

水の潜熱を利用した根圏および地上部冷却による施設生産における作物生育環境の改善に関する研究[†]

安場 健一郎

(平成 21 年 11 月 5 日受理)

Improving Environmental Conditions in a Greenhouse by Cooling the Air and the Root Area Using Latent Heat

Ken-ichiro Yasuba

目 次

I 緒 言	211	2 換気率計算ノードの開発	242
II 通気防水性資材を利用した湛水冷却法の特性評価	213	3 総合考察	247
1 通気防水性資材の冷却効果と酸素供給能力	214	4 摘 要	247
2 通気防水性資材表面の風速が水温に及ぼす影響	217	V トマトの生育環境改善のための細霧噴霧と換気の協調制御手法の開発	247
3 総合考察	221	1 気温湿度同時制御のための細霧噴霧と換気との協調制御手法の開発	248
4 摘 要	221	2 冷却のための細霧噴霧と換気との協調制御手法の開発	252
III 通気防水性資材を利用した根圏冷却による高温期のハウレンソウの生育改善効果	221	3 細霧等を利用した複合環境制御が長期多段栽培での生育と収量に及ぼす影響	256
1 通気防水性資材による培養液への酸素供給と培養液温低下が生育に及ぼす影響	222	4 総合考察	264
2 培養液冷却装置の温室内での冷却特性と生育に及ぼす影響	228	5 摘 要	265
3 地床栽培での通気防水性資材を利用した根圏冷却法の開発	230	VI 総合考察	265
4 総合考察	235	引用文献	266
5 摘 要	237	Summary	269
IV 自律分散型環境制御システムを利用した温室の換気率等のモニターリング手法の開発	238		
1 データ収集・スケジュール管理ソフトウェアの開発	239		

I 緒 言

わが国の夏期の気温は多くの作物にとって適温以上で、生育に悪影響を及ぼす。特に、ハウス内が高温となる施設園芸では影響が大きい。気象庁のデータでは 2004~2008 年 8 月の東京での日平均気温は 27.7℃、最

〒470-2351 愛知県知多郡武豊町南中根 40-1
高収益施設野菜研究チーム

[†] 本論文は京都大学農学博士課程論文(平成 20 年 4 月)をもとに作成した。本報告の一部は、生環調 41, 171-178 (2003); 生環調 42, 123-130 (2004); 園学雑 75, 109-115 (2006); 植物環境工学 21, 162-168 (2009)で公表した。

高気温は31.5°Cである。30年前に比べてそれぞれ1°Cおよび0.9°C上昇しており、近年、夏期の高温が問題となる頻度が増えている。巽ら(1970)は10種類の野菜で光合成と気温との関係を調査し、比較的低温性の作物であるイチゴ、ハクサイ、カブ、レタスだけではなく、ナス科の果菜でも気温が30°C以上ではCO₂同化速度が低下し、35°Cを超えると著しく低下することを報告している。鳥生ら(1982)も、トマトでは25°C、キュウリやメロンでも30°C付近をピークにそれ以上の気温では光合成速度が低下することを報告している。夏期の高温は光合成速度の低下以外にも、花粉稔性の低下(鈴木ら, 2008)、着果不良(Sasakiら, 2005)、裂果(野村ら, 2005; 鈴木ら, 2005; Wadaら, 2006)など様々な園芸生産上の問題を引き起こす。そのため、多くの園芸作物で夏期の作型には高温対策が必要である。

施設栽培の高温対策として実施または検討されている冷却法は、冷却の対象を温室全体とするか根圏のみとする方法に分類でき(林, 2003)、さらに、それぞれをヒートポンプ、潜熱、地下水を利用した方法に分類できる。

まず、根圏の冷却について述べる。根圏の温度と植物の生育との関係を明らかにする研究は古くから実施されている(Went, 1944; 堀ら, 1968)。生育適温を超える高気温下で起きる生育抑制を根圏冷却によって軽減できる場合があり、多くの作物で根圏冷却の利用が検討されている(Diaz-Perezら, 2002; 土井ら, 1999; Gosselinら, 1983; 林ら, 1999; Heら, 1997; Heら, 2001; Hicklentonら, 1987; 稲本ら, 2003; Leeら, 1995; 本図ら, 1995; 森口ら, 1990; 佐藤ら, 2004; 佐々木ら, 1989; Thompsonら, 1998; 上田ら, 1998; Xuら, 2002; Yeagerら, 1991; 吉田ら, 1987)。ヒートポンプを利用した地中冷却技術はアルストロメリアで実用化されており(大平, 1995)、単位面積当たりの収益性の高い園芸作物では、今後も導入が進むと思われる。地下水を利用した冷却(松岡ら, 1992; 佐藤ら, 2004)も、豊富な地下水が得られる立地条件では有効な方法である。潜熱を利用した冷却法は、水が蒸発する際に必要なエネルギー(20°Cの場合2.45 kJ・g⁻¹)を利用した冷却法で、空気の飽差を利用するため、冷却自体にコストがかからないという特長があり、一部で普及が進みつつある。潜熱を利用した根圏冷却の例には、イチゴの紙ポット育苗技術がある(荒木, 2006)。紙ポットを通して水が蒸発し潜熱が奪われ、ポリポットを用いた場合と比べて8°C程度地温が低下すると報告されている。さらに、紙ポットに送風処理すると根圏の冷却効果が大きくなり、花芽分化

が促進される。イチゴの高設栽培では、水を含ませた不織布から水が蒸発する際の潜熱を利用した根圏冷却法が開発されている。冷却区と無処理区との培地温の差は屋外日射量に比例して大きくなり、冷却により出蕾時期が早まると報告されている(高市ら, 2000)。以上のように、潜熱を利用した根圏冷却が園芸生産上有益であることを示す報告例はあるが、具体的な冷却限界温度や効率的な冷却方法に関しては十分に検討されておらず、地床栽培に利用する試みもなされていない。そこで本研究では、湛水を潜熱によって冷却して、利用する方法を試みた。湛水を利用することで、比熱が大きく投入された熱に対する温度変化が小さいという水の性質を活用でき、流体であるため対流による熱伝達も利用できる。水は通常水面からしか蒸発しないが、通気性と防水性を併せ持つ資材(通気防水性資材)を養液栽培の水槽に利用することで、蒸発面を水面以外にも設定することができ、根圏冷却装置を作製する上での自由度が高まる。

