

平成 30 年度・令和元年度
新品種・新技術の確立支援事業

低圧細霧冷房システムを活用した 施設果菜類の高温対策マニュアル (暫定版)



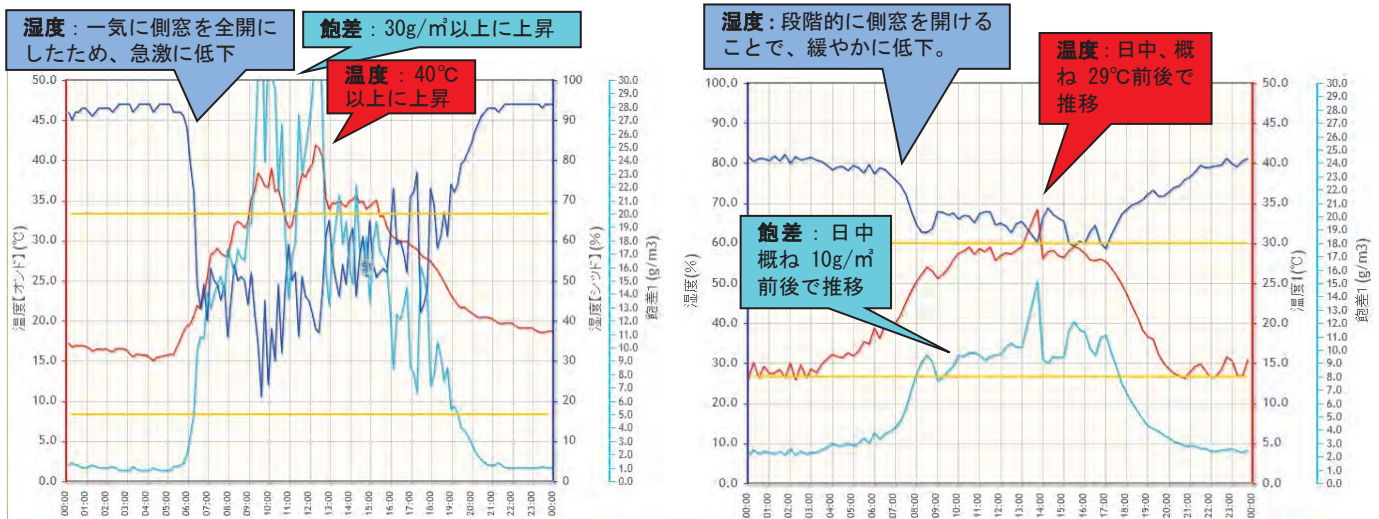
令和 2 年 3 月

富山県農業技術課

1 はじめに

- ・ 細霧冷房は、水を霧状に噴霧するノズルをハウス全体に配置し、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「蒸発冷却法」である。
- ・ 細霧冷房は、日射によってハウス内が高温となる昼間の冷却方法として効果が高く（夜間の冷却方法として不適）、またヒートポンプ等の空調機による冷房法に比べて、ランニングコストを低く抑えられる。
- ・ さらに、高温時のハウス内は、飽差[※]が上昇（相対湿度が低下）し、著しい乾燥状態となる（図1 a）が、細霧冷房により加湿することで、飽差の上昇（相対湿度の低下）が抑えられ（図1 b）、作物の光合成の維持・促進が図られる。

※飽差：飽和水蒸気量と絶対湿度の差。空気中にとどれくらい水蒸気が入る余地があるかを示す。空気が乾燥すると数値が上昇。飽差が上昇すると、作物は体内の水分を保持するために気孔を閉じ、CO₂の取り込みが停止して、光合成量が低下する。光合成を促進するためには、9 g/m³以下（最適値：3～6 g/m³）を目標に管理することが重要とされる。



a 一般的な管理のハウス（細霧冷房なし）

b 環境制御実施ハウス（細霧冷房あり）

図1 高温日（R 1.5.25）のハウス内環境の比較

- ・ しかし、細霧冷房は、適切に使用しないと、十分な冷房効果が得られなかったり、相対湿度が高い状態や作物が濡れた状態が長時間続き病害の発生につながる。
- ・ また、ハウス内の環境は、天候の影響により、急変しやすく、細霧の噴霧量の設定を、手で天候の応じてこまめに切り替えることは現実的ではない。
- ・ 細霧粒径が細かい（30 μm 以下）高圧細霧冷房システム（図2）と飽差を自動制御できる飽差コントローラー（図3）を導入すれば、病害発生を抑えつつ、高い冷房効果と光合成促進効果を発揮することが可能だが、これら装置の導入には多額のコストが必要となる。
- ・ そこで、「新品種・新技術の確立支援事業」（平成30年度～令和元年度）により、導入コストが比較的安価な「低圧細霧冷房システム」を活用した高温対策について実証したので、実証で把握できた対策の効果や効果向上のポイントについて紹介する。



