

自然換気下のトマト施設栽培において昇温抑制に及ぼす 超微粒ミスト噴霧及び遮光の併用効果

樋江井清隆¹⁾・伊藤 緑¹⁾・番 喜宏¹⁾・大藪哲也¹⁾

摘要：愛知県内のトマト産地にみられる高軒高施設の多くは、開口部に0.4 mm目合の防虫網を設置して自然換気に依存しており、夏期に高温となりやすい。本研究では、こうした施設において超微粒ミストの間欠噴霧（11 mL・m⁻²・min⁻¹、60秒噴霧/30秒休止）に施設内の遮光カーテン被覆（遮光率50%、晴天日の9～15時）を組み合わせて試験した。その結果、0.1 m・s⁻¹程度の微弱な風速下でも、7月下旬～8月上旬の施設内気温を1.3～2.6℃低下させ、外気と同程度の施設内気温を安定して確保できた。この手法を8月8日に定植されたトマト抑制栽培に適用し、9月30日まで処理した結果、初期生育が促進され、年内の収量が遮光のみに比べて約14%増加した。

キーワード：自然換気、トマト、超微粒ミスト、遮光、高軒高施設

Effects of Super-Micro-Fog Spraying Combined with Shading on Suppressing Atmospheric Temperature Increase in Greenhouse Tomato Cultivation under Natural Ventilation

HIEI Kiyotaka, ITO Midori, BAN Yoshihiro and OYABU Tetsuya

Abstract: Most high-eaved greenhouses are equipped with apertures covered by 0.4-mm-mesh-size insect-proof nets and depend on natural ventilation in tomato-growing districts of Aichi Prefecture. Accordingly, the inside temperature is apt to be high in summer. This study examined a cooling method which combined Super-micro-fog spraying periodically (11 mL m⁻² min⁻¹, 60 -seconds on / 30 -seconds off) with shading inside (50% shading rate, 9:00 to 15:00 under fine weather) in such a greenhouse. As a result, the inside temperature decreased by 1.3–2.6°C even under weak wind velocity ca. 0.1 m s⁻¹ from late July to early August, and the inside could be stably maintained approximately equal to the outside. Then the method was applied to tomato retarding culture, which was planted on August 8, and was treated until September 30. Consequently, early growth was promoted, and yield within the year increased by approximately 14% compared to shading alone.

Key Words: Natural Ventilation, Tomato, Super Micro Fog, Shading, High-Eaved Greenhouse

本研究の一部は東海地域農業関係試験研究機関連携シンポジウム（2014年11月）においてポスター発表した。

本研究は「農林水産省の温暖化対策貢献技術支援事業」により実施した。

¹⁾ 園芸研究部

(2015.9.8 受理)

緒言

愛知県内のトマト産地にみられる高軒高施設の多くは、コナジラミ類の施設侵入を防止するため、施設開口部に0.4 mm目合の防虫網を展張し、かつ換気扇を設置していない。このことから、十分な換気条件を確保しにくい状況にある。こうした自然換気下では、高温対策用に従来の細霧冷房を多用すると、室内の高湿度化や植物体に過度の濡れが生じやすい¹⁾。そのため、運用場面では、噴霧時間を1分前後、休止時間を気象条件により4～30分程度と、長い休止時間が設定される。一方、都市部のヒートアイランド対策用に開発された「超微粒ミスト(商標:ドライミスト)」は、噴射される水の粒径が14～16 μmと小さく均一に揃うため、著しく気化しやすい特性を有する²⁾。これまで、十分な換気条件が得られるトマト及びバラ栽培施設においては、超微粒ミスト噴霧により施設内気温の上昇を抑制するとともに、植物体を濡らさずに品質を向上させられることが報告されている³⁻⁶⁾。ここで二村ら⁵⁾は、超微粒ミスト噴霧による気化熱量の多くが施設内に入射した日射量による気温上昇を打ち消すために消費されるという熱収支結果をもとに、降温効果を高めるには遮光との組み合わせが効果的であると指摘している。トマト栽培用の高軒高施設内には、遮光カーテンを装備しているものの、ミスト噴霧と組み合わせた利用事例は少ない。施設内部に施す遮光は施設内の通気性を低下させることも懸念されたが、高い蒸発特性を有する超微粒ミストとの組み合わせであれば、昇温抑制効果を発揮し得るものと予想される。そこで本研究は、生産現場に即した自然換気の高軒高施設を対象とし、超微粒ミスト噴霧に遮光を併用する手法の有効性について検証し、昇温抑制効果を一層高めた高温対策技術の確立を目的とする。本稿では、超微粒ミスト及び遮光による昇

温抑制効果、これに伴うトマト増収効果について知見を得たので報告する。

材料及び方法

試験1 遮光カーテンの被覆程度が換気条件、ミスト噴霧下の温湿度並びに日射量に及ぼす影響

(1) 試験環境及び処理区

試験場所は愛知県農業総合試験場内の低コスト耐候性ハウス(間口4.5 m×奥行19.7 m×3連棟×軒高3.5 m、床面積266 m²、表面積557 m²、容積1143 m³、農P0フィルム被覆、南北棟)とした。ハウス中央部には、厚さ0.05 mmの透明ポリフィルムを用いて高さ3 mの隔壁を南北に設置し、ハウス内を東西2区画に分割した。一方の区画にはミスト装置を取り付けるミスト有区を、他方の区画には無処理のミスト無区を設けた。さらに遮光処理として、後述する遮光カーテンの開閉程度を調節し、被覆率0、50、75及び100(全面展開) %の4水準を組み合わせた。試験規模は、1区当たり133 m²とした。換気条件の調査は2013年7月19日の晴天日とし、ミスト噴霧処理を伴う温湿度・日射量調査は7月28日～8月3日のうち晴天であった4日間とした。いずれも施設内は無栽植とした。