II章では通気防水性を備えた多孔質フィルムを水槽資材に利用した場合の冷却特性を明らかにした。多孔質フィルムは気体を透過させるため、酸素供給能力についても明らかにした。III章では多孔質フィルムを利用した2種類の水耕装置でハウレンソウを栽培し、潜熱を利用した培養液の冷却が生育に及ぼす影響を調査し、多孔質フィルムの有用性を検証した。さらに、多孔質フィルムを利用した地床栽培で利用可能な根圏冷却装置を開発し、ハウレンソウの生育改善に有効であることを明らかにした。

つぎに、温室全体の冷却について述べる。夏期日中の1 kW・m²に達する日射の影響をヒートポンプで取り除くことは高コストなため現実的でなく、地下水による冷却も多量の地下水が利用できる場所に限定され、広範囲の普及は難しい。そのため、温室全体の日中の冷却法としては潜熱を利用した方法が最も広く使われている。潜熱を利用した方法として古くはパッドアンドファン法(Carpenterら, 1957; 中川, 1967)が利用されたが、同法には高コストである、温度ムラが生じやすいといった欠点があるため、近年は細霧噴霧装置(三原ら, 1972)の導入が進んでいる。

これまでに細霧による冷却の効果として、シクラメンでは生育促進(片岡ら, 2001)、キュウリでは収量増加(松沼, 2006)、シンビジウムでは開花促進(大澤ら, 2000)が示されている。しかし、装置を導入したものの、期待通りの冷却効果が得られず、積極的な利用をためらう生産者も少なくない。細霧の冷却効果が温室の換気に影響されることが運用を難しくしている一因である。そ

の改善策として、自然換気温室での細霧噴霧法には、タイマーや相対湿度によって制御する従来の方法ではなく、温室内外の熱収支から計算した換気率を基に噴霧量を決定する手法が開発されている (Handarto ら, 2006; Handarto ら, 2007)。より十分な冷却効果を得るには細霧噴霧時の人為的な換気制御が必要であり、換気を制御するためには温室の換気率を知ることが重要である。換気率は温室内外の熱収支より計算する方法が知られている。ただし計算には、温室内外の気温、相対湿度、日射量を測定する複数のセンサが必要となり、算出した換気率を基に噴霧と換気窓の開閉を協調制御するコンピュータが必要となる。従来は大型のコンピュータを導入した集中管理型のシステムが利用されてきたが、このようなシステムには初期投資が大きく、機器の増設が難しいなどの問題があり (林ら, 2004)、広範な普及には至っていない。近年開発された、自律分散型の環境制御システムであるユビキタス環境制御システム (UECS) (Hoshi ら, 2004) は、低コストで高機能な環境制御が可能でありながら、機器の増設も容易であり、ハードウェア、ソフトウェアともに互換性の保証された汎用システムとして普及が進みつつある。UECS は各種センサや動作機器に安価なマイコン基板を搭載し、公開された通信規格に基づいてローカルエリアネットワーク (LAN) で相互通信しながら機器が自律動作を行っており、LAN に接続したパーソナルコンピュータ (PC) から温室環境を精密に制御することが可能である。

そこで本研究ではまずIV章において UECS を利用した細霧噴霧と換気の協調動作を制御するための機器とソフトウェアを開発した。次にV章において、細霧噴霧と換気窓の開閉を協調して制御し、UECS 導入温室における高温期の効率的な冷却と、低温期の気温と相対湿度の制御を行う手法を開発した。さらに開発手法を取り入れた複合環境制御が、長期多段栽培におけるトマトの初期生育と収量に及ぼす効果を明らかにした。

本研究では、冷却の効果と特性を明確にすることなく利用されてきた潜熱による根圏冷却に関する理論を明らかにするとともに、地床栽培を対象とした根圏冷却法を新たに開発した。さらに温室内の気温上昇を効率よく抑制する環境制御法を開発し、開発技術の効果をハウレンソウとトマトの栽培で実証した。これら潜熱の利用に関する研究は、現在わが国で問題となっている高温期の園芸生産の安定化に大きく寄与することが期待される。

最後に本論文をとりまとめるにあたり、京都大学大学院農学研究科教授・矢澤進博士に、終始懇切なご指導と

ご校閲を賜った。ここに、深く感謝し、心よりお礼申し上げます。また、中央農業総合研究センター-高度作業システム研究チーム上席研究員・屋代幹雄博士、東北農業研究センター企画管理部業務推進室業務推進室長・山崎篤博士には実験遂行からとりまとめに至るまで、終始丁寧なご指導、ご校閲、ご助言を賜った。ここに深く感謝し、心よりお礼申し上げます。

本実験の遂行にあたり、実験用資材をご提供頂いた住友スリーエム社には、多大なるご協力を賜った。ここに深く感謝し、心よりお礼申し上げます。

実験の遂行にあたっては、東北農業研究センター研究支援センター、野菜茶業研究所研究支援センターの多くの職員の皆様にも多大なるご協力を頂いた。心より感謝申し上げます。

II 通気防水性資材を利用した湛水冷却法の特性評価

高温期に根圏のみの冷却で生育抑制を改善できるとした報告は多い。様々な根圏冷却法が開発されているが、地理的条件に左右されず低コストで根圏を冷却する手法としては潜熱を利用する手法が有効である。潜熱による冷却は、冷却目標温度が低い場合には利用が難しいが、空気中の飽差を利用するため、冷却自体には動力を必要としないという特長がある。

本章では通気防水性資材を用いた潜熱による湛水冷却法の特性を明らかにする。湛水を利用する目的の一つは蒸発面まで水を誘導する行程を省略し、冷却装置を単純化することにある。潜熱を利用した他の冷却法では、貯留した水を直接冷却するのではなく、冷却部位に展開している。展開する方法は細霧の噴霧や毛細管現象で水を誘導する仕組みであるが、その部分を省略する意図がある。もう一つは、水がもつ比熱が大きいという性質と、対流による熱伝達が可能という性質を利用するためである。比熱が大きいと短期間の温度変化が抑制され、制御が容易になると考えられる。また、対流によって根圏温度のばらつきを小さくできる。

通気防水性資材の不織布を水耕槽に用いて水耕槽中の培養液の水温を低下させる装置が開発されており (三尾, 1998)、通気防水性資材を通した水の蒸発によって奪われる潜熱で培養液の冷却が可能である。通気防水性資材を気相と液相の境界面に用いることで、通常水面上にしか設定できない潜熱冷却が起こる場所を、任意に設定できる。また、通気防水性資材で数 μm の穴が多数あ