図2 高圧細霧冷房システム



図3 飽差コントローラー

（クールミスティ（福栄産業㈱製））

（株式会社ニッポー製）

2 実証に使用した低圧細霧冷房システム

■クールネットプロ(ネタフィム社製) (図4)

- ・ 細霧粒径：平均 65 ミクロン(水圧 4.0bar)

モデル	ノズル色	噴霧量 (ℓ/時)	ノズルサイズ (mm)	推奨作動水圧 (bar)
055	ライトグリーン	5.5	0.51	4.0～5.0
075	シルバーグレー	7.5	0.61	4.0～5.0

- ・ ノズル交換によって容易に散水量、散水範囲を変更できる。
- ・ 4方向型散霧(止水用プラグで1～3方向散霧も可)
- ・ ブリッジのないデザインでばた落ちを軽減
- ・ 噴霧間隔・噴霧時間・噴霧開始・終了時刻を設定する「細霧冷房コントローラー」が必要。
- ・ 導入コスト(目安)：85,000 円/300 m² (細霧冷房コントローラー(約 50,000 円) 除く)



図4 クールネットプロ
細霧ノズル

3 実証で把握できた低圧細霧冷房システムの効果と課題

県内3か所の実証のうち魚津市の実証結果(品目：トマト(大玉)、作型：半促成栽培)をから、低圧細霧冷房システムの効果と課題を示す。

【効果①】冷房効果、飽差上昇(相対湿度低下)抑制効果

- ・ 令和元年5月の平均気温は、上旬が 15.3℃(平年差△0.4℃)で平年並みだったが、中旬が 18.0℃(同+1.9℃)、下旬が 20.2℃(同+2.5℃)と高かった(AMeDAS、地点：魚津)。
- ・ この間、細霧冷房のない慣行区では、ハウス内の日最高気温が 32℃以上の日は4日あり、飽差の日最高値が 20g/m³以上(露地では稀にしか観測されない高い状態)の日は6日あった。
- ・ 一方、低圧細霧冷房システムを使用した細霧区では、ハウス内の日最高気温が 32℃以上の日は2日あり、飽差の日最高値が 20g/m³以上の日は1日のみであった。
- ・ また、慣行区の相対湿度の日最低値が 26～27%と著しく乾燥した日(5月25、30日)でも、細霧区の相対湿度は慣行区より 8～9%高かった(図5)。

