

# 細霧ノズル付循環扇を用いた 中山間地域向け 簡易細霧冷房システムの利用法





# 目次

1. はじめに	1
2. 細霧ノズル付循環扇を用いた 簡易細霧冷房システムの概要	2
(1) システムの構成と制御方法	2
(2) 細霧ノズル付循環扇	4
(3) 噴霧アルゴリズム	4
(4) 細霧冷房による冷房の限界	7
3. 簡易細霧冷房システムの実施例	9
4. 中山間地域の夏秋トマトにおける導入効果	10
5. システム稼働時の留意点	11
資料：導入コストとパーツリスト	13

## 1. はじめに

近年、地球温暖化の進行にともない、夏季に高温となる年が頻発し、園芸施設の暑熱対策が重要となっている。さらに、トマトの黄化葉巻病対策には、媒介昆虫であるコナジラミ類のハウス内への侵入を抑制する0.4mm目合いの防虫ネットの展張が有効であり、その利用が一般的となっている。そのため、夏季には換気性能の劣化による温度上昇が加わり、夏秋トマトの施設栽培では、着果不良、裂果、高温障害の発生などによる収量の低下が起こっている。

ハウス内の高温を抑制する主な手段として、1)自然換気・強制換気、2)シート状資材を施設の上部に展張して日射を制限する遮光、3)水の気化冷却を利用する冷却法がある。ここで述べる細霧冷房とは、自然換気または強制換気が行われる園芸施設において、水を霧状に噴霧するノズル(細霧ノズル)をハウス内全体に配置し、断続的あるいは連続的に噴霧した水(細霧)が気化する時の気化冷却によってハウス内の気温を低下させる方法である。理論的には外気の湿球温度まで低下させることが可能である。設備費用は高価となるが、適正量の噴霧を行えば、均一な冷房が可能で、作物の濡れも回避でき、冷却効果も高いと考えられている。

現在では、細霧ノズルを循環扇の送風面に配置した細霧ノズル付循環扇と呼ばれる製品が登場し、さまざまなメーカーから販売されている。中には比較的安価な装置もあり、細霧冷房がより身近な状況となっている。そこで、細霧ノズル付循環扇を用いた中山間地域向け簡易細霧冷房システムを開発したのでその利用法を解説する。

農研機構近畿中国四国農業研究センター 傾斜地園芸研究領域  
(現 農研機構九州沖縄農業研究センター 生産環境研究領域)  
柴田 昇平

## 2. 細霧ノズル付循環扇を用いた簡易細霧冷房システムの概要

### (1) システムの構成と制御方法

開発した簡易細霧冷房システムは、細霧ノズル付循環扇を用いて、温室内の湿度(乾湿球温度差)を指標として噴霧制御を行う(図1)。温室の中央で乾湿球温度を計測し、気温と湿度(乾湿球温度差)に応じて自動的に噴霧量を制御する。この方法により、蒸発せずに落下して無駄になる水滴の噴霧を抑制するとともに葉濡れの少ない制御が可能となる。

本システムは、細霧ノズル付循環扇、動力噴霧機(動噴ポンプ)、給水タンク、温度センサ(乾球・湿球温度計)および噴霧コントローラで構成される(図1)。

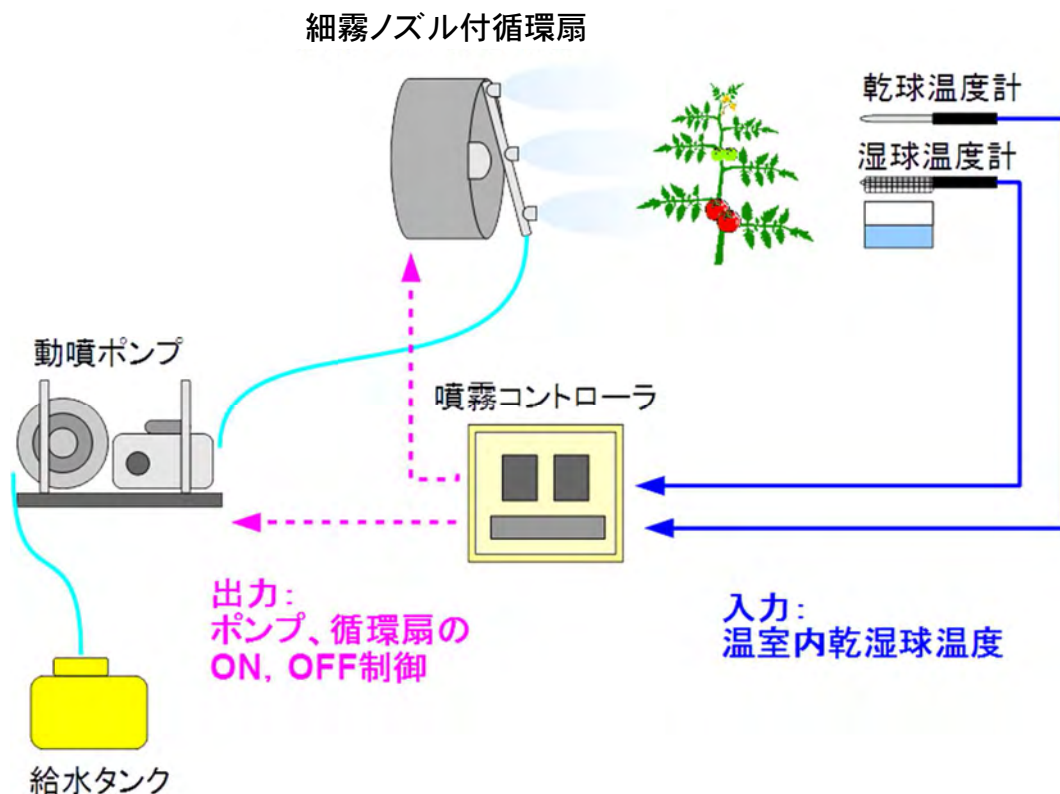


図1 簡易細霧冷房システムのイメージ

システムの入力に用いる温度センサは、測定精度と応答性に優れた白金抵抗体温度センサがよい。温度センサは、直達日射を避けるため通風筒内に配置するとともに、小型ブロワファンで常時通風して乾湿球温度を正確に測定できるように