(2) 供試資材

ア 超微粒ミスト発生装置

装置は、専用ノズル(N05、噴霧能力50 mL・min⁻¹、なごミスト設計(有)、名古屋)、外径6.4 mmのステンレス管、バルブ、15 μmフィルタ(以上、日本スウェーヂロックFST(株)、西宮)、圧力計(GV50-123、長野計器(株)、東京)、高圧ポンプ(高圧洗浄機を代用、K2.900サイレント、KÄRCHER、ヴィネンデン、ドイツ)及び樹脂製タンク(容量100 L)で構成される。図1に示すように、ミスト有区には専用ノズルを133 m²当たり30個用い、1 m間隔×千鳥様×2列に配置した。遮光カーテンを濡らさない

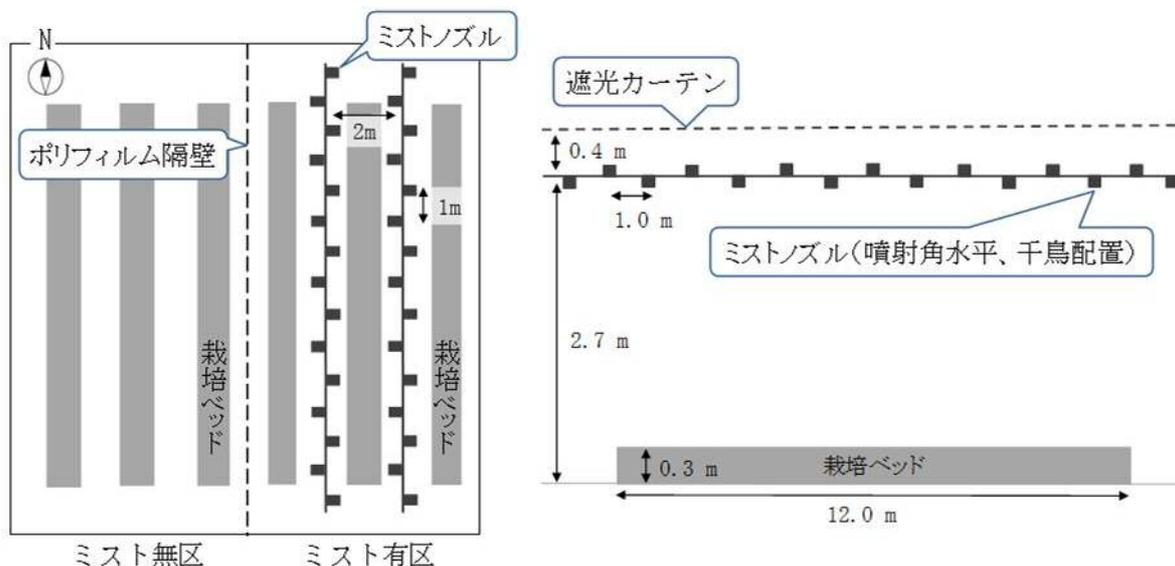


図1 試験装置の配置図(左:平面図、右:断面図)

表1 超微粒ミスト噴霧及び遮光処理した施設内の温湿度及び日射量¹⁾

遮光カーテン 被覆率 ²⁾	測定日 (天候)	処 理	気温 (°C)	Δt ³⁾ (°C)	相対湿度 (%)	日射量 ⁴⁾ ($W \cdot m^{-2}$)	同左 指数
100%	7月28日 (晴)	ミスト有	31.2	-0.8	49.5	191	30
		ミスト無	33.8	1.8	35.8	—	—
		屋 外	32.0	—	50.3	636	100
75%	7月31日 (晴)	ミスト有	32.1	0.5	49.8	190	31
		ミスト無	33.4	1.8	42.0	—	—
		屋 外	31.6	—	62.1	614	100
50%	8月 2日 (晴)	ミスト有	32.5	0.0	47.3	168	33
		ミスト無	34.5	2.0	36.5	—	—
		屋 外	32.5	—	54.3	502	100
0%	8月 3日 (晴)	ミスト有	32.2	1.1	41.4	375	62
		ミスト無	34.2	3.1	30.3	—	—
		屋 外	31.1	—	51.1	606	100

1) 9-15時の平均値 (無栽植条件)。

2) 遮光率50%の遮光カーテンを用い、開閉程度で調節。

3) 内外気温差=ミスト有または無区の施設内気温-屋外気温。

4) 施設内日射量はミスト有区で測定。

なお、被覆率50~100%下の施設内では、日射計を常に日陰となる場所に設置。

ノズル設置方法として、予備試験の結果から、高さ2.7 m (遮光カーテン下40 cm) で噴射角度を水平に調整した。原水には上水を用い、50及び20 μm フィルタ (アズワン (株)、大阪) を順に透過させてタンクに貯留し、これを前述の高圧ポンプで5 MPaに加圧して噴霧した。噴霧水量は川嶋ら³⁾の方法に従い、1 m^2 当たり11 $mL \cdot min^{-1}$ (連続時) とした。ミスト噴霧方法は、湿度調節用制御盤 (しつど当盤、トヨハン種苗 (株)、豊橋) を用い、気温30°C 以上かつ相対湿度75%以下の条件で噴霧60秒及び休止30秒を交互に繰り返す間欠噴霧を基本とした。加えて、濡れセンサ (AKI-1801、アスザック (株)、長野) を高さ2 mで2か所に設置し、スマートリレー (FL1D-H12RCE、IDEC (株)、大阪) を用いて次のとおりに制御した。両センサが濡れを感知すると噴霧を休止し、センサ表面が乾いて20秒後に噴霧を再開するように設定した。

イ 遮光カーテン

遮光カーテンには、施設内に装備された遮光率50%の白色割布シート (SLS50ハーモニー、(株)誠和、東京) を高さ3.1 mで水平に展開して用いた。換気条件の調査では、9、11、13、15及び17時からそれぞれ3~5分ごとに被覆率を4水準で変化させた。ミスト噴霧との併用処理では、所定の被覆率で9~15時に被覆した。