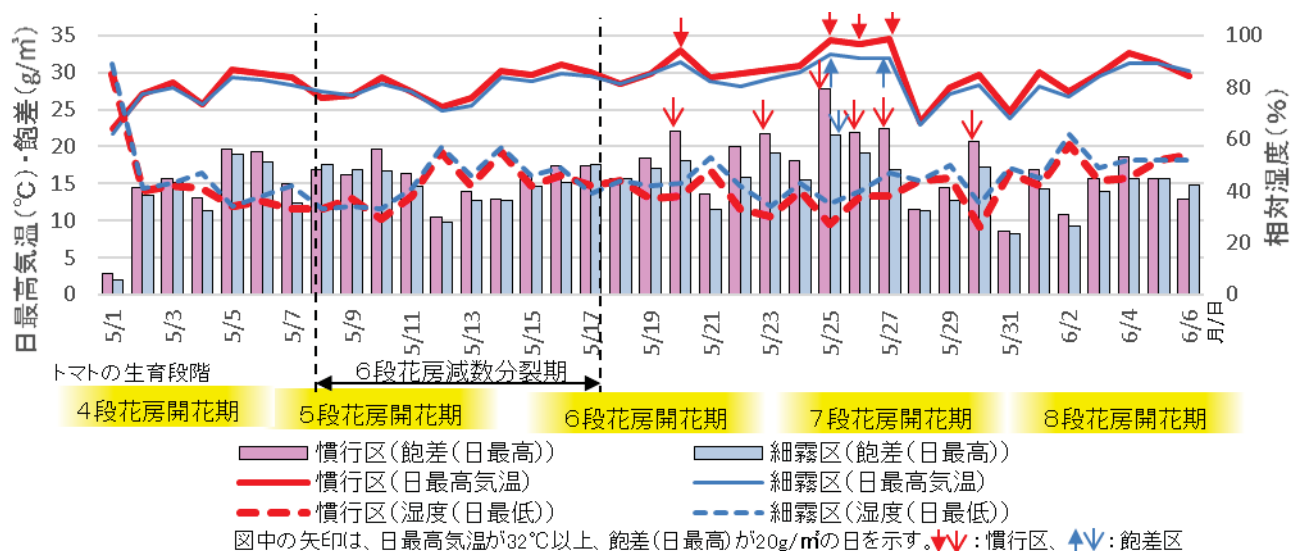


図5 日最高気温・飽差(日最高)、相対湿度(日最低)の推移(魚津市、R1.5.1～6.6)

【参考】蒸発冷却法の理論的冷却可能温度

- ある空気を相対湿度が100%になるまで加湿すると、乾球温度（気温）は、湿球温度度（相対湿度が100%となる温度）に等しくなる。
- 相対湿度が100%になるまで加湿した場合に冷却可能な温度は、湿り空気線図（図6）を用いて導き出すことができ、例えば、日中のハウス内の気温が35℃、相対湿度が60%であった場合（図6 a）、この空気の状態から細霧を噴霧し、相対湿度が100%になるまで加湿すると（同 b）、ハウス内気温は26℃まで冷却することができることがわかる（同 c）。
- 理論的には、ハウスの換気量を無限大に増大することで、外気の湿球温まで低下させることが可能であり、本県の7、8月の平均日中湿球温度は24℃である（図7）。

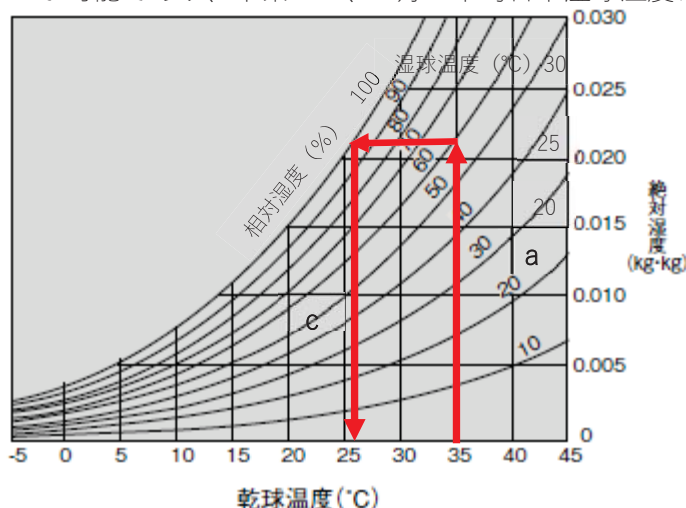


図6 湿り空気線図

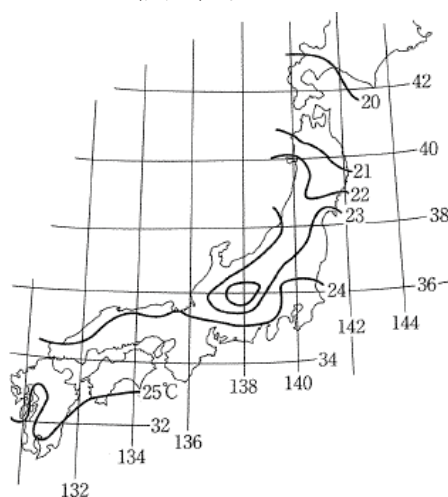
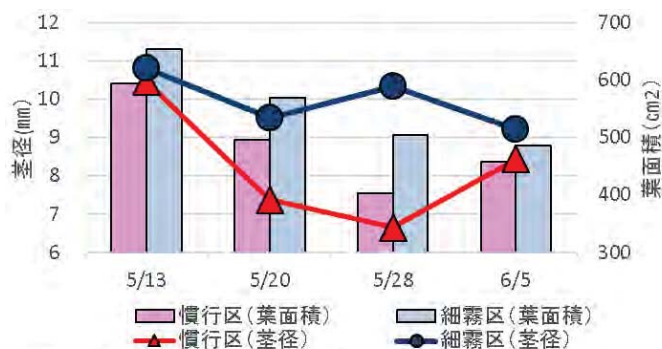