たポリプロピレン製のフィルム（以下、多孔質フィルム）を水耕槽の資材とすることで、培養液に酸素を供給する装置も開発されている（山本，1986）。根圏への酸素供給は、特に高温期の養液栽培で問題となる培養液の溶存酸素濃度（DO）の低下抑制に有効と考えられる。通気防水性資材を水耕槽に利用する場合には、冷却効果のみでなく、酸素供給が作物の生育に及ぼす影響も確かめることが必要である。

ところが、上記2点の装置では構成等が示されているが、資材の冷却能力と酸素供給能力が示されていない。また、高温期から低温期に向かう作型では冷却による水温低下が栽培後期の生育を抑制する可能性があり、冷却能力を制御する装置も必要となる。そこで本章では、潜熱による根圏冷却に用いる通気防水性資材の冷却効果と酸素供給能力を明らかにした。

1 通気防水性資材の冷却効果と酸素供給能力

本節では、水槽に通気防水性資材であるポリプロピレン製の多孔質フィルムを利用し、資材を通して水が蒸発する際に奪われる潜熱による冷却効果と酸素供給能力を明らかにすることを目的とした。多孔質フィルムは太陽光が当たらない状況で長期間利用した場合の防水性が優れており、他の通気防水性資材より実験に用いる材料として適すると判断した。

a 材料および方法

1) 多孔質フィルムの利用が水温低下に及ぼす影響（実験1）

実験は2002年11月に実施した。直径82mm×高さ

100mmの塩化ビニール製で円筒状の容器を実験に使用した（図-1）。容器は外壁の一部を切り取り、後述する処理区に合わせて、不織布で表面を保護する加工を施した多孔質フィルム（プロポアTMファブリック、住友スリーエム）を張り付けた。多孔質フィルムの面積は0cm²（対照区）、53cm²（小面積区）、106cm²（中面積区）および159cm²（大面積区）とした。小、中および大面積区では容器の底部を切り取り（53cm²）、さらに中面積区では容器の側面に53cm²の穴を1カ所、大面積区では2カ所あけて、多孔質フィルムを張り付けた。容器には水温を20℃に調整した蒸留水を500mL満たし、大気との熱交換を抑制する目的で上面をポリエチレンフィルムで覆ったのち、発泡スチロール製の内蓋をはめこみ、気温を15℃（相対湿度（RH）=43~75%）および24℃（RH=60~75%）に設定したインキュベータ（CF-400、トミー精工）に移動した。実験開始から8時間後に容器の重量を測定し、実験開始時の重量との差から水の蒸発量を計算した。さらに、実験開始から8時間後の水温を測定した。実験は、多孔質フィルム面積4水準×温度2水準×ブロック2水準の乱塊法により実施し、1処理区当たり2容器を使用した。

2) 多孔質フィルムの利用がDO上昇に及ぼす影響（実験2）

実験は2002年11月に実施した。実験1で使用した多孔質フィルムの面積が異なる容器を使用した。容器に

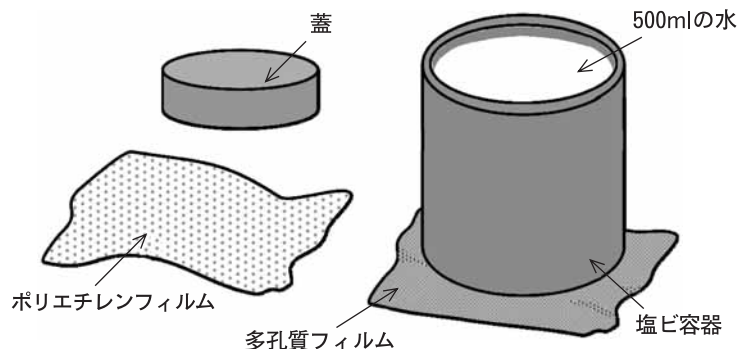


図-1 多孔質フィルムからの水の蒸発量と酸素透過量を測定する装置

多孔質フィルム面積が53cm²の場合は底面のみ多孔質フィルムを利用し、106および159cm²の処理区はそれぞれ側面に底面と同面積の穴を1および2カ所あけ、開口部分に多孔質フィルムを張り付けた。

DOを $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ に調節した蒸留水(500 mL)を満たし、空気と直接触れないようにするため水面をポリエチレンフィルムで覆ったのち、発泡スチロール製の内蓋をはめこんだ。その後、容器を気温 15°C および 24°C に設定したインキュベータに移動した。DOは、溶存酸素がほぼ飽和状態の水と沸騰させたのち急速に冷却することによって脱気した水を混合することで調整した。それぞれの処理温度で湿度条件を高湿度($\text{RH}=100\%$)と無制御($\text{RH}=49\sim75\%$, 24°C ; $74\sim80\%$, 15°C)の2段階に設定した。実験開始から2時間後に水のDOをDOメーター(F102, 飯島電子工業)で測定した。実験は、多孔質フィルム面積4水準 \times 温度2水準 \times 湿度2水準 \times ブロック3水準の乱塊法で実施した。次に、実験開始時のDOを $6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ とし、同様の実験を行った。実験期間中の湿度無制御処理におけるインキュベータ内の相対湿度は 24°C 処理では $51\sim71\%$ 、 15°C 処理では $78\sim80\%$ であった。

b 結果および考察

1) 多孔質フィルムの利用が水温低下に及ぼす影響 (実験1)

実験開始から8時間後の水の蒸発量は、多孔質フィルムの面積が大きい区ほど多くなった(表-1)。気温の比較では 24°C 処理の蒸発量が 15°C 処理より有意に蒸発量が多かった(表-2)。水温は多孔質フィルムの面積が大きいほど低くなった(表-1, 表-3)。大面積区の水温は、対照区に比べて 24°C 処理で 1.9°C 、 15°C 処理で 0.8