ウ 換気条件

施設の開口部は天窓 (0.9 m×17.2 m、片側開き、3か所) 及び側窓 (1 m×15.7 m、2か所) で、いずれも0.4 mm目合の防虫網で被覆した。換気方式は、天窓及び側窓による自然換気とした。換気の設定は、天窓を25°C 以上で自動開放とし、側窓を常時全開とした。天窓全開

時の施設開口部面積率 (=天窓及び側窓面積÷施設表面積×100) は14% (=77.8÷557×100) であった。

エ 調査方法

換気条件の調査では、遮光カーテン被覆下におけるミスト粒子の蒸発が側窓を通じた換気に強く依存するものと考えられたため、側窓の内側で風速を測定し、側窓から流入する外気の量を簡易に推定した。7月19日に9、11、13、15及び17時からの5回、遮光カーテン被覆率を4水準で変化させながら、熱式風速計 (testo-405-V1、(株)テストー、横浜) を用いて測定した。測定場所は試験区画中央部に位置する側窓とし、展張された防虫網より10 cm内側で高さ80 cmとし、それぞれ3分間の平均値を用いた。これら測定結果をもとに側窓1 m^2 で1秒当たりの外気流入量 (=風速 ($m \cdot s^{-1}$) × 1 m^2) を推定し、換気条件を評価する指標とした。

温湿度については、自作の通風筒及び温湿度記録計 (HL3631、アズワン (株)、大阪) を用い、2分ごとに通風条件 (風速4~5 $m \cdot s^{-1}$) で測定した。測定場所は、試験区画中央部の2か所及び試験施設の西方約200 m地点の屋外に1か所とし、それぞれ高さ2 mで設置した。日射量については、施設内外でそれぞれ日射計 (MS-6-01、英弘精機 (株)、東京) を1か所ずつに高さ1 mで設置し、全天日射を2分ごとに測定した。なお、この施設では、遮光カーテンの被覆率が50及び75%のとき、資材の隙間で生じる日向部分が東西方向の帯状に形成される。そこで、日向部分から漏れる散乱・反射光が日陰部分の日射量に及ぼす影響について調査するため、日射計を常に日陰部分に位置するように配置した。

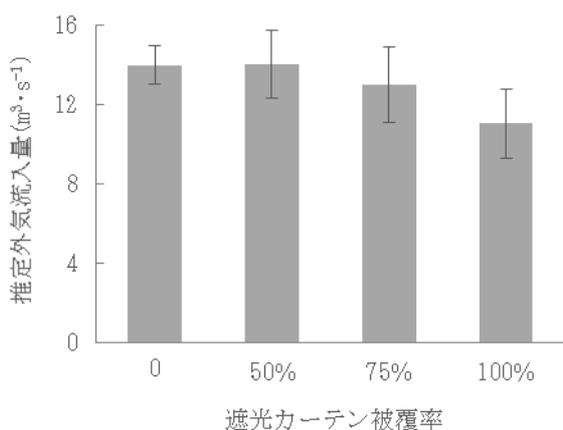


図2 遮光カーテン被覆率が施設内の側窓換気に及ぼす影響（縦棒は標準誤差、n=5）
調査環境：側窓及び天窓を利用した自然換気、
屋外風速 1.24±0.27m·s⁻¹。

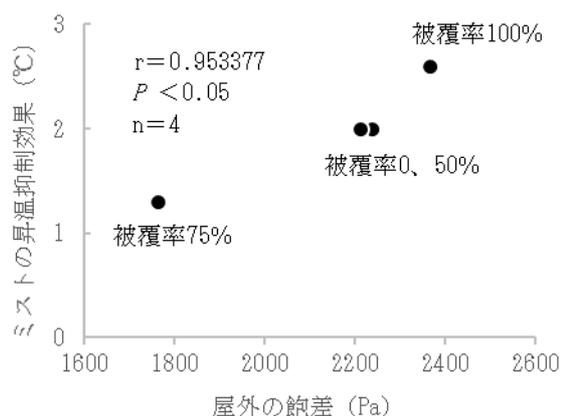


図3 超微粒ミスト噴霧による昇温抑制効果と屋外飽差との関係

表2 遮光下における超微粒ミスト噴霧及び遮光処理が施設内外の気温差に及ぼす効果（分散分析表）

要因	平方和	df	分散	分散比
全体	10.91	7		
ミストの有無	7.80	1	7.80	55.2 * ¹⁾
遮光の被覆率	2.68	3	0.89	6.3 NS
誤差	0.42	3	0.14	

注) 繰り返しのない二元配置分散分析。
1)5%水準で有意差あり、NS：有意差なし。

試験2 超微粒ミスト噴霧及び遮光の併用がトマトの生育・収量に及ぼす効果

(1) 試験環境及び処理区

試験場所、超微粒ミスト発生装置及び遮光カーテンは試験1と同様とした。本試験では遮光条件のもと、超微粒ミスト噴霧の有無による2水準の処理区を設定し、それらがトマトの生育・収量に及ぼす影響について検討した。ミスト噴霧及び遮光処理期間は2013年8月8日～9月30日の54日間とした。

ミスト噴霧方法は試験1と同様であるが、濡れセンサを常に植物体より約50 cm上方となる高さに設置した。遮光処理として、遮光カーテンを以下の被覆率で晴れ～薄曇り（日射量概ね200 W·m⁻²以上）の9～15時に展開した。被覆率については、試験当初、天窓を通じた換気を妨げないようにするため、カーテンに隙間を設けて75%とした。しかし、後述する理由により、8月19日～9月30日は100%に変更した。換気設定は、天窓を25℃以上で自動開放とし、側窓を10月上旬まで常時全開、10月下旬まで昼間のみ開放、11月以降は全閉とした。