図7 各地の7、8月の平均日中湿球温度（三原、1972）

【効果②】草勢維持・収量安定化効果

- 施設果菜類の栽培において、安定的な収量・品質を確保するためには、適正な草勢と目標とする葉面積を維持することが不可欠である。
- 草勢の判断指標である茎径は、大玉トマトでは10～12mmが適正とされ、草勢が低下すると茎径は細くなる。
- 慣行区の茎径は、5月20日以降、7mm前後と細くなり、草勢が急激に低下した。完全展開葉（生長点から50cm下）の葉面積は、細霧区に比べて小さくなった。
- 一方、細霧区の茎径は、5月20日以降も10mm前後で推移し草勢が維持された。完全展開葉（同上）の葉面積は慣行区ほどの減少は見られなかった（図8）。
- この草勢と完全展開葉の葉面積の違いは、細霧冷房による加湿によって飽差の上昇が抑制され、慣行区に比べ細霧区の光合成量が多くなったためと考えられた。
- 草勢が維持され、葉面積が大きかった細霧区では、慣行区に比べて、5月中旬以降、6段花房を除く全ての花房で、平均果重が大きくなり、収量は55%多くなった（表1）。



茎径：生長点より15cm下の長茎をノギスで計測
葉面積：生長点より50cm下の葉（完全展開葉）の葉長と葉幅の計測値からの推計

図8 茎径・葉面積の推移（魚津市、品種：アニモTY-12）

表1 収穫調査(魚津市)

	収穫果数			平均果重			収量		
	細霧区	慣行区	a/b	細霧区	慣行区	a/b	細霧区	慣行区	a/b
	a	b		a	b		a	b	
	(個/株)	(個/株)	(%)	(g/個)	(g/個)	(%)	(g/株)	(g/株)	(%)
4、5、7、8段花房	18.3	16.3	112	151	109	138	2,755	1,774	155
6段花房	4.0	4.3	93	70	91	77	280	392	71

【課題】落花の原因となる気温・湿度の急激な変化の防止対策

- ・ 細霧区では、日最高気温が 32℃を上回る日が慣行区よりも少なく、草勢や収量の向上効果は認められたものの、慣行区と同様に 5～6 段花房で落花の発生が目立ち、特に 6 段花房では、慣行区よりも落花が多く、着果した果実に发育障害も見られた(図 9)。
- ・ トマトの花蕾は、開花の 9～5 日前(減数分裂期)が最も高温抵抗性が低いとされ(高橋、1964)、6 段花房開花期は 5 月 16～22 日で、その 9～5 日目の 5 月 7～17 日は 32℃以上の高温日が見られず、6 段花房の落花と果実の发育障害は、高温以外の要因が関係していると考えられた。
- ・ そこで、落花等の要因を明らかにするため、複合環境制御装置を備え、落花の発生のないハウス(環境制御区、富山市)と今年度試験した慣行区・細霧区(魚津市)の 5 月 15 日のハウス内環境を比較したところ、慣行区・細霧区では、気温が 6:00～8:00 の 2 時間で 9℃以上上昇するとともに、相対湿度が 6:00～9:00 の 3 時間で 30%以上も低下する急激な温・湿度変化が生じていた(図 10)。
- ・ 一方、環境制御区では、その変化は小さく、同様な変化は、5 月 14～16 日にも発生していた。
- ・ このことから、6 段花房の落花と果実の发育障害の要因は、「短時間の中での気温・相対湿度の急激な変化」と推測された。
- ・ 落花の発生を防止するためには、①細霧冷房により日中の気温を 32℃以下に下げただけでなく、②日の出前からの緩やかな加温や遮光等により、気温の急上昇を防ぐ、③細霧冷房の稼働開始を早めたり、段階的に側窓を開ける緩やかな換気により、湿度の急低下を防ぐ、④高温に強い品種の活用(「麗月(れいげつ)」等)等の対策が必要と考えられた。