にする。湿球温度は、蒸留水を蓄えたボトルから脱脂綿によって温度計感部を包み湿らせた状態で計測する温度である(図2)。細霧冷房稼働時においてもハウスの代表的な温度を正しく計測できるように、センサのみならず、通風や日射除けに気を配る必要がある。また、噴霧された細霧がセンサに直接かからない位置に設置する。



図2 制御用乾湿球温度センサの外観

入力信号は、デジタル信号に変換されプログラマブルコントローラ(PLC)に送られ、時刻、気温、乾湿球温度差に基づき動噴ポンプと循環扇の動作(ON/OFF)を制御する仕組みとなっている。

本システムで用いた細霧ノズル付循環扇は、循環扇の中心から幅 1.5~2.0m、循環扇の送風方向に距離 15mの空間の冷却が可能である。また、ハウスの軒高にもよるが、2m程度の高さに設置して、天井と作物の間の空間において気流ができるだけ安定して循環することが望ましい。間口 5.4m×奥行き 48mの片屋根ハウスにおける設置例(図3)のように、循環扇の冷気が到達する距離に留意しつつ、ハウス内を空気が大きく循環するように6台の循環扇を配置する。動噴ポンプから各細霧ノ

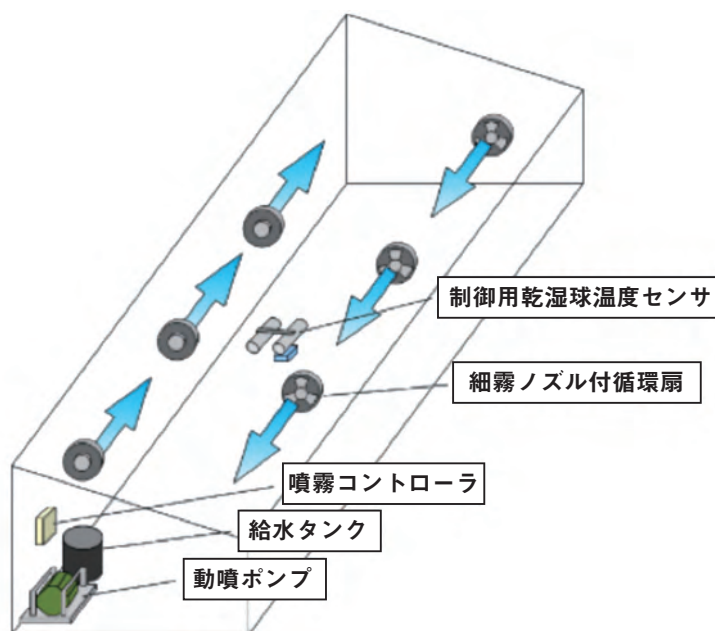


図3 簡易細霧冷房システムの配置例

ズル付循環扇への配管には、動噴用の耐圧ホース(最高圧力4~5MPa)を使用するので、比較的自由に細霧ノズル付循環扇を配置できる。



## (2) 細霧ノズル付循環扇

採用した細霧ノズル付循環扇とその仕様を示す(図4)。本機種で用いられる細霧ノズルは多目的ノズルであるため、噴霧粒径は30~40 $\mu\text{m}$ であり、細霧冷房専用のノズルによる噴霧粒径と比べてやや大きめである。



MHC-2100仕様	
ノズル个数	3
使用水圧力	1.5MPa
使用水量	100cc $\times$ 3 = 300cc/分
ノズル噴角	円錐形60°
粒径	30 ~ 40 $\mu\text{m}$

図4 採用した細霧ノズル付循環扇 (F社 MHC-2100)

噴霧された水粒子は、循環扇の送風により水平方向に移動する。水粒子は水平方向に移動する間に気化熱を奪いながら蒸発することにより、1台の細霧ノズル付循環扇で約15mの広範囲の空気を冷却できる。このため、従来の細霧冷房システムのようにハウス内に多数の噴霧ノズルを配置する一般的な細霧冷房システムと比較して、単位面積あたりの噴霧ノズル数を大幅に削減できる。すなわち、一般的な細霧冷房システムと比較して部材点数や設置にかかる工数が削減できることから特に導入コスト面で有利となり、比較的安価に細霧冷房システムを構築できる。

## (3) 噴霧アルゴリズム

### 1) 特徴

ハウス内の温湿度は、ハウス内外の気象環境に応じて刻々と変化するのに対して、動噴ポンプの稼働時間をそのような短い時間変化に対応させる制御は不

可能であり、数分間の単位で噴霧と停止を繰り返すことになる。そのため、噴霧制御を判断した時点から次の判断までに十数分の時間が経過することもある。特に晴天日の午前中は、日射量の増加とともに温室気温が上昇するため、乾湿球温度差が短時間で拡大する。そのような条件下で、噴霧不足が発生するのを防ぐ必要があるため、その時点における可能蒸発量(相対湿度が100%になるまでの蒸発量)、噴霧開始から一定時間経過後の状態を見込んだ可能蒸発量を加算して噴霧させるアルゴリズムである。