$^\circ\text{C}$ それぞれ低くなった。水の蒸発量と水温には有意な負の相関があり、処理温度 24°C では $\text{水温} = -0.221 \times \text{蒸発量} + 24.125$ ($R^2 = 0.8009$)、 15°C の場合には $\text{水温} = -0.0798 \times \text{蒸発量} + 16.025$ ($R^2 = 0.3322$) の関係があった(図-2)。これらのことから、多孔質フィルムを水槽資材に利用した場合の水の冷却は、水の蒸発の際に奪われる潜熱によるものであることが明らかとなった。水の蒸発量は処理温度 15°C より 24°C の方が多かった。飽差は 24°C の場合が $7.5\sim15.2\text{hPa}$ 、 15°C の場合が $3.4\sim4.4\text{hPa}$ となり、 24°C で処理した場合の方が蒸発しやすい条件であった。水の潜熱は 20°C で $2.47\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ であるため、 24°C 処理の大面積区での潜熱(蒸発量 9.4g)は約 23kJ に相当する。また、インキュベータ内に設置した乾湿計の湿球温度が、処理温度 24°C の場合に 20.8 および 20.9°C であり、最も温度が低下した大面積区の水温よりも約 1°C 低かった。湿球温度はインキュベータ内の風速での潜熱による冷却限界値と考えられ、多孔質フィルムを通した蒸発では冷却限界値より 1°C 高い程度まで冷却可能であった。

2) 多孔質フィルムの利用がDO上昇に及ぼす影響 (実験2)

実験開始から2時間後のDOの増加は多孔質フィルムの使用面積が大きい区ほど大きかった(図-3)。図-3では湿度条件を込みにして示した。実験開始時のDOが $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ の場合は、処理温度と湿度はDOの増加に影響がなく(表-4)、DOが $6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ の場合は、低

表-1 水槽資材として利用した多孔質フィルム面積と処理気温が水温低下と水の蒸発量に及ぼす影響

処理気温 (°C)	多孔質フィルム面積 (cm ²)	蒸発量 (g)	水温 (°C)
24 ^z	0	0.7±1.0 ^y	23.9±0.5
	53	3.4±0.6	23.6±0.6
	106	8.5±1.2	22.2±0.3
	159	9.4±0.7	22.0±0.3
15	0	0.1±0.2	16.1±0.2
	53	2.5±0.5	15.9±0.4
	106	6.3±1.1	15.5±0.4
	159	8.0±1.0	15.3±0.5

z: インキュベータ内の気温
y: 平均値±標準偏差

表-2 水槽資材として利用した多孔質フィルムの面積が水の蒸発量に及ぼす影響 (分散分析表)

要因	自由度	偏差平方和	分散	F値 ^z
多孔質フィルム面積 (S) ^y	3	178.0922	59.3641	95.8722***
(1次効果)	1	171.6687	171.6687	277.2427***
(2次効果)	1	1.5625	1.5625	2.5234 ^{ns}
(3次効果)	1	4.8610	4.8610	7.8504*
処理気温 (T)	1	6.3127	6.3127	10.1949*
ブロック	1	0.1332	0.1332	0.2152 ^{ns}
S \times T	3	1.5602	0.5201	0.8399 ^{ns}
誤差	7	4.3344	0.6192	
全体	15	190.4326		

Z: ns; F検定により有意水準5%で有意差なし, *; 5%水準で有意差あり, ***; 0.1%水準で有意差あり.

Y: 多孔質フィルム面積と蒸発量(ただし、平均値)との関係は、 $y = -5.52 \times 10^{-6}x^3 + 1.20 \times 10^{-3}x^2 + 7.55 \times 10^{-3}x + 0.397$ (y: 蒸発量 (g); x: 多孔質フィルム面積 (cm²)) となった.

表-3 水槽資材として利用した多孔質フィルムの面積が水温に及ぼす影響 (分散分析表)

処理	自由度	偏差平方和	分散	F 値 ^z
多孔質フィルム面積 (S) ^y	3	4.8963	1.6321	31.7901***
(1 次効果)	1	4.5125	4.5125	87.8957***
(2 次効果)	1	0.0056	0.0056	0.1095 ^{ns}
(3 次効果)	1	0.3781	0.3781	7.3652*
処理気温 (T)	1	208.8025	208.8025	4067.1096***
ブロック	1	0.1406	0.1406	2.7391 ^{ns}
S×T	3	1.2712	0.4237	8.2539*
誤差	7	0.3594	0.0513	
全体	15	215.4700		

Z: ns; F 検定により有意水準 5% で有意差なし, *; 5% 水準で有意差あり, ***; 0.1% 水準で有意差あり.

Y: 多孔質フィルム面積と水温 (ただし, 平均値) との関係は, $y = 1.54 \times 10^{-6} x^3 - 3.60 \times 10^{-4} x^2 + 1.03 \times 10^{-2} x + 19.97$ (y: 水温 (°C); x: 多孔質フィルム面積 (cm²)) となった.

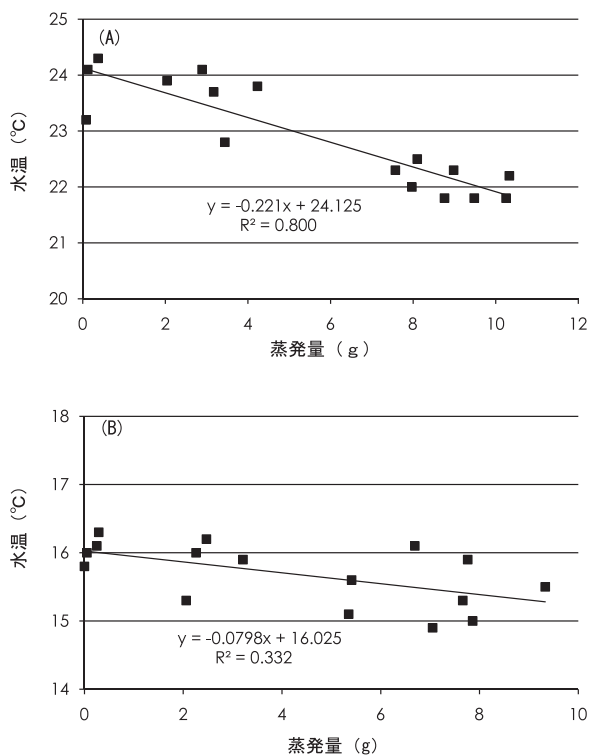


図-2 多孔質フィルムを利用した水槽からの水の蒸発量が水温に及ぼす影響

実験開始時は水温を 20°C に調整し, (A) 24°C および (B) 15°C に気温を設定したインキュベータに搬入後, 8 時間後の水温と水槽中の水の蒸発量を示した.