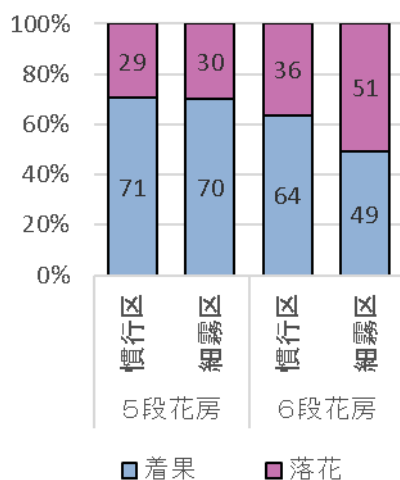


図9 5～6段花房における落花の発生割合(魚津市、調査日: R1.5.20)

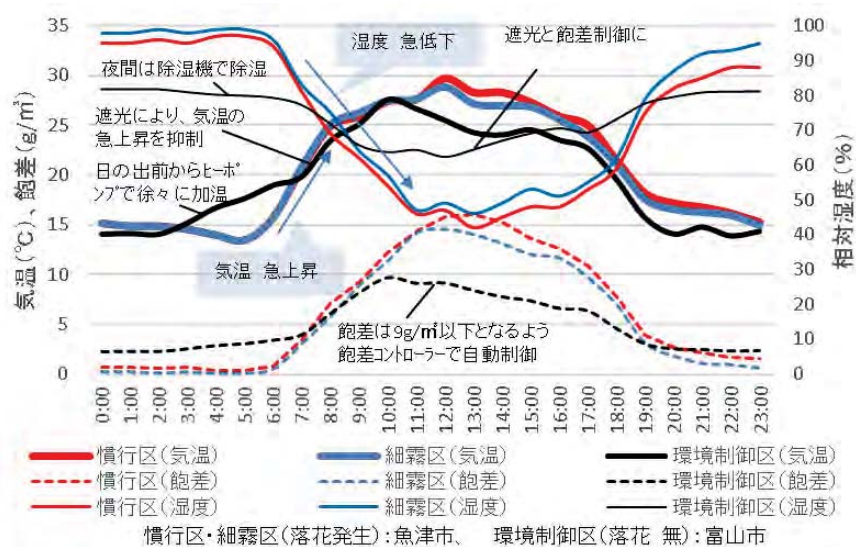


図10 ハウス内環境の比較(R1.5.15)

3 効果向上のポイント

(1) 噴霧ノズルは、できるだけ高い位置に取り付ける。

- ・ 噴霧ノズルの取付位置が低く、作物との距離が短いと、噴霧した細霧は気化する前に、作物の高さに降下し、作物を濡らしてしまう（図 11 右、図 12）。
- ・ 噴霧ノズルは、細霧が作物の高さに降下する前に気化するように、できるだけ高い位置に取り付ける（図 11 左）。