## 2) アルゴリズム

ハウス内において、乾球温度: $T_d$ ( $^{\circ}\text{C}$ )と湿球温度: $T_w$ ( $^{\circ}\text{C}$ )との差、乾湿球温度差を $df_1$ ( $^{\circ}\text{C}$ )とする( $df_1 = T_d - T_w$ )。現在の時刻( $t$ )とそれ以前の任意の時刻( $t-1$ )におけるそれぞれの乾湿球温度の差(乾湿球温度の変化)を $df_2$ ( $^{\circ}\text{C}$ )とし、 $df_2 = (df_1)_t - (df_1)_{t-1}$ とする。本システムは、 $df_1$ と $df_2$ に基づき、噴霧時間:ST(分)と噴霧停止時間(待ち時間):WT(分)を決定する噴霧アルゴリズムで動作する(図5)。あらかじめ温度差: $x_0$ 、 $x_1$ および $x_2$ ( $^{\circ}\text{C}$ )の3水準( $x_0 < x_1 < x_2$ )を設定する。 $df_1$ と $x_0$ 、 $x_1$ および $x_2$ との大きさを比較し、図5に示すように $df_1$ と $df_2$ の条件に応じて、基準噴霧時間:ST<sub>0</sub>、ST<sub>1</sub>、ST<sub>2</sub>、ST<sub>3</sub>(分)と噴霧を休止する待ち時間:WT<sub>0</sub>、WT<sub>1</sub>、WT<sub>2</sub>、WT<sub>3</sub>(分)を設定しておく。

$df_2$ が時間の経過とともに変化する非定常状態を考える。噴霧している(加湿時)にもかかわらずハウス内湿度が低下する場合、ハウス内では換気が進んでいる、あるいはハウス内の気温が上昇傾向にあり、相対湿度の低下が進んでいると判断される。すなわち、すなわち $df_2$ が正( $df_2 > 0$ )の場合は、その時点における可能蒸発量だけでなく、さらなる蒸発可能性を見込んで噴霧時間を延ばすパラメータ: $\alpha$ (分)によって噴霧量を加算する制御を行う。この制御によって噴霧量の不足を防ぎ、より大きな冷房効果を得ることができる。

一方、噴霧によりハウス内湿度が上昇する場合(すなわち、 $df_2 < 0$ )、余分な噴霧により葉濡れを引き起こす可能性が高くなるので、 $n=0$ として可能蒸発量の



みで噴霧を停止させ、所定の待ち時間の間噴霧を休止する制御を行う。

実際の試験において設定した例を示す。循環扇と動噴ポンプの稼働時刻をそれぞれ 7:00~18:00 と 8:00~17:00 に設定して運転した。乾球温度が 26.5℃を超えた場合に、 $ST_0=0$ 分、 $WT_0=5$ 分、 $x_0$ 、 $x_1$ および  $x_2$ はそれぞれ2℃、3℃および5℃、 $ST_1$ 、 $ST_2$ および  $ST_3$ はそれぞれ2分、3分および4分、 $WT_1\sim WT_3$ は共通で1分10秒、 $\alpha=0.5$ 分とした。