温もしくは低湿度下で DO の増加が有意に大きかった, 処理温度の影響は後述するように飽和時の DO が関与したと考えられる. 低湿度下では潜熱で水温が低下した

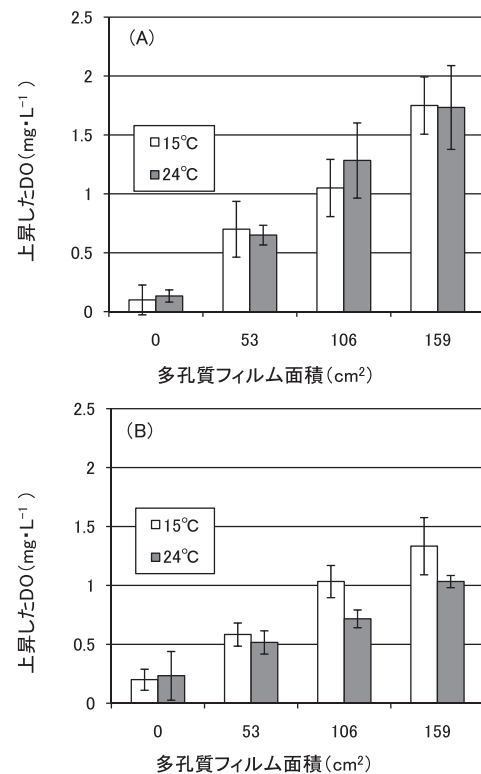


図-3 水槽資材に利用した多孔質フィルムの面積が水の DO に及ぼす影響.

DO を (A) 4 mg · L⁻¹ および (B) 6 mg · L⁻¹ に調整し, 2 時間後に増加した DO を示した. 実験時のインキュベータ内の気温は 15°C および 24°C とした.

z, y: 標準偏差 (n=2)

ことによって, 処理温度が低い場合と同じ理由により, DO の増加に影響したと考えられるが, しかし分散の値から判断して, フィルム面積や処理温度の影響に比べて

表－4 水槽資材として利用した多孔質フィルム面積が DO 上昇に及ぼす影響 (分散分析表)(実験開始時 DO を 4 mg L⁻¹ に調整)

要因	自由度	不偏分散	分散	F
フィルム面積 (F)	3	17.2950	5.7650	520.80***
処理温度 (T)	1	0.0300	0.0300	2.710ns
処理湿度 (H)	1	0.0033	0.0033	0.30ns
ブロック	2	0.5337	0.2669	24.11***
F×T	3	0.1450	0.0483	4.37*
F×H	3	0.0283	0.0094	0.85ns
T×H	1	0.0533	0.0533	4.82*
F×T×H	3	0.0350	0.0117	1.05ns
誤差	30	1.4863	0.0495	
全体	47	19.6100		

ns : F 検定により有意水準 5% で有意差なし, * : 5% 水準で有意差あり, ***: 0.1% 水準で有意差あり.

表－5 水槽資材として利用した多孔質フィルム面積が DO 上昇に及ぼす影響 (分散分析表)(実験開始時 DO を 6mg L⁻¹ に調整)

要因	自由度	不偏分散	分散	F
フィルム面積 (F)	3	6.2423	2.0808	187.97***
処理温度 (T)	1	0.3169	0.3169	28.63***
処理湿度 (H)	1	0.0469	0.0469	4.23*
ブロック	2	0.0612	0.0306	2.77ns
F×T	3	0.2706	0.0902	8.15***
F×H	3	0.0206	0.0069	0.62ns
T×H	1	0.0252	0.0252	2.28ns
F×T×H	3	0.0323	0.0108	0.97ns
誤差	30	0.3321	0.0111	
全体	47	7.3481		

ns : F 検定により有意水準 5% で有意差なし, * : 5% 水準で有意差あり, ***: 0.1% 水準で有意差あり.

かなり小さかった (表－5). 多孔質フィルムによる酸素供給量を直交多項式により計算したところ, 実験開始時の DO が 4 mg · L⁻¹ の場合は多孔質フィルム 1 m² 当たり 51 mg (2 時間) となった. DO が 6 mg · L⁻¹ の場合は, 4 mg · L⁻¹ の場合より約 40% 酸素供給量が低下した. 実験開始時の DO が 4 mg · L⁻¹ の場合, 多孔質フィルム 1 m² 当たりの酸素供給速度は, 速度が一定であると仮定すると 0.22 μmol · s⁻¹ となる. 多孔質フィルム 1 m² あたりの栽培可能個体数は III 章で示す.

実験開始時の DO が低い場合に酸素供給量が多くなった原因として, DO の飽和率が影響したためと考えられる. 溶媒として水を利用すると飽和時の溶存酸素のモル分率は以下の式で表せる (日本化学会, 1993).

$$\ln x_2 = A + B / (T / 100) + C \ln (T / 100) \quad (第 1-1 式)$$

ただし, A = -66.73538, B = 87.47547, C = 24.45264 であり, T は絶対温度, x₂ は絶対温度 T における酸素分圧 1013.25hPa 下での溶存酸素のモル分率を示している. また,モル分率 x₂ から絶対温度 T における飽和時の DO を求める式は以下の通りである.

$$DO_{sat} = M_{O_2} \cdot x_2 / (M_{H_2O} \cdot (1 - x_2) + M_{O_2} \cdot x_2) \cdot AirO_2 / 100 \cdot 106 \quad (第 1-2 式)$$

ただし, DO_{sat} は絶対温度 T での飽和時の DO (mg · L⁻¹), M_{O₂} は酸素の分子量, M_{H₂O} は水の分子量, Air

O₂ は大気中の酸素濃度 (%) を示す. ここで大気中の酸素濃度を 21% として, 水温 15°C, 24°C における飽和時の DO を求めるとそれぞれ, 10.3 mg · L⁻¹, 8.7 mg · L⁻¹ となる. 本実験で, 設定温度を 24°C とし, 実験開始時の DO を 6 mg · L⁻¹ と高めに設定すると, 実験開始時と飽和時の DO の差が小さくなり, その結果, 酸素の透過量が少なくなったと推察された. 水耕液循環経路に空気混入器を取り付けた場合 (今泉, 1974) や水耕液の循環中の酸素供給とバブリングを併用した場合 (辻ら, 1978) も DO が高い場合には DO の増加率が低下する傾向があり, 実験 2 の結果での傾向と一致した.

以上より, 多孔質フィルムを水槽資材に使用すると, 容器中の水に酸素が供給され, 潜熱により水温が低下することが確認できた.