(2) 調査方法

施設内及び屋外環境の調査方法は、試験1と同様とした。風速については、熱式風速計（試験1と同機器）を用い、9月13日の9:00、10:30、12:00、13:30及び15:00に測定した。測定場所はミスト粒子の落下域に当たる畝上（側窓から3.5 m内側、高さ1.5 m）とした。葉温については、放射温度計（IR-308、(株)カスタム、東京）を用い、8月21日の14:00～14:30に測定した。測定部位は第4葉の表面とし、1区当たり20株で調査した。生育及び収量調査の対象は、1区当たり10株×4反復とした。開花・収穫始めは、20%の株で1花・果以上の開花・収穫を確認した日とした。

(3) 耕種概要

トマト供試品種は「りんか409」（(株)サカタのタネ、横浜）とし、播種を2013年7月12日に、定植を8月8日（72穴セル成型苗、展開葉3.0枚）に株間18 cm×うね幅180 cmで行った。定植株は、1株ごとに振分けて高さ3 mのワイヤーに誘引した。栽培槽は土壌を詰めた隔離床（全農スーパードレンベッド55）とし、灌水同時施肥方式で肥培管理した。液肥供給（園試処方と同一組成で株当たり窒素施用量50～200 mg·d⁻¹）及び灌水は硬質点滴チューブ（ハイドロPCND、Plastro、キブツグバット、イスラエル）で行い、試験期間内に株当たりN:P₂O₅:K₂O=14.5:5.2:21.2 gを施用した。株元のマルチングには白黒ダブルマルチを用い、白色面を上にして隔離床の上面及び側面を被覆した。通路部分には、防草シートを敷設した。着果安定のため、各花房当たり3～5花開花した時点で4-CPA剤（トマトーン、石原産業(株)、大阪）を100倍に希釈して噴霧し、各果房当たり最多で4果を残して摘果した。収穫期間は10月15日～12月27日とした。11月6日以降は温風暖房機を用いて、最低11℃を確保した。このほかの栽培管理及び防除管理は当場の慣行に準じた。

表3 試験期間内の気象データ¹⁾

観測項目	処理期間内					処理後
	8月中旬	8月下旬	9月上旬	9月中旬	9月下旬	10~12月
平均気温 (°C)	30.3 (+2.3) ²⁾	28.0 (+0.7)	25.4 (-0.8)	25.7 (+1.5)	23.8 (+1.9)	12.7 (+0.3)
積算日照時間(h)	107.3 (165) ³⁾	63.8 (94)	34.7 (61)	82.3 (168)	87.3 (188)	487.2 (97)

1)名古屋地方気象台で観測。 2) 平年差。 3) 平年比(%)。

表4 超微粒ミスト噴霧及び遮光処理期間内にみる日中の施設内気温

処 理	9-15時 ¹⁾ の期間別平均気温 (°C)					全期間平均
	8/8-20	8/21-31	9/1-10	9/11-20	9/21-30	
ミスト有	34.0	30.2	28.3	29.6	27.8	30.1 ± 0.4 ²⁾
ミスト無	36.4	32.5	29.2	30.6	28.0	31.5 ± 0.6
外 気 ³⁾	33.6	30.7	27.2	27.5	27.0	29.1 ± 0.5

1) 日射量200W・m⁻²以上で遮光。 2) 平均値±SE。 3) 屋外。

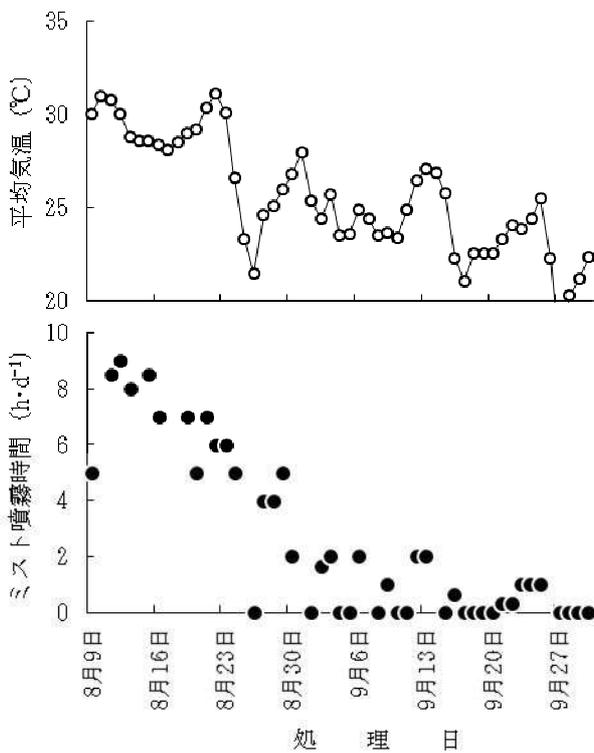


図4 処理期間内における超微粒ミスト噴霧時間及び外気温の推移

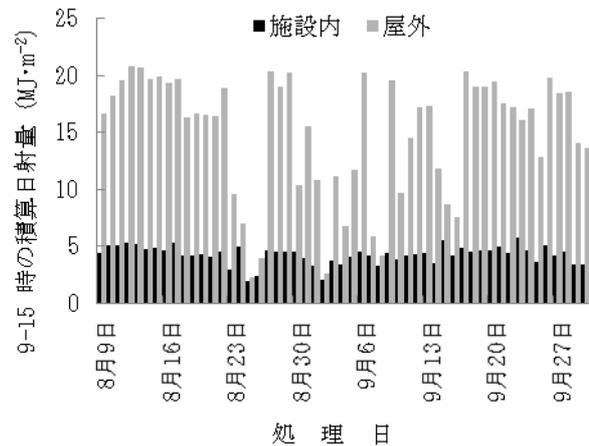


図5 処理期間内における9-15時の積算日射量

試験結果

試験1 遮光カーテンの被覆程度が換気条件、ミスト噴霧下の温湿度並びに日射量に及ぼす影響

(1) 外気流入量

側窓内側で1日5回測定した平均風速をもとに試験施設内に流入する外気の量を推定した(図2)。測定日の屋外では、風向が北西~南西、風速が1.24±0.27 m・s⁻¹であった。外気流入量について、遮光カーテン被覆率間