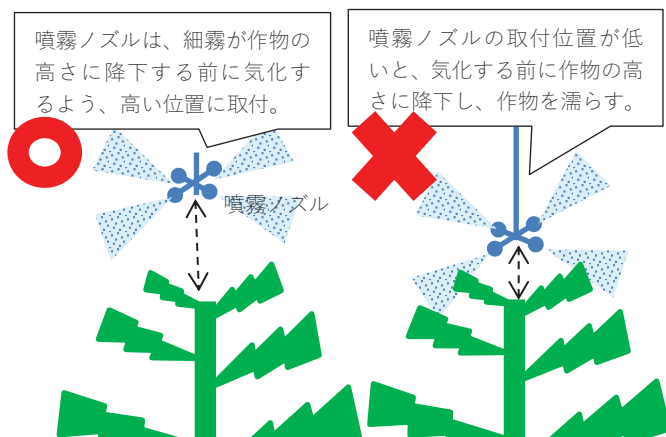


図 11 噴霧ノズルの適切な取付位置（左）と不適切な取付位置（右）



図 12 噴霧ノズルの取付位置が不適切な事例

(2) 換気量を増やす。

- ・ 換気扇や天窓（図 13）、空動扇（図 14）等を活用し、換気量を増やす。



図 13 換気扇と天窓

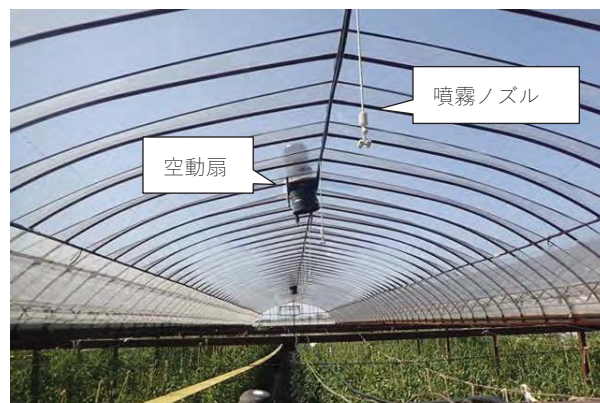


図 14 空動扇

■空動扇の特徴

- ・ 天窓や換気扇が装備されていないハウスでも、容易に設置可能な換気扇。
- ・ ビニールハウス内の温度が設定温度より上昇すると開閉弁が自動で開き、上昇気流により回転部（ベンチュレーター）から排熱される。
- ・ 設定温度以下に下がると開閉弁は再び閉じる。
- ・ ソーラーパネルつきベンチュレーターを備えた「空動扇ソーラー」は、無風時でも回転部が回転し、換気できる（図 15）。

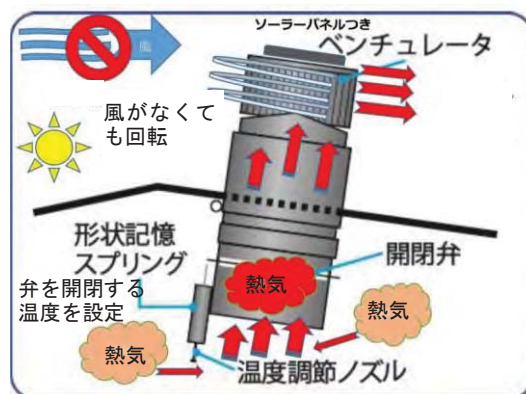


図 15 空動扇ソーラーの仕組み

(3)十分な噴霧量を噴霧する。

- ・ 噴霧量が少ないと、冷房効果・飽差上昇抑制効果は得られない。
- ・ 目標気温まで低下させるための時間あたりの噴霧量（噴霧速度）の算定にあたっては、フリーソフトの「細霧冷房運転支援ソフト」（図 16）を活用できる。