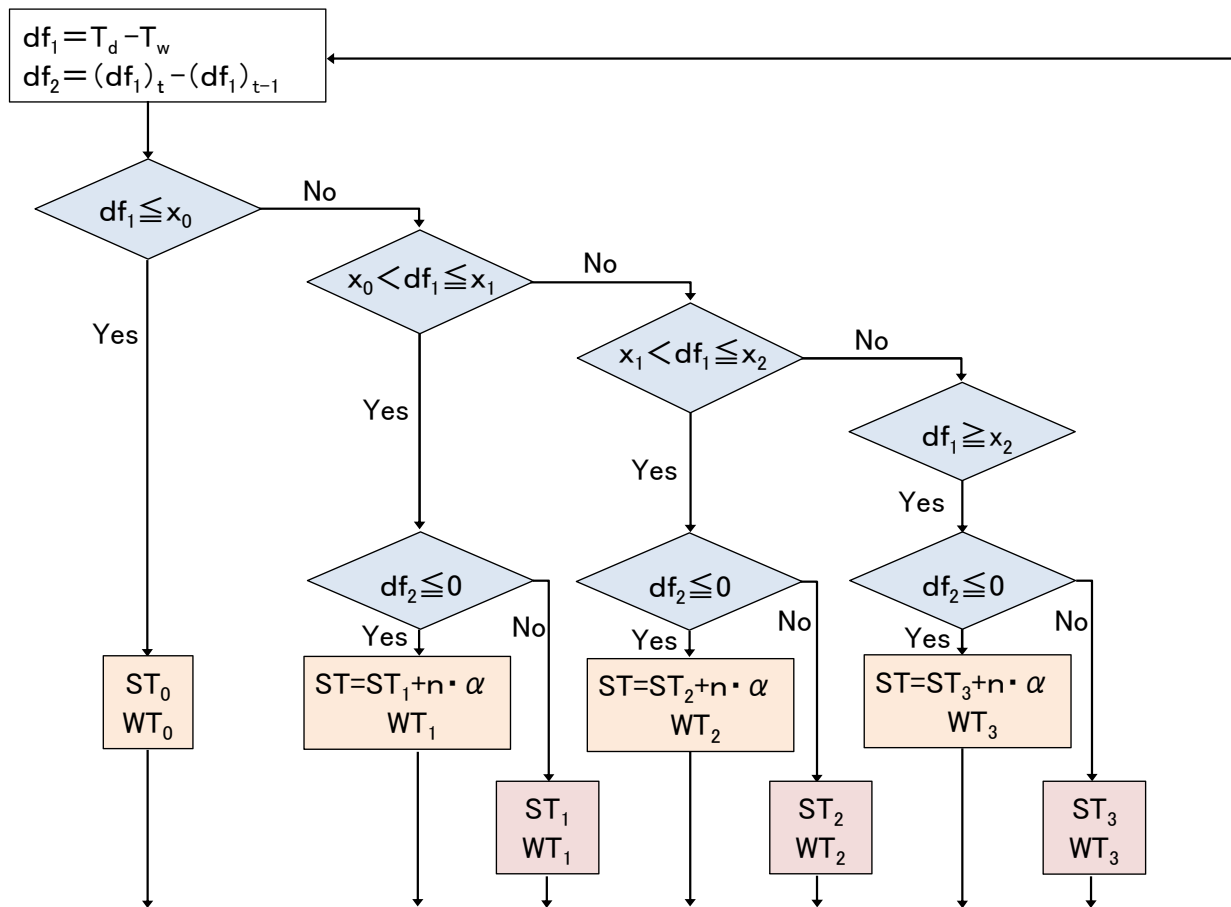


図5 簡易細霧冷房システムの噴霧アルゴリズム

- $T_d$  : 乾球温度 (°C)、 $T_w$  : 湿球温度 (°C)
- $df_1$  : 乾球湿球温度差 ( $df_1 = T_d - T_w$ ) (°C)
- $t$  : 現在の時刻、 $t - 1$  : それ以前の任意の時刻
- $df_2$  :  $t$  と  $t - 1$  におけるそれぞれの乾湿球温度の差 (乾湿球温度の変化) すなわち、 $df_2 = (df_1)_t - (df_1)_{t-1}$  (°C)
- $x_0$ 、 $x_1$ 、 $x_2$  : 設定温度差 (°C) ( $x_0 < x_1 < x_2$ )
- $ST_0$ 、 $ST_1$ 、 $ST_2$ 、 $ST_3$  : 基準噴霧時間 (分)
- $WT_0$ 、 $WT_1$ 、 $WT_2$ 、 $WT_3$  : 噴霧を休止する待ち時間 (分)
- $\alpha$  : 噴霧時間を延ばすパラメータ (分)
- $n$  :  $df_2$  が連続して 2 回 0 を上回った回数

#### (4) 細霧冷房による冷房の限界

水蒸気を含んだ空気の状態は、温度と湿度により規定される。絶対湿度、相対湿度、露点温度、エンタルピのいずれか2つの値が定めれば、湿り空気線図を用いて他の状態値を簡易的にすべて求めることができる(図6)。ある状態の空気(乾球温度a)が、エンタルピを保ったまま加湿された場合、相対湿度が100%となる温度が湿球温度bである。すなわち、bの温度が細霧冷房によって低下させることのできる最低の温度ということになる。

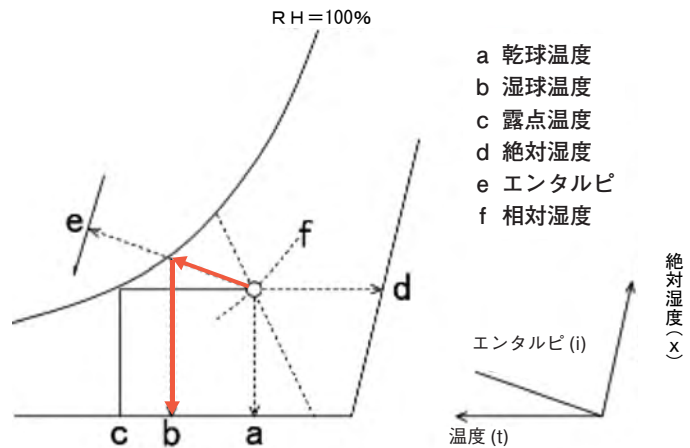


図6 湿り空気線図の見方

蒸発冷却法を行う場合の必要換気量、細霧噴霧量の決定には、VETH 線図 (Ventilation-Evaporation-Temperature-Humidity 線図) を用いるのが便利である。これは、ある一定気象条件下における温室の換気率 (V、Ventilation)、温室内蒸散量 (E、Evaporation)、排気温度 (T、Temperature)、湿度 (H、Humidity) の相互関係を示したものである(図7)。

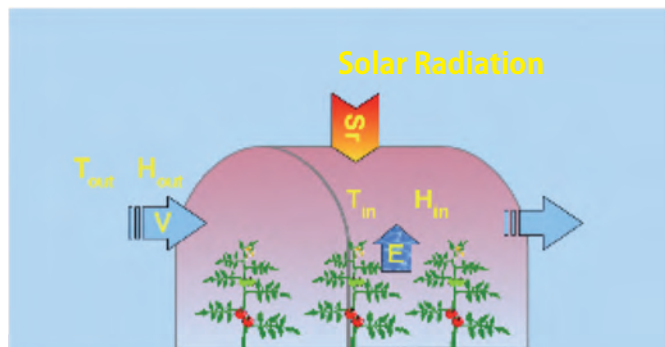


図7 温室における VETH の関係

VETH 線図の作図は、林ら(2006b)が開発したフリーソフト「細霧冷房運転支援ソフト」の利用が便利である。細霧冷房を導入したい温室の基本条件(床面積、被覆面積、日射透過率など)、あらかじめ温室内外の気象環境(乾球温度、湿球温度、日射量)を計測しておけば、自動的に VETH 線図を作図できる。さらに、目標室温と細霧の蒸発比率を指定することにより、噴霧速度を算出することができる。