に有意差を検出できなかったものの(一元配置ANOVA、n = 5、p = 0.310)、被覆率の増加に従って減少する傾向がみられた。側窓1 m²当たり1秒間の外気流入量は、被覆率0%で14.0 m³、被覆率75%で13.0 m³、被覆率100%で11.0 m³と推定された。被覆75または100%では、同0%に比べてそれぞれ7または21%少ない値を示した。

(2) 温湿度

9~15時に測定した施設内外の平均気温及び相対湿度を表1に示す。遮光カーテンの被覆率にかかわらず、ミスト有区はミスト無区に比べて気温で1.3~2.6°C低く、相対湿度で7.8~13.7%高かった。被覆率75%では、他の被覆率に比べて処理区間に生じた気温差は小さかったが、測定日の屋外相対湿度が平均62.1%と高めであった。ミストの有無による気温差(ミスト噴霧による昇温抑制効果)と屋外飽差との間には、正の相関が認められる(図3)。次に、それぞれ処理区ごとに施設内と屋外との平均気温差(以下、内外気温差Δt)を算出して分散分析した結果、遮光カーテンの被覆率にかかわらず、ミストの有無で内外気温差に違いが認められた(表

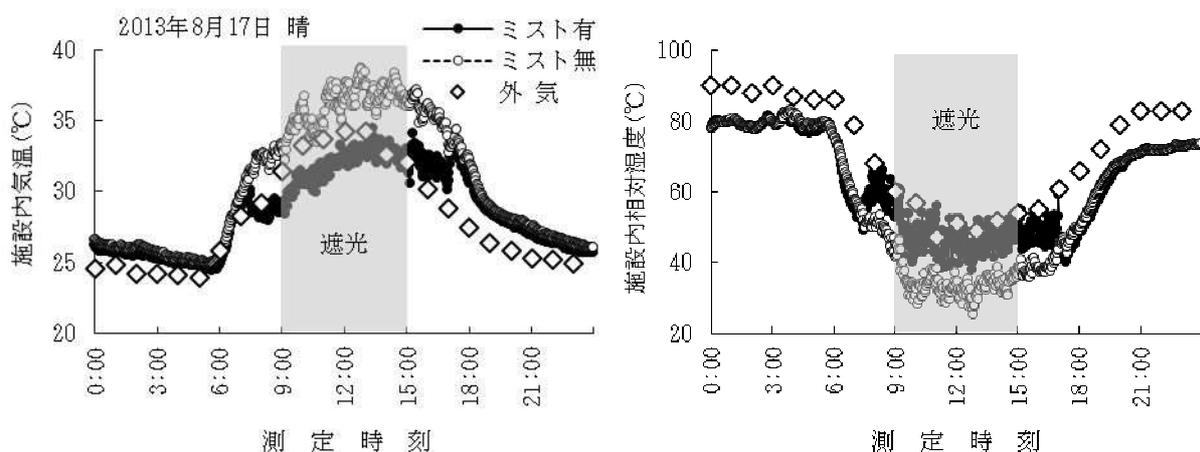


図6 遮光下で超微粒ミスト噴霧した施設内の温湿度変化

表5 遮光下における超微粒ミスト噴霧がトマトの葉温に及ぼす影響¹⁾

処 理	葉 温 (°C)	施設内気温 (°C)
ミスト有	33.4 ± 0.4 ²⁾	35.1 ± 0.1
ミスト無	39.0 ± 0.7	37.8 ± 0.2
有意性 ³⁾	**	

1) 8月21日、14:00-14:30 晴に調査。

2) 平均値 ± SE (n=20)。

3) t検定 (**: 1%水準で有意差あり)。

2)。一方、異なる被覆率による内外気温差の違いは明らかでなかった。また、ミスト無区の内外気温差に注目すると、遮光カーテンの被覆率50~100%区では同0%区に比べて1.1~1.3°C小さかった。

(3) 日射量

9~15時に測定した施設内外の平均日射量を表1に示す。その結果、被覆率0、50、75及び100%下の施設内日射量は、それぞれ屋外日射量の62、33、31及び30%に相当した。全天日射を日陰部分で測定したところ、遮光カーテンの被覆率50~100%間にみられる差異はわずかであった。

試験2 超微粒ミスト噴霧及び遮光の併用がトマトの生育・収量に及ぼす効果

(1) 気象概況

試験期間内における屋外の平均気温及び積算日照時間を表3に示す。旬別にみる処理期間内の平均気温は、8月中下旬及び9月中下旬に平年より0.7~2.3°C高く推移した。日照時間は、8月中旬及び9月中下旬に平年より65~88%長く、多照であった。その後の生育期間にあたる10~12月については、概ね平年並みの気象条件で推移した。

(2) 遮光カーテンの被覆率変更

定植10日後まで被覆率を75%としたが、遮光カーテンの隙間で東西方向の帯状に形成された日向部分の株は、

連日、長時間の直達日射を受けた。この結果、ミストの有無にかかわらず、葉縁部にネクロシスを生じ、活着不良が観察された。このため、8月19日以後は被覆率100%に変更した。

(3) ミスト噴霧時間

処理期間内におけるミスト噴霧時間の推移を図4に示す。噴霧時間は延べ150時間であった。1日当たり噴霧時間は定植直後に8~9時間であったが、9月には2時間以下であった。ミスト噴霧時間の推移は、外気温の推移と同様な挙動を示した。