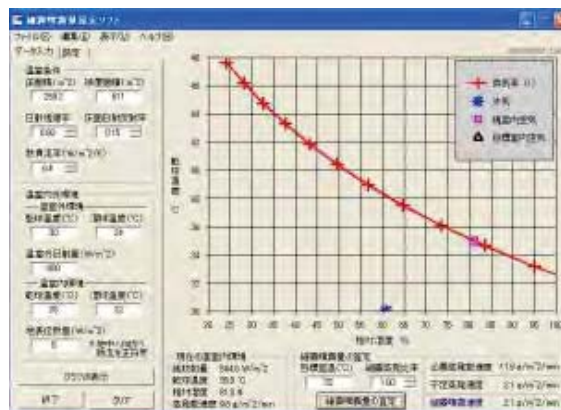


図 16 細霧冷房運転支援ソフト

(4)環境モニタリング等により、目標範囲で管理できているか確認する。

- ・ 環境モニタリング装置（図 17）等を活用し、設定した噴霧量により気温、飽差、相対湿度が目標範囲で管理できているかを確認する。

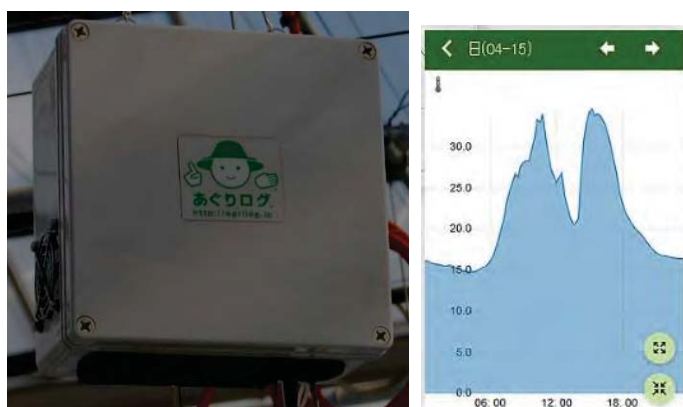
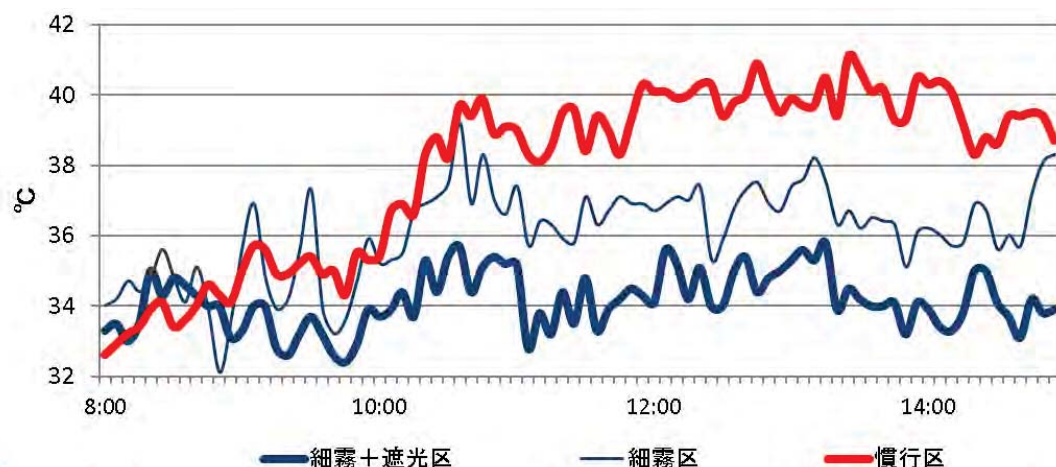


図 17 環境モニタリング装置
(左：センサーボックス、右：モニタリング画面)

(5)気温が著しい高温となるハウスは、細霧冷房に加え、遮光も行ふ。

- ・ 富山市の実証ほでは、慣行区の最高気温が 40℃を上回る日でも、細霧冷房のみの区で 36℃前後に、細霧冷房と遮光を組み合わせた区で 34℃前後まで気温が低下した（図 18）。
- ・ 気温が著しい高温となるハウス（連棟ハウス、換気量が少ない等）では、遮光ネットをハウス上面に展張し、温度上昇を抑制する。



ハウス構造: 丸屋根型鉄骨補強ハウス・連棟(間口5.4m×11棟)、換気: 側窓、谷窓、細霧冷房+遮光区の遮光資材: 青天井栽培品目: 大玉トマト(半促成栽培)、細霧冷房: 1回あたりの噴霧時間10秒、噴霧間隔2分、処理時間8:00～15:00

図 18 連棟ハウスでの高温日(H30.7.21)のハウス内気温の比較(富山市)

(6)温度センサーつきタイマーバルブ(DoValve)を活用し、相対湿度に応じて噴霧を制御

- ・ ハウス内環境は天候の影響を大きく受け、例えば晴天を見込んで噴霧時間を長くしたが、午後から天候が急変して曇天となり、相対湿度が上がりすぎる場合などがある。
- ・ 温度センサー付きタイマーバルブ (DoValve) を活用 (図 17) することで、ハウス内の相対湿度の変化に応じた噴霧時間の制御が可能となり、天候の変化にも対応できる。
- ・ DoValve の設定については、表 2 を参考に相対湿度 (温度センサー②と温度センサー①の差) に基づき噴霧時間と噴霧停止時間が切り替わるよう設定する。