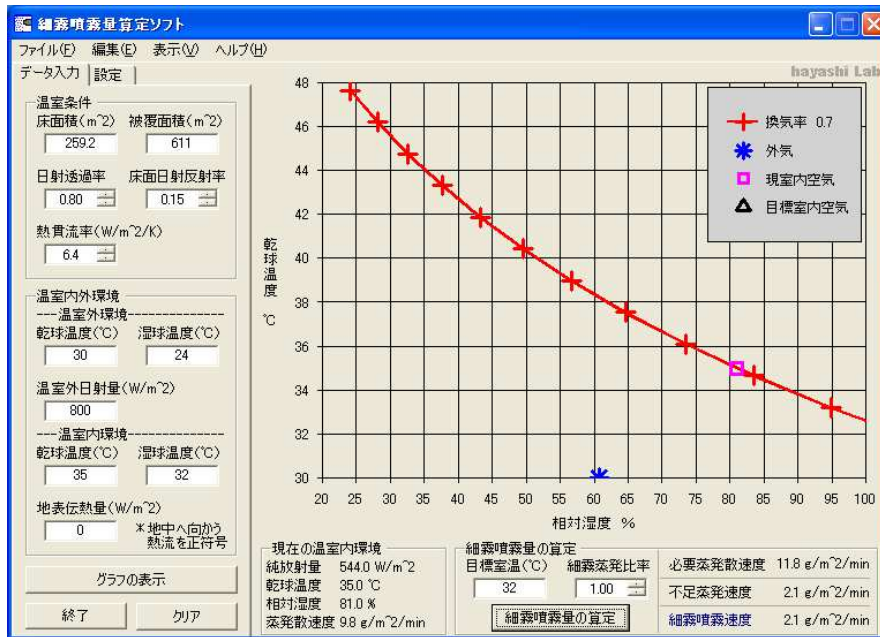


図8 細霧冷房運転支援ソフトで作図した VETH 線図

細霧冷房運転支援ソフトを利用して、約2aのパイプハウスについて算出した可能噴霧量の例を示す(図9)。乾湿球温度差が6°Cを超える乾燥時において、可能噴霧量に対して噴霧量(噴霧速度)が小さいと、目標温度まで温度を低下させられないことになる。このため、冷却効果を得るには十分な噴霧量を確保することが重要である。

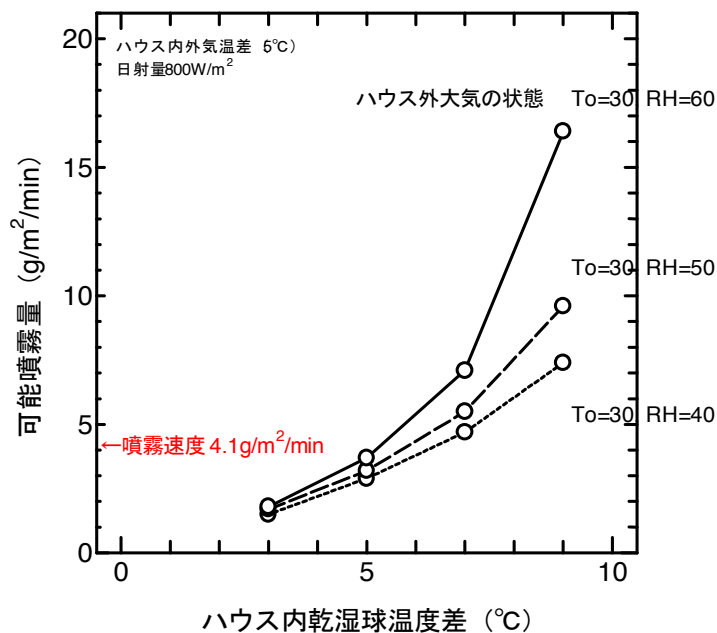


図9 「細霧冷房運転支援ソフト」により算出した可能噴霧量

### 3. 簡易細霧冷房システムの実施例

農研機構近畿中国四国農業研究センター仙遊地区(香川県善通寺市、標高 28m)に設置した間口6m×奥行き 18mのパイプハウスにおいて、2台の細霧ノズル付循環扇を妻面方向へそれぞれ対抗して送風するように設置した(図 10)。9:00~16:00 の



図 10 パイプハウスでの設置状況

間、温室の気温が 28℃を超えると噴霧を開始するように設定した。乾湿球温度差に基づき、基準噴霧時間( $ST_1$ )を2分、乾湿球温度差( $x_0 \sim x_2$ )はそれぞれ1~4℃、休止時間( $WT_0 \sim WT_3$ )を1~5分として運転した。噴霧休止の間に温室内は急激に気温が上昇し、28℃を超えると再び噴霧が開始されるという間欠動作を繰り返していることがわかる(図 11)。