(4) 遮光カーテン被覆下の日射量

処理期間内における日射量を図5に示す。図では、処理時間帯にあたる9~15時の積算値として集計した。施設内では、期間を通して4~5 MJ・m²で推移した。処理期間54日のうち、遮光処理は39日で行われ、延べ196時間であった。

(5) 施設内環境

8月17日に高さ1mで測定した施設内気温及び相対湿度の経時変化を図6に示す。この日、ミストは7時30分から17時30分頃まで延べ7時間作動した。ミスト有区では、ミストの噴霧周期に伴う温度変化を振幅2°C前後で繰り返しながら推移し、ミスト無区に比べて概ね4°C低かった。9~12時には、ミスト有区で外気より2~3°C低い気温を示し、最高気温は屋外と同程度であった。相対湿度も気温と同様にミスト有区で振幅10%前後の変化を繰り返して推移し、ミスト無区に比べて概ね13%高かった。ミストが噴霧されない時間帯(夜間及び早朝)には、処理区間に気温及び湿度の差は認められなかった。次に、処理期間全体にみる9~15時の旬別平均気温を表4に示す。ミスト有区では、ミスト無区に比べて8月中・下旬に2.3~2.4°C、9月上・中旬に約1°C低く推移した。

トマト栽植条件下で1日5回測定した施設内風速は、次のとおりであった。屋外における風向が西~南西、風速が平均1.6(最少1.4~最大2.1) m・s⁻¹のとき、施設内のミスト粒子落下域では風速0.1 m・s⁻¹程度であった。

表6 遮光下における超微粒ミスト噴霧がトマトの生育に及ぼす影響¹⁾

処 理	草丈 (cm)	葉数	第1花房直下の 茎径 (mm)	第1花房	
				開花株率 (%)	開花始め ²⁾
ミスト有	81.5	13.9	12.0	92.5	8月31日
ミスト無	73.0	13.4	11.7	62.5	9月5日
有意性 ³⁾	**	*	NS	*	

1) 定植32日後に調査(2013年9月9日)。

2) 調査対象40株のうち20%が開花した日。

3) t検定 ** : 1%水準で有意差あり、* : 5%水準で有意差あり、NS : 有意差なし(開花株率のみ χ^2 -検定)。

表7 遮光下における超微粒ミスト噴霧がトマトの花・果実・葉数に及ぼす影響

処 理	花房別花数 ¹⁾			果房別果実数 ²⁾			果房下または間の葉数		
	第1	第2	第3	第1	第2	第3	~第1	~第2	~第3
ミスト有	6.7	7.9	9.8	3.8	3.8	2.9	10.9	3.2	3.1
ミスト無	6.2	7.6	11.2	3.7	3.7	2.8	10.8	3.7	3.0
有意性 ³⁾	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS

1) 花房当たり開花数。

2) 果房当たり最多で4果を残して摘果済み。

3) t検定 * : 5%水準で有意差あり、NS : 有意差なし。

表8 遮光下における超微粒ミスト噴霧がトマトの年内収量・品質に及ぼす影響¹⁾

処 理	年内収量 (kg)		月別可販果数				平均 1果重 (g)	尻腐れ 果数	裂果数
	可販果	規格外果	10月	11月	12月	合計			
ミスト有	2.70	0.23	3.5	5.3	6.8	15.6	173	0.8	0.0
ミスト無	2.37	0.27	1.7	6.0	4.8	12.5	190	0.9	0.0
有意性 ²⁾	*	NS	*	NS	*	*	**	NS	NS

1) 収量及び果数は、それぞれ株当たりで表示。

2) t検定 ** : 1%水準で有意差あり、* : 5%水準で有意差あり、NS : 有意差なし。

(6) トマトの葉温、生育及び収量

葉温も気温と同様に処理区間で差異が認められ、ミスト有区はミスト無区より5.6℃低かった(表5)。また、一時的に遮光カーテンに隙間を設けて直達光下に位置する株の葉温を測定したところ、ミスト噴霧下でも43.1℃を示し、遮光下にあるミスト有区の33.4℃を大きく上回った。

定植32日後の生育・開花状況を表6に示す。ミスト有区では、ミスト無区に比べて初期生育が促進され、草丈が高く、葉数が多かった。ミスト有区では、開花始めもミスト無区より5日程度早かった。第1~3花・果房の花・果数については、処理区間に差異が認められなかった。ただし第1~2果房間の葉数に差異が認められ、ミスト有区では3葉程度であったが、ミスト無区では4または5葉の株が散見された(表7)。

収穫始めは、ミスト有区で10月15日、ミスト無区で10月21日と、前者が6日早かった。年内の株当たり可販果収量は、ミスト有区で2.70 kg、ミスト無区で2.37 kgと前者が後者に比べて約14%多かった(表8)。収穫果数もミスト有区でミスト無区より多かったが、平均1果重

は後者で重かった。尻腐れ果発生については、両処理区で差異は認められなかった。裂果発生については、いずれの処理区でも観察されなかった。収穫調査を終了した12月27日時点において、ミスト有区では既に第7果房の収穫が始まっていたところ、ミスト無区では第6果房の収穫途中であった。

(7) 植物体の濡れ

処理期間を通じてミスト粒子による植物体の濡れ及び病害発生は観察されなかった。

考 察

トマトは吸水量の約95%を蒸散しており⁷⁾、栽植条件では多量の水蒸気を施設内に放出しているものと思われる。しかし、試験2の測定結果にみられるように、8月晴天日の日中には、ミスト無区の相対湿度は外気のそれより低い値を示した。生育初期が高温期と重なる抑制栽培では、株が小さいために施設内の気温上昇を抑制するほどの蒸散量は確保しにくい。加えて、群落が未発達

なために相互遮蔽も十分に得られず、強日射による高温ストレスにさらされやすい。従って、この作型におけるミスト噴霧及び遮光は、それぞれ有用性の高い高温対策技術であると考えられる。