2 通気防水性資材表面の風速が水温に及ぼす影響

多孔質フィルムを水槽資材に利用すると, 潜熱による冷却により水温が低下することを前節で明らかにしたが, 水温は蒸発面の風速にも影響されると考えられる. そのため, より効率的な冷却を実施するためには, フィルム表面の風速と水温との関係を明らかにする必要がある. そこで, 多孔質フィルム表面に異なる風速の処理を行い, 水温を低下させるために最適な風速を明らかにした.

a 材料および方法

1) 多孔質フィルム表面の風速が水温低下に及ぼす影響 (実験1)

実験には容積が3.5 L (長さ100 cm×幅5 cm×高さ7 cm) の水槽を使用した (図-4)。水槽の側面は、シリコンシーラントで表面を防水処理した厚さ2 cm の発泡スチロールで製作し、水槽底部には多孔質フィルムを用いた。多孔質フィルム部の面積は500 cm² (長さ100 cm×幅5 cm) とし、水槽底部に接するように断面積5 cm² (幅5 cm×高さ1 cm) のダクトを設けた。ダクトの一端にブロアーを接続し、送風処理を実施できるようにした。水槽には2 L の水道水を入れ、水槽の上面を発泡スチロールの蓋で密閉した。ダクト内の風向は、水槽下部のダクトからブロアーの方へ吸い込む方向とした。

送風処理の風速は、ダクトの吸い込み口の中央部で0 m・s⁻¹ (無風区)、1.2~1.5 m・s⁻¹ (微風区)、10~11 m・s⁻¹ (弱風区) および20~21 m・s⁻¹ (強風区) の4段階に設定した。まずブロアーを停止状態とし、ダクトの吸引口およびブロアーの排出口をプラスチックテープで塞いで、ダクト内を12時間無風条件とした。その後、0 m・s⁻¹ の場合を除いて、吸引口および排出口を開放し、6時間送風処理を行った。風速は熱線式風速計 (EA 743 B, Esco) で測定した。また、ダクト中央部と恒温室内の差圧を差圧計 (505-P 1, Testo) で測定した。送風処理開始時とその1時間後および6時間後に、水槽中央部 (端から50 cm, 側面から2.5 cm, 底から1 cm) の水温とダクトを通過した空気の気温をダクトの出口 (ブロアーとの接続部) で測定した。実験終了時に水槽中の水の重量を測定し、実験開始前の重量との差から水の蒸発量を計算した。送風処理期間中の恒温室内の気温は28.5~

29.3°C, 相対湿度は45.8~56.8%であった。

実験は風速4水準の1反復とし、4回繰り返した。うち1回は、水温のばらつきを調査する目的で微風区および弱風区においてダクトの吸引口から10 cm, 50 cm, 90 cm 地点の水温を30分おきに測定した。

2) 多孔質フィルム表面の送風処理と湿度が水温に及ぼす影響 (実験2)

実験1の無風区と微風区について恒温室内を高湿度 (RH=58.6~59.6%) および低湿度 (RH=31.0~33.6%) の条件として実験2を実施した。実験開始から12時間無風条件とした後、12時間送風処理を行い、処理終了後の12時間は無風条件とした。送風処理期間中の恒温室内の平均気温は両湿度条件とも29.2°Cであった。実験はそれぞれの湿度条件で、送風処理2水準とし各処理3反復で実施した。

b 結果および考察

1) 多孔質フィルム表面の風速が水温低下に及ぼす影響 (実験1)

多孔質フィルム表面へ実施した3段階の風速では水温が低下し (表-6), 多孔質フィルムの代わりに通気性の小さいポリエチレンフィルムや発泡スチロールを用いて送風処理を行った場合は水温がほとんど変化しなかった (データ略)。このことから、前節の結果と同様に多孔質フィルムを通して水槽内の水が蒸発し潜熱が奪われ、水温が低下したと考えられた。処理開始1時間後より6時間後で水温が低くなった。6時間後の水温は最も風速が小さい微風区が最も低く、無風区より3.9°C低くなった。無風区では6時間後も水温の変化はごくわずかであった。

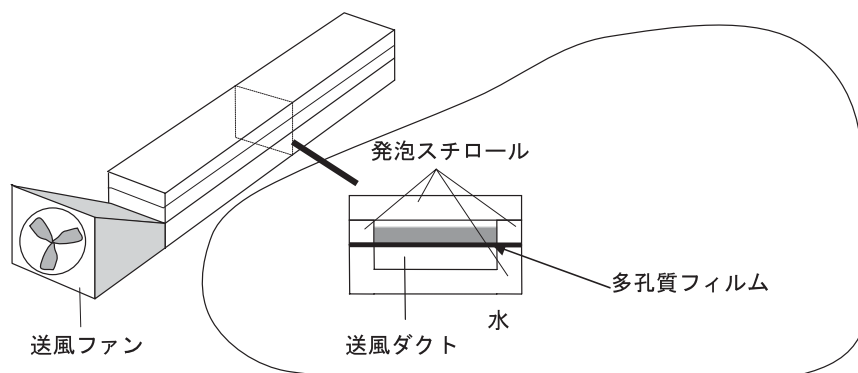


図-4 多孔質フィルム表面の風速と水温との関係进行调查するための装置

送風ファンの反対側の送風ダクトは風速0 m・sec⁻¹ 処理の場合以外では解放してある。水槽は容積3.5 L, 底部面積500 cm² (長さ100 cm × 幅5 cm), ダクト断面積は5 cm² (高さ1 cm × 幅5 cm) とした。

表－6 多孔質フィルム表面の風速が水温とフィルム表面通過後の気温に及ぼす影響

処理区 ^x	水温 (°C)			気温 (°C)		
	0 h ^y	1 h	6 h	0 h	1 h	6 h
強風区	28.8a ^z	28.4ab	26.8b	30.0a	29.5bc	29.6b
弱風区	28.9a	27.6b	26.5bc	29.9ab	29.8b	29.7b
微風区	28.9a	27.3b	25.3c	29.9ab	29.2c	29.0c
無風区	29.0a	29.1a	29.2a	29.7b	30.3a	30.4a

z: 各列の異なる文字間に Tukey の多重検定による 5%水準の有意差あり.
 y: 送風処理を開始してからの時間.
 x: 強風区, 弱風区, 微風区および無風区の処理風速は 20~21, 10~11, 1.2~1.5 および 0 m・s⁻¹ とした.

ダクトを通過した空気の温度は微風区で最も低くなった. ダクト内の気圧は風速が大きい区ほど低下し, 強風区では恒温室内よりも 1.36 kPa 気圧が低くなった (表-7). また, 風速が大きい区ほど水の蒸発量が多くなり, 強風区では 16%の水が蒸発した (表-7).