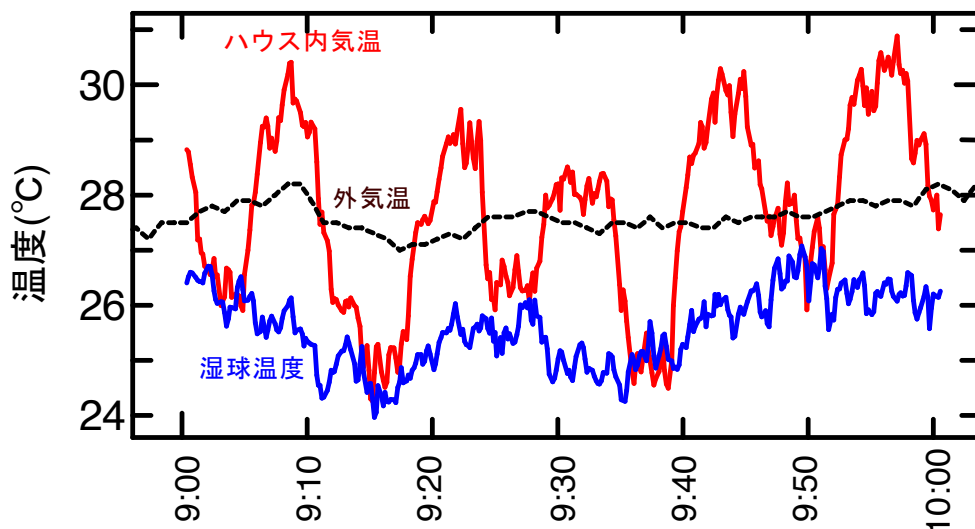


図 11 細霧システムの自動運転による短期的な冷却性能  
2012年7月4日における測定結果

2012年7月上旬から9月末までの間、同システムを連続運転した結果を図 12 に示す。ハウス内の平均気温を外気温並みかやや低い温度に抑える効果があったことがわかる。

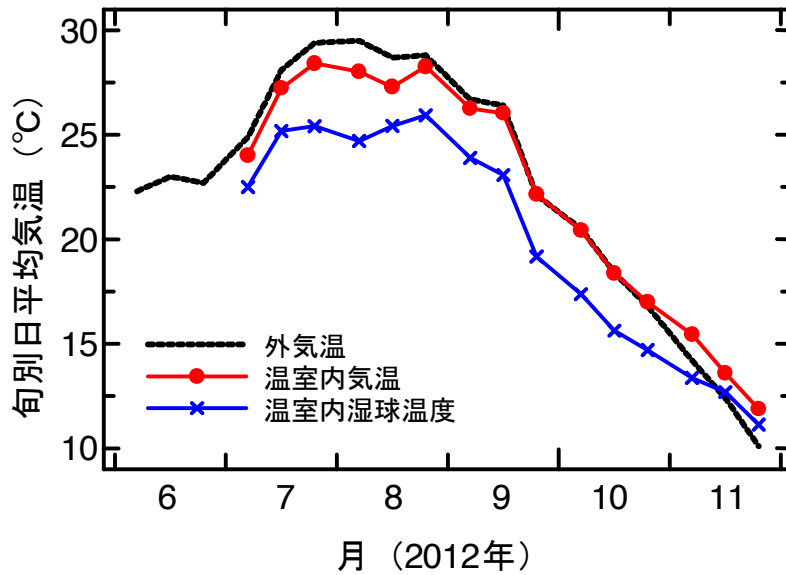


図 12 夏秋季における日平均気温の制御結果

#### 4. 中山間地域の夏秋トマトにおける導入効果

山口県の夏秋トマト産地である山口市阿東町(標高約 400m)の生産者圃場において実施した現地試験の結果を例に示す。夏秋トマトを栽培する2棟のハウス(それぞれの床面積2a)を対象に、一方のハウスを慣行(対照ハウス)、もう一方のハウスに細霧ノズル付循環扇による簡易細霧冷房システムを導入し(細霧ハウス)、ハウス内環境とトマト生育・収量への影響を調査した。供試品種は'麗夏'(栽植密度約 1,660 株/10a)が養液土耕で栽培されていた(図 13)。

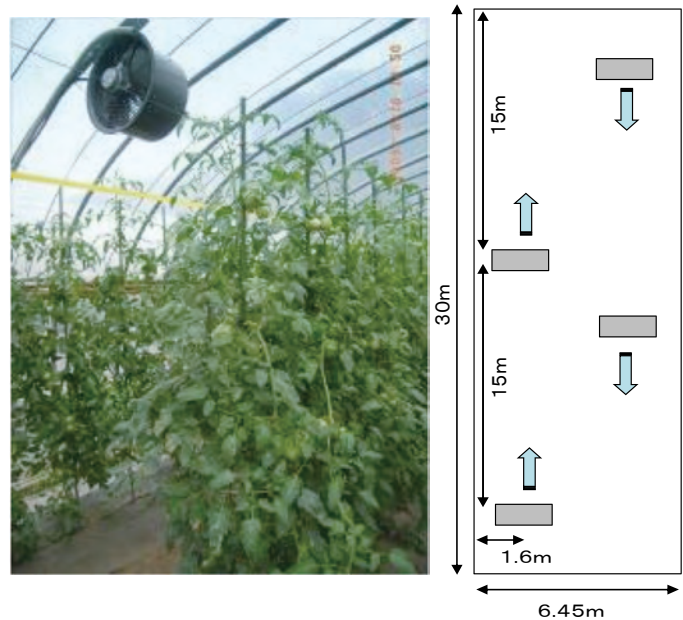


図 13 山口県における現地実証試験の様子と循環扇の配置



3年間(2010～2012年)の試験期間のうち、2010年と2012年は記録的な猛暑であった。この2年についてみると、細霧ハウスの可販果収量は、対照ハウスに対してそれぞれ15%と13%増加した(表1)。また、高温障害果の発生も少なかった。平年に比べ高温かつ日照が多い年には細霧冷房の効果は大きいといえる。

