/research_fund/seika/pdf/p039_2013-22062.pdf.
 - 13) 渡邊圭太・中西幸太郎・光川嘉則・櫻井基生・嶋津光鑑・長崎裕司・村上健二・浜本 浩・森川信也・坂井田洋司 2013. 簡易設置型パッドアンドファン装置を利用した夏季施設トマトの加湿冷却技術. 2013年度 (平成25年度) 近畿中国四国農業研究成果情報: http://www.naro.affrc.go.jp/org/warc/research_results/h25/pdf/07_yasai/49-0702.pdf.
 - 14) 渡辺慎一 2006. 低段密植栽培による新たなトマト生産. 野菜茶研集報. 3: 91 - 98.
 - 15) 矢吹萬寿 1981. 拡散抵抗. 宮地重遠編, 植物生理学2 光合成Ⅱ. 朝倉書店, 東京. 31.
 - 16) 吉田吉明 2015. ドレインベッドによる高糖度トマト栽培. 農文協編, トマト大事典. 農文協, 東京. 851 - 856.

Effect of a Simply Installed Pad and Fan Cooling System on Photosynthesis, Fruit Yield and Quality of Tomato under Salinity Stress

Kenji MURAKAMI, Hiroki IKOMA, Keisuke YAMAZAKI, Yuko YOSHIDA, Yuji NAGASAKI¹,
Hiroshi HAMAMOTO² and Teruaki SHIMAZU³

Key words : pad and fan cooling system, cooling of horticultural structure, tomato, salinity stress, photosynthesis, stomatal conductance, total soluble solid, blossom-end rot

Summary

The effects of a simply installed pad and fan (PF) cooling system on photosynthesis, fruit yield, and tomato quality under salinity stress at a high temperature were investigated. Tomatoes in the PF system were cultivated in a nutrient solution in which the electrical conductivity was set at 10 dSm⁻¹ or 25 dSm⁻¹ NaCl. Air temperature and vapor pressure deficits in the PF system were lower than those in the control (without PF). The photosynthetic rate and stomatal conductance of the tomato leaves cultivated in the PF system were higher than those of tomato leaves cultivated in the control. Fruit weight, total fruit weight per plant, and fruit acidity were not significantly different between the control and PF system under salinity stress. Total soluble solids and dry matter percentage of tomatoes cultivated in the PF system were higher than those of tomatoes cultivated in the control. The percentage of the occurrence of blossom-end rot of tomatoes was 12% in the control and 0% in the PF system.

We concluded that cooled, humidified air from the PF system, which restrained stomatal closure under salinity stress, alleviated the reduction of photosynthesis caused by that stress. We inferred that saccharide synthesis by photosynthesis was maintained under cooled, humidified air from the PF system, leading to increased total soluble solids in tomatoes cultivated under salinity stress.

Furthermore, we inferred that the retention of transpiration stream caused by stomatal closure inhibition under the PF system facilitated the persistent movement of calcium ions to the tip of tomatoes. Therefore, we concluded that the PF system prevents the occurrence of blossom-end rot of tomatoes under salinity stress.

Sustainable Vegetable Production Research Division, NARO Western Region Agricultural Research Center

¹ Department of Planning and General Administration, NARO Western Region Agricultural Research Center

² NARO Institute of Vegetable and Tea Science

³ Faculty of Applied Biological Sciences, Gifu University