微風区ではダクト吸引口からの距離が最も遠い 90 cm 地点で他の 2 点より, 水温が高くなったが, 弱風区ではほとんど違いがなかった (図-5). ただし微風区で見られた差は 0.5°C と小さく, 一般的に培養液を流動させる養液栽培では, この差はさらに小さくなると考えられる.

微風区で最も温度低下が大きかったことには, 多孔質フィルム表面の空気の流れが影響していると考えられる. 葉の表面ではその上を流れる風速が小さいほど境界層が厚くなるということが報告されている (矢吹ら, 1970). また, 水の蒸発面の有効厚 (蒸発面から大気に向かって水蒸気圧を測定した時に, 外気の水蒸気圧と等しくなる時の厚さ) は風速が大きいほど薄くなり, 風速が 0 m・s⁻¹ の時には 15~16 mm であったものが, 2 m・s⁻¹ および 8 m・s⁻¹ では約 4 mm および約 1 mm であると報告されている (上田, 1960). 微風区では強風区や弱風区よりも境界層が厚くなり, 多孔質フィルム面からやや離れて空気が流れるため, 空気と水との温度差による熱の移動が起こりにくくなったと推察される.

しかし, 強風区や弱風区で熱の移動が多くなったとしても, 水の蒸発が多孔質フィルムを通過することによって抑制されなければ, 通風状態の湿球温度まで水温が低下し平衡に達するであろう. 乾球温度 (t) および湿球温度 (t') と水蒸気圧の関係はスプリングの式により以下のように表せる. なお近似式の定数は高市 (2003) のものを使用した.

表－7 多孔質フィルム表面の風速がダクト中央部の差圧と 6 時間送風処理後の水の蒸発量に及ぼす影響

処理区 ^y	差圧 (kPa)	蒸発量 (ml)
強風区	1.36a ^z	320a
弱風区	0.20b	144b
微風区	0.01c	86b
無風区	0d	17b

z: 各列の異なる文字間に Tukey の多重検定による 5%水準の有意差あり.
 y: 処理区の説明は表-6 参照のこと.

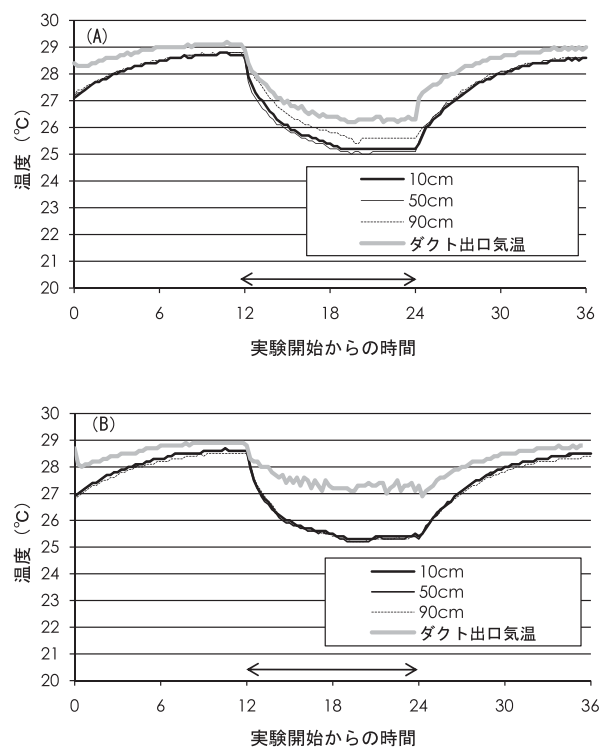


図-5 多孔質フィルム表面への送風処理とダクト入り口からの距離が水温に及ぼす影響

(A) 微風区 (B) 弱風区. 矢印で示した時間に通風処理を行った. 凡例中 10cm, 50cm, 90cm は水槽の空気取り入れ口からの距離を示す.

$$h = h' - k \times (t - t') \times P / 755 \text{ (第 1-3 式)}$$

ただし, t: 乾球温度 (°C), t' : 湿球温度 (°C), h: 水蒸気圧 (hPa), h' :

t' での飽和水蒸気圧 (hPa), P: 大気圧 (hPa) である. ただし, k は湿球凍結時には 0.44, 非凍結時には 0.50 の定数である. また, h' は t' により以下の式で

近似される。

$$h' = 6.1078 \times e^{\frac{a \times t'}{t'+b}} \quad (\text{第1-4式})$$

ただし、非氷結時 $a = 21.8745584$, $b = 265.5$,
氷結時 $a = 17.2693882$, $b = 237.3$ である。
 e は自然対数の底である。

$$RH = \frac{h}{hd} \times 100 \quad (\text{第1-5式})$$

ただし、 hd : 気温 t での飽和水蒸気圧 (Pa), RH : 相対湿度 (%)

第1-3~5式のうち t と RH は測定しており、 P には一般的な大気圧 1013.25hPa を代入して、湿球温度 t' を求めると、およそ 20~22°C となる。また、湿球温度の計測に用いるアスマン式通風乾湿計では、湿球に $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上の風速で送風することが求められている (千輝, 1981)。本実験で、弱風区および強風区では $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以

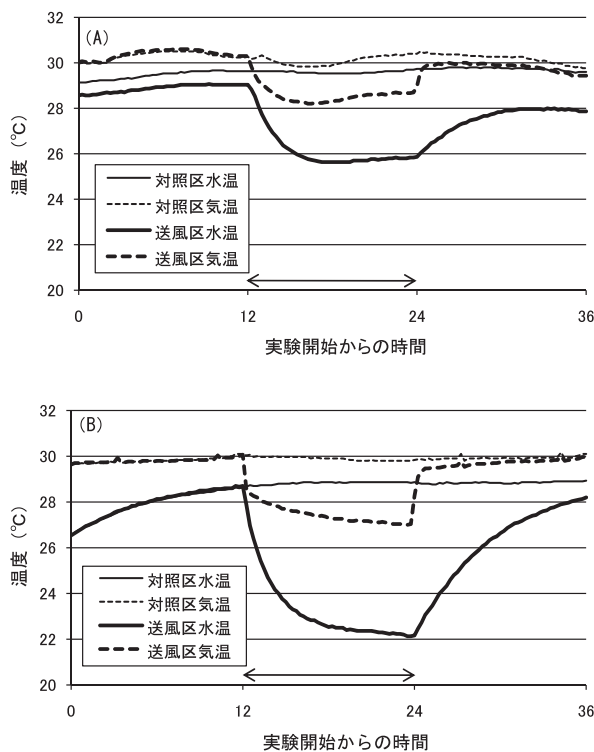


図-6 多孔質フィルム表面への送風処理が (A) 高湿度および (B) 低湿度条件下での水温およびダクト通過後の気温に及ぼす影響

データは3反復の平均値。高湿度条件 (58.6~59.6%), 低湿度条件 (31.0~33.6%) とした。矢印で示した期間に $1.2 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ で送風処理を行った。