本研究では、開口部に0.4 mm目合の防虫網を展張した自然換気の高軒高施設内において超微粒ミスト噴霧及び遮光を併用する技術について検証した。最初に、施設内部に設置された遮光カーテンの被覆程度が換気条件に及ぼす影響について調査した結果、遮光カーテンの被覆率が増加するに従い、側窓からの外気流入量が減少する傾向がみられた。遮光カーテンが側窓から天窓に流れる空気の動きを阻害したことに起因するものと思われる。その一方、試験施設では、被覆率100%下においても同0%下の約8割に相当する換気条件が確保されているものと推察された。そこで、遮光カーテン被覆下において超微粒ミストを噴霧した結果、日中に施設内気温を外気と同程度に抑制できることが明らかになった。試験1の結果をもとに、施設内外の気温差から算出した昇温抑制効果は、ミスト噴霧処理で1.3~2.6℃、遮光処理で1.1~1.3℃と推定された。超微粒ミストによる気化冷却は、既報によれば風速0.25 m・s⁻¹を大幅に下回る環境で安定しにくいとされる²⁾。しかし、ミスト粒子落下域(トマト群落上層)の風速を実測したところ、0.1 m・s⁻¹程度と微弱であったにもかかわらず、昇温抑制効果は大きく損なわれないことを認めた。本研究では高軒高施設を利用して、従来の試験施設に比べて容積が大きいために空气中に保持できる水蒸気量が多くなること、ノズルの位置が高いためにミスト粒子の落下時間・距離を長く確保できること等が気化を助長した要因と考えられる。このことから、高軒高施設では、超微粒ミスト噴霧に必要な風速条件の下限値は0.25 m・s⁻¹より低くなるものと推測される。

高温期に定植するトマト抑制栽培において、超微粒ミスト噴霧及び遮光の併用は、活着・生育の促進及び年内収量の増加に有効であった。初期生育で生じた処理区間の生育差はその後も持続し、ミスト噴霧下において開花日で5日、収穫開始日で6日の前進を示した。こうした一連の生育促進は、主に植物体温(葉温)の低下を介して発現するものと思われる。ミスト噴霧による葉温の低下は、他の細霧冷房方式でも報告されており^{8, 9)}、本研究でも日中に5~6℃の低下を認めた。これらの結果、ミスト有区では高単価を期待できる10~12月期の年内収量が、ミスト無区のそれに比べて約14%増加した。ミスト有区では、ミスト無区に比べて12月の収穫時までで生育の前進化が認められており、これに伴って年内の収穫果数が増加したものと思われる。また、ミスト有区の平均1果重はミスト無区のそれより軽かったものの、ミスト有区の173 gは出荷規格のL階級に相当し、商品性に問題ないと思われた。高温障害の一つとされる尻腐れ果及び裂果発生を軽減する効果については明らかでなかった。

筆者らは、超微粒ミスト噴霧に施設内装備の遮光カーテンを併用するにあたり、カーテンに隙間を設けること

で気化冷却の発現及びトマトの生育に至適な換気及び光条件を見出せると考えて試験した。試験1の結果では、遮光カーテンの被覆率が昇温抑制に及ぼす影響について明瞭な差異は認められなかったものの、外気流入量の減少が示すように、被覆による換気条件の低下は不可避と思われる。カーテンの隙間からの日射が生育を阻害しないのであれば、隙間を設ける被覆方法はミスト噴霧との組み合わせに有効であろう。遮光カーテンの被覆程度と換気条件との関係について論じられた既往の報告は見当たらないが、遮光資材の物理的構造(織り方・間隙率)による通気性の差異は指摘されている¹⁰⁾。平織やカラミ編みで間隙率が高い資材では、通気性が優れ、施設上層部に熱気が滞留しにくいとされる。また、本試験で用いた資材と同様な通気性の高い割布・織布の利用も近年増加しており、室内の高湿度化の回避に有効とされる¹⁾。遮光カーテンの選択には、遮光率のもとより、こうした通気性についても考慮する必要がある。二村ら⁶⁾は、超微粒ミスト噴霧と施設外部に設置された遮光資材との組合せがバラ栽培用の施設環境に著しい降温効果をもたらすことを報告している。遮光を用いるには、このように施設外部に設置する方法が最も効果的であろうが、県内トマト産地にみられる既存の施設構造では、内部に装備される場合が多い。一方、既設のミスト装置は遮光カーテンの上に設置されており、高温対策用の両資材を組み合わせる利用しにくい状況にある。しかし高軒高施設であれば、群落上に十分な空間を確保しやすいため、植物体及び遮光カーテンを濡らさない位置にミスト装置を取り付けることは可能と思われる。

次に、日射量測定の結果から、遮光カーテンに隙間を設ける処置は光条件の確保(散乱光による日射量の増加)に必ずしも寄与しないことを示唆した。試験2では、ミスト噴霧下においても遮光カーテンの隙間から入射する直達光にさらされたトマトの葉温は40℃以上に達し、葉焼け・活着不良を生じた。トマトの高温に対する反応は、40℃で茎葉の伸長を停止し、45℃以上になると短時間で茎葉の日焼け・葉脈間の壊死を起こすとされる¹¹⁾。トマトに及ぼす強光ストレスについて、吉田ら^{12, 13)}は生育抑制及び着果不良を引き起こすことを報告し、晴天日に350または400 W・m⁻²を超える強光時の遮光(遮光率50%)は乾物生産に悪影響を及ぼすことなく、ストレス回避に有効であると指摘した。試験2では、十分な処理時間・期間のもとで遮光併用の効果を比較するため、8月上旬~9月末の9~15時に日射量200 W・m⁻²以上(晴れ~薄曇り)で遮光処理した。その結果、9~15時の積算日射量が4~5 MJ・m⁻²で管理された。和田ら¹⁴⁾は、夏季の一段栽培において、平均気温25℃以上で日平均積算日射量を5~6 MJ・m⁻²程度まで低下させる遮光によって裂果を減少し、可販果収量を増加させる効果を報告しており、試験2の光条件はこれに近い管理であった。ただし、長段栽培では一段栽培と異なり、栄養成長と生殖成長とを長期にわたって同時進行させるため、より多くの光を要求することが推察されるとともに、結実した果房上には十分な茎葉が繁茂し、果実を直達日射か