表1 夏秋トマト果実収量への効果(柴田ら、2011)

年	処理	トマト可販果収量(t/10a)		
		7～8月	9～11月	合計
2010	細霧	6.10	6.04	12.14
	対照	4.54	6.05	10.59
2011	細霧	6.77	6.70	13.46
	対照	6.70	6.17	12.87
2012	細霧	7.36	6.86	14.22
	対照	6.48	6.10	12.58

この結果から、床面積を10aとするとこのような高温年が3年あれば、ほぼシステムの初期導入費用を回収できると推察される。協力いただいた園主に聞き取り調査を実施したところ、細霧冷房の利点として以下の点が挙げられた。トマト管理のため、日中ハウスに入らざるを得ない場合があるが、細霧冷房があることにより、①涼しくて作業が楽になる、②果実の歩留まりがよくなった、③場所により一時的な葉濡れの発生が認められたもののこれが原因となる病害などの発生は無かった、とのことである。また、システムを冷房装置としてだけでなく、晩秋期の夜間における結露抑制に循環扇を利用したい、といった提案もなされた。夏季以外の利用方法についても今後検討の余地が残されている。

## 5. システム稼働時の留意点

まず、噴霧する水の性状、水量、消費電力について留意する必要がある。以下、具体的な例を示す。

猛暑年となった2012年、香川県における調査では、最も気温の高くなった8月上旬に消費水量が最大となり、細霧ノズル付循環扇1台あたり最大0.2m<sup>3</sup>/日で

あった。7～10月の合計消費水量は8.8m<sup>3</sup>/台であった。

システム全体の消費電力量は、8月上旬に最大となり1日あたり7kWh(循環扇2台と動噴ポンプ)だった。このうち、循環扇を1日あたり7～18時の11時間運転した場合の1台あたりの消費電力量は1日あたり1.4kWhであった。このことから、8月上旬の動噴ポンプの消費電力は4.2kWh/日であったと推定された。

#### ○フィルタの洗浄

利用する水質によっては、ノズルの裏の吸入口に配置されたメッシュに土粒子などのゴミが溜まることにより、噴霧する水粒子の均一性が損なわれ、冷却性能が低下することがある(図14)。このため、定期的に洗浄する必要がある。地下水を利用するような場合、給水中の大きなゴミは、フィルタによって取り除くとよい(図14)。少なくとも月に一度、つまりシーズン中に2～3度はノズルのメッシュ洗浄と給水ホース内の通水洗浄を行うことが望ましい。冬季の間に配管内に発生するヘドロは、翌夏季、システムの稼働前にノズルを取り外して通水し洗浄すればよい。

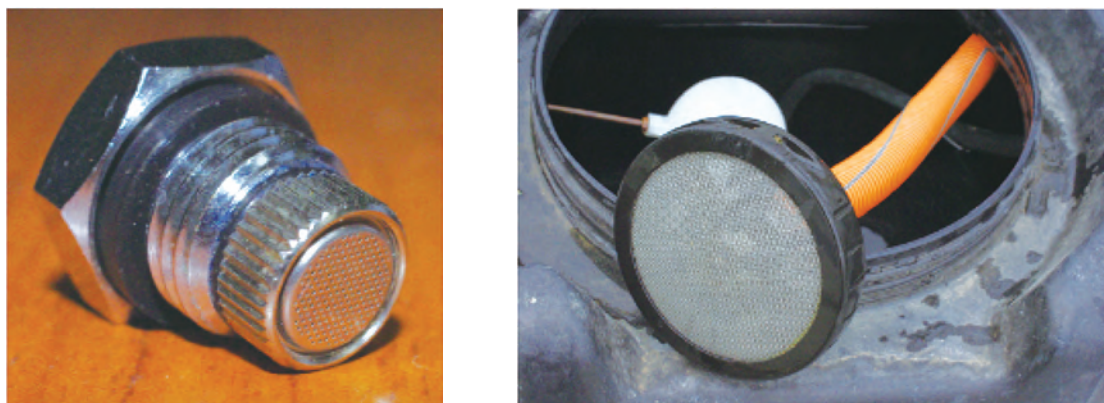


図14 噴霧ノズルの吸入口に配置されたメッシュ(左)と給水タンクに設置された動噴ポンプの吸水口のフィルタ(右)

#### ○センサのメンテナンス

温度センサが格納された通風筒がハウス内のちりやほこりを吸い込むため、脱脂綿や蒸留水が汚れ湿球温度計の感部で水切れを起こすことがある。特に、土耕栽培の場合には通風筒の吸気口にフィルタを置くとよい。また、少なくとも2週間～1ヶ月おきに脱脂綿や蒸留水の交換を行うことにより水切れを防ぐ。

## 資料： 導入コストとパーツリスト

メーカーは、床面積 10aの温室における細霧ノズル付循環扇の必要台数を 12 台としている。これから 10aあたりの導入コストを試算すると、動噴ポンプや給水タンクなど必要な部材の費用は約 80 万円となる(表2)。一般的な細霧冷房システムが約 100～150 万円/10a(林、2006a)であることから、導入コストは比較的安価である。また、既存のパイプハウスへの後付けも容易であることから、中山間地域の小規模ハウスにおいても十分導入が可能である。