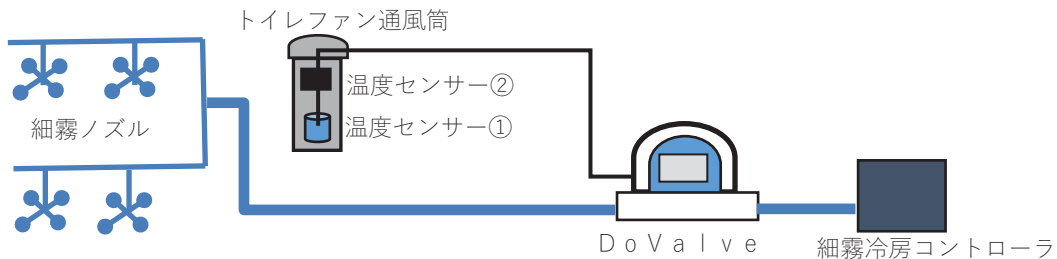


図 17 温度センサーつきタイマーバルブを活用した低圧細霧冷房システムの構成

■DoValve (温度センサー付きタイマーバルブ、T & D社製) (図 18)

- ・ 無線通信機能を搭載し、スマートフォンの専用アプリで曜日・時間・散水間隔を設定できる。
- ・ 温度センサーが2つあり、2つのセンサーの差の大きさによる散水間隔の制御が可能。
- ・ 電池駆動のため電源や制御盤は不要。

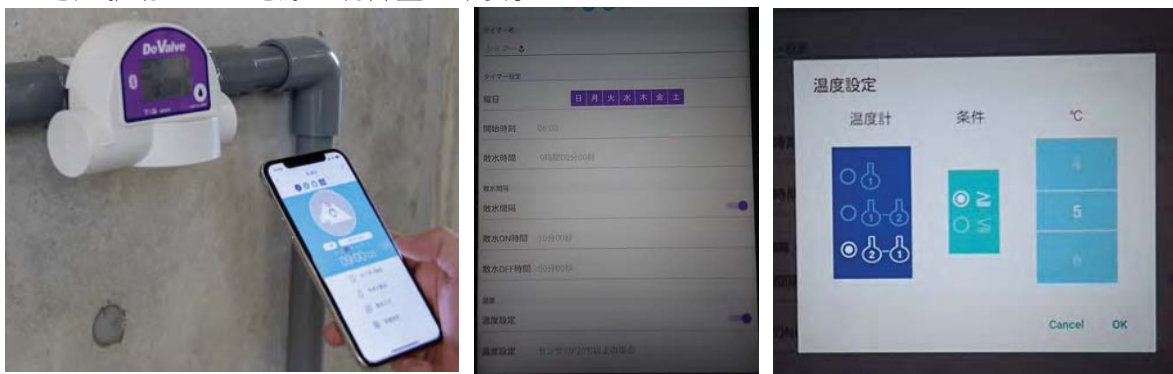


図 18 DoValve (左：設置・設定の様子、中：噴霧時間の設定画面、右：温度設定画面)

■温度センサー①② (図 19)

- ・ DoValve には、2点 (①②) で温度を測定できる温度センサーが付属している。
- ・ 温度センサー①は、ガーゼを巻き付け、水に浸し、湿球温度を測定する。
- ・ 温度センサー②は、トイレファン通風筒内に設置し、気温 (乾球温度) を測定する。



図 19 温度センサー

■トイレファン通風筒「NIAES-09」（独立行政法人農業環境技術研究所開発）（図 20）

- ・ ハウス内では、風がほとんどないため、強い日射を受け、気温が実際より高めに計測されてしまう。
- ・ トイレファン通風筒「NIAES-09」は、ハウス内でも正確な気温を計測するために開発された自作可能な強制通風筒。
- ・ 既製の建築用資材をほぼそのまま組み立てた簡易な構造で、材料費は設置用金具を含めて2万円以下。
- ・ 建築資材を活用した低コスト強制通風筒「NIAES-09」の製作法（PDF）
⇒ <http://www.agrmet.jp/sk/2011/A-3.pdf>
- ・ 温度センサー①②を通風筒内に固定する。



図 20 トイレファン通風筒「NIAES-09」

表2 D o V a l v e の設定の目安

気温 (℃)	気温(温度センサー②)と湿球温度(温度センサー①)の差(℃) (表中は相対湿度(%))										
	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10
35	100	93	87	81	75	69	64	59	54	49	44
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
噴霧時間 停止時間	噴霧なし			噴霧5秒 10分停止				噴霧6秒 5分停止			噴霧8秒 3分停止

相対湿度の最適値