ら遮蔽することができる。そこで、長段栽培においてミスト噴霧と併用する遮光の条件としては、抑制栽培における育苗から定植1か月後までの生育初期、または7～8月期における $350\sim 400\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上の晴天日等、生育ステージや日射による制限を設け、適宜組み合わせる利用方法が実用的であると思われる。

ミスト装置については、遮光資材の下に設置されるためにノズルと植物体との距離は近くなり、高い蒸発特性を有する超微粒ミストが最適と思われた。その制御方法については、温湿度に加えて濡れセンサとの組み合わせも不可欠である。本研究では、濡れセンサをミストノズルと植物体との間に配置したため、ミスト粒子が植物体に到達するより早くセンサで検知された。この結果、濡れセンサの作動は認められたが、植物体の濡れを回避できたものと考えられる。

自然換気は温度差及び風力に大きく依存し、大型の施設で連棟数が多いほど困難になることが知られる¹⁾⁵⁾。近年のトマト産地では、施設の大型化に伴って建屋全体に占める側窓の面積が相対的に減少しており、換気条件は低下傾向にある。本研究は間口 $4.5\text{ m}\times 3$ 連棟（妻面の長さ計 $13.5\text{ m}=4.5\text{ m}\times 3$ ）での試験結果であるが、側窓開度を小さく抑えて試験した。また、施設側面から吹き込む風の内部到達距離は約 10 m とされていることから²⁾、施設妻面の長さが計 20 m 程度であれば、側窓による自然換気を利用でき、本研究の技術が利用可能であると思われる。一方、 10 a を超える多連棟、特にフェンロー型温室では、天窓を介した換気による室内の気流パターンが複雑であることが調べられており¹⁾²⁾、遮光カーテンの上下で気流を分断しないように、小さな隙間を設けて検証する必要がある。また、大規模施設の多くには、循環扇が設置されており、空気の攪拌がミスト粒子の気化促進または温湿度分布に及ぼす影響についても今後の検討課題である。施設固有の換気特性は、冷房設計において重要なパラメータであるが、正確な測定には高価な機器を必要とするとともに、絶えず変化する屋外の風速・風向に強く影響されるため、その把握は容易でない。本研究では、側窓内側の風速から外気流入量を推定して換気条件の指標とみなしたが、さらに正確で簡易な評価方法の確立が望まれる。

以上の結果から、気化速度が著しく速い超微粒ミストは、微弱な風速下でも昇温抑制効果が損なわれにくいことが確認され、既存の遮光資材と組み合わせることにより、トマト栽培における高温対策技術として一層高い効果が期待できるものと考えられる。

謝辞：本研究の遂行にあたり、JAあいち経済連の夏目和馬氏には試験装置の設置、各種調査及び栽培管理等で多大なご協力をいただいたので、ここに感謝の意を表する。

1. 林真紀夫. 五訂 施設園芸ハンドブック. 日本施設園芸協会. 東京. p. 116-157(2003)
2. 二村幹雄. 施設園芸における夏期高温対策技術. 農業電化. 65(4), 2-7(2013)
3. 川嶋和子, 鈴木充博, 長屋浩治, 水野はるか, 榊原政弘. ドライミスト®による冷房処理がトマト抑制栽培における施設内気温、生育、収量に及ぼす効果. 園学研. 9(別1), 143(2010)
4. 川嶋和子, 長屋浩治, 加藤美雪, 浅野義行. トマト抑制栽培における超微粒ミストの噴霧量の違いが施設内気温と収量に及ぼす影響. 園学研. 10(別1), 155(2011)
5. 二村幹雄, 山口徳之, 池内都, 和田朋幸, 大石一史. 夏期高温時の超微粒ミスト噴霧と夜間冷房がバラ切り花の収量・品質に及ぼす影響. 愛知農総試研報. 44, 53-59(2012)
6. 二村幹雄, 池内都, 和田朋幸, 平野哲司. 超微粒ミスト稼働下での夏期の遮光がバラ切り花の収量・品質に及ぼす影響. 愛知農総試研報. 45, 37-43(2013)
7. 細野達夫, 細井徳夫. 施設養液栽培長段トマトの日吸水量. 農業気象. 58(4), 207-216(2002)
8. 林真紀夫, 菅原崇行, 中島浩志. 自然換気型細霧冷房温室の温湿度環境. 生物環境調節. 36(2), 97-104(1998)
9. Handarto, Hayashi, M. and Kozai, T. Air and leaf temperatures and relative humidity in a naturally ventilated single-span greenhouse with a Fogging System for cooling and its evaporative cooling efficiency. Environ. Control Biol. 43(1), 3-11(2005)
10. 森山友幸, 林三徳, 井手治. オープンハウスの内張に適した遮光資材の特性. 福岡農総試研報. 28, 89-93(2009)
11. 斎藤隆. 農業技術大系野菜編2 トマト. 農山漁村文化協会. 東京. p. 基32-35(1973)
12. 吉田裕一, 羽場清人, 村上賢治, 榊田正治. 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(2002)
13. 吉田裕一, 中園堯士. 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(2006)
14. 和田光生, 池田英男, 松下健司, 神原晃, 平井宏昭, 阿部一博. 夏季の遮光が一段栽培したトマト果実の収量と品質に及ぼす影響. 園学雑. 75(1), 51-58(2006)
15. 佐瀬勘紀. 五訂 施設園芸ハンドブック. 日本施設園芸協会. 東京. p. 182-195(2003)

引用文献