なお、噴霧コントローラは、商品化されていないが、市販の汎用品を用いて組み立てることができる(図 15)。参考として、パーツリストを図 15 に、配線図を図 16 にそれぞれ示す。

表2 10aあたりの簡易細霧冷房システム導入コスト

品目	価格(円)
MHC-2100	360,000
動噴ポンプ、給水タンク	152,000
配管、配管資材	200,000
噴霧コントローラ	85,000



品目	型式(オムロン)	数量
シーケンサ	CP1W-TS101	1台
センサユニット	CP1L-L14DR-A	1台
白金抵抗体温温度センサユニット	R52-P10AE	2セット
プラボックス		1台
その他(リレー、ブレーカー、端子台など)		

図 15 噴霧コントローラ内部の構成と構成部品のパーツリスト

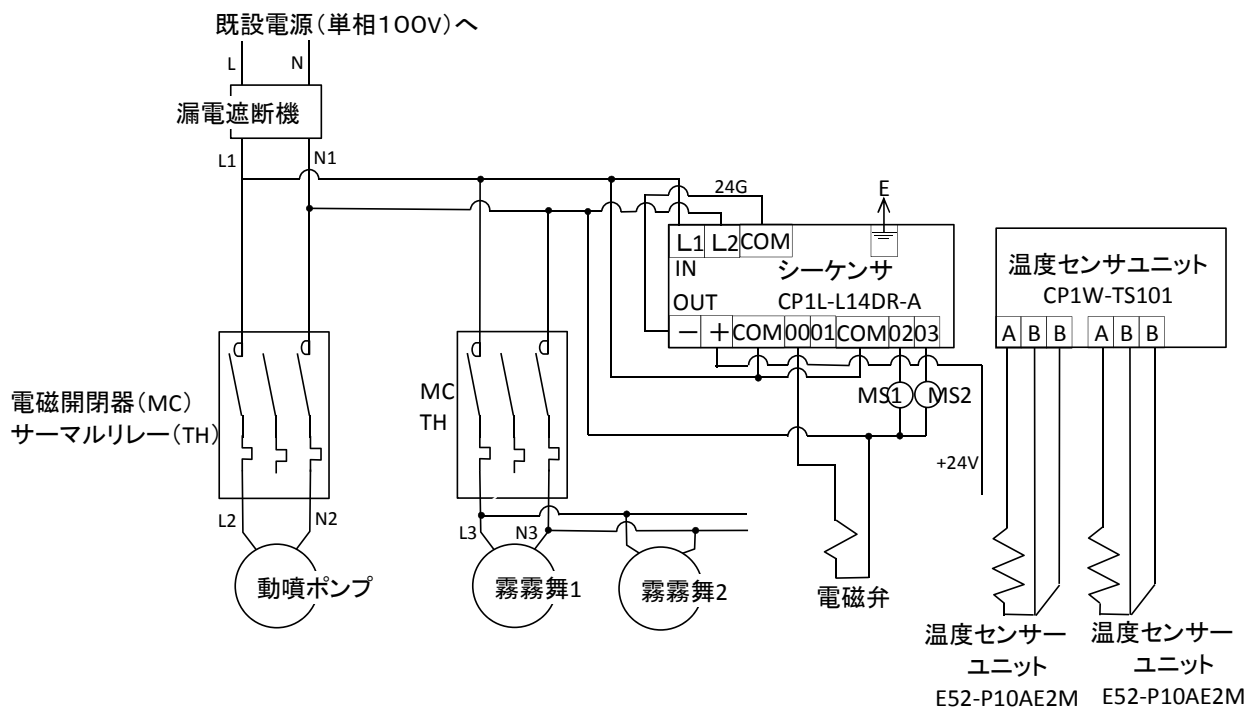


図 16 構成部品の配線例

## 参考文献

- 柴田(2011) :地球温暖化が農林水産業に及ぼす影響評価と緩和及び適応技術の開発、研究成果第 483 集(農林水産技術会議事務局編)、346-350
- 柴田ら(2011):細霧ノズル付循環扇を用いた中山間地域向け低コスト細霧冷房システム、平成 23 年度成果情報、  
[http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/warc/2011/141c0\\_10\\_04.html](http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/warc/2011/141c0_10_04.html)
- 林(2006a) :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
- 林ら(2006b):細霧冷房運転支援ソフト、  
<http://www.vector.co.jp/soft/dl/win95/business/se390858.html>

問い合わせ先:

柴田 昇平

(現 農研機構九州沖縄農業研究センター 生産環境研究領域 )

E-mail : shibata@affrc.go.jp

Tel : 096-242-7766

**細霧ノズル付循環扇を用いた中山間地域向け  
簡易細霧冷房システムの利用法**

平成 27 年9月 30 日発行

中課題 141c0

「日本型日光温室等の活用による温暖地における高収益・安定生産施設園芸技術の開発」における成果







## 細霧ノズル付循環扇を用いた中山間地域向け 簡易細霧冷房システムの利用法

平成 27 年9月 30 日発行

発行責任者:柴田昇平

農研機構近畿中国四国農業研究センター

(現 農研機構九州沖縄農業研究センター)

※農研機構（のうけんきこう）は、国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構のコミュニケーションネーム（通称）です。