上の風速で処理したが 26.5°C 程度までしか水温が低下しなかった (表-6)。このことから、多孔質フィルム表面からの蒸発量は、理想的な水の蒸発面からのものより少ないと考えられる。また、処理風速が大きい場合には、水の蒸発を促進する効果より、空気と水温との差による熱の移動の効果の方が大きくなり、 $1.2 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ を超える風速では水温の低下が小さくなったと考えられる。

2) 多孔質フィルム表面の送風処理と湿度が水温に及ぼす影響 (実験2)

送風期間中の最低水温と送風開始時の水温との差は、低湿度下では 6.6°C, 高湿度下では 3.3°C となった (図-6)。高湿度下では、処理開始から 5 時間後までは時間の経過とともに温度が低下し、水温と経過時間には $y = 0.162 x^2 - 1.48 x + 29.1$ ($R^2 = 0.996$, y : 水温, x : 送風処理開始からの時間) の関係があった。一方低湿度下では、 $y = 0.280 x^2 - 2.44 x + 28.3$ ($R^2 = 0.989$, y : 水温, x : 送風処理開始からの時間) の関係があり、高湿度下よりも水温の低下速度が速かった。実験終了時の水の蒸発量は低湿度下では 163 ml となり、高湿度下の 139 ml より 17% 多くなった。また、処理による水温低下のうちほぼ 40% が 1 時間後までに、90% が 3 時間後までに起こっており、送風処理開始直後ほど水温の低下が著しかった。

高湿度下では、処理開始 5 時間後以降は潜熱および空気と水温との温度差による加熱の効果が平衡に達したため、ほとんど水温が低下しなかったと推察される。低湿度条件では、高湿度条件に比べて飽差が 1.6 倍大きく (高湿度下では 17hPa, 低湿度下では 27hPa), 水温の低下に 2 倍の違いがあった (図-6 AB)。このことから、多孔質フィルムを介した水の蒸発量は低湿度下で多く、低湿度下で送風処理を実施することが水温の低下に効果的であった。

実験1で4回繰り返した実験の中で相対湿度の値が最も離れた2回分のデータと実験2の微風区のデータを用いて、送風処理終了時の気温と相対湿度から計算した飽差と水温低下の関係を図-7に示した。水温低下は送風処理終了時の恒温室の気温と水温の差で示した。その結果、飽差と水温低下はほぼ比例関係にあった。また、送風処理終了時の気温と湿度から計算した湿球温度と気温との差も図-7に示した。その結果、多孔質フィルムを利用した場合に水温低下は、潜熱による冷却限界である湿球温度まで低下した場合の 53~65% 程度となった。したがって、多孔質フィルムを利用した水槽の冷却系で

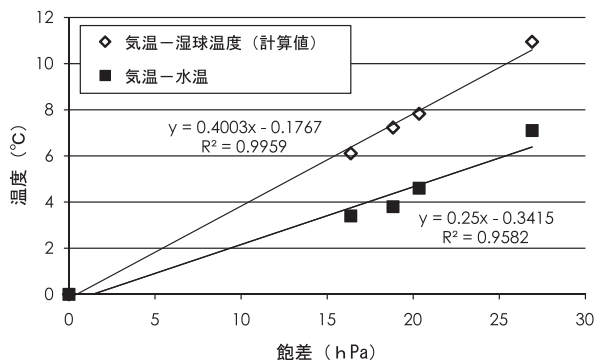


図-7 多孔質フィルム表面に送風する空气の飽差が水温の低下に及ぼす影響

■は送風した空气と水槽中央の水温の差で送風処理の冷却効果を示す。◇は送風した空气の気温および相対湿度から算出した湿球温度と、実際に送風した空气の気温との差で潜熱によって冷却可能な限界値の水温を示す。

は、水温を湿球温度まで低下させることは難しいと考えられた。

長さ1mの装置で実験を実施したが、水槽の長さを延長したとしても、吸気口とダクト接続部を1m間隔で作成することは技術的には容易である。そのため、水槽の長さを延長したとしても、送風ダクトの長さを1mとする限りは、冷却特性は大きく変化しないと考えられた。

3 総合考察

本章では多孔質フィルムを水槽資材として利用した場合の潜熱による冷却特性と、養液栽培での利用を想定した多孔質フィルムの酸素供給能力を明らかにした。

図-1に示した装置は水温を制御できないが構造が簡単であり、高温期の養液栽培での利用に適す。図-4の装置は構造がやや複雑だが温度制御が可能で低温期にも利用できる。電気が使用できない場合は図-1の、電気が試用可能で低温期も利用する場合には図-4の装置と使い分けることも可能であろう。

多孔質フィルムによって湛水を冷却する場合、潜熱が大きいという特性だけでなく、流動性や比熱が大きいという特性が利用できる。2節の実験1において冷却時に水温のムラが小さかったのは、水の流動性が影響したためと考えられる。また、図-5に示した通り送風処理開始から5時間後には水温がほとんど低下しなくなった一方で、送風停止後の水温上昇は緩やかで、ほぼ一定の水温に落ち着くまで約12時間かかっている。送風時にはフィルム表面の風速が大きく伝熱が迅速であったため冷

却の限界に早く達し、送風停止時にはフィルム表面がほぼ無風となり伝熱が緩慢となったため水温の上昇が緩やかになったと考えられる。送風停止時の水温上昇が緩慢となることには、水の比熱の大きさが大きく寄与したと考えられる。

ランニングコストが生じない1節の実験系で潜熱によって奪われたエネルギー（大面積区）を計算すると $52.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ となった。この場合に必要な多孔質フィルムのコストは流動的であるが、実験実施時の購入金額が $300 \text{ 円} \cdot \text{m}^{-2}$ であった。

4 摘要

根圏冷却を想定し、通気防水性資材の多孔質フィルムを利用した湛水冷却法における、多孔質フィルムの冷却能力と酸素供給能力を明らかにした。水槽資材に用いた多孔質フィルムの面積が大きいほど水温の低下、水の蒸発量および酸素透過量が大きくなった。水の蒸発量と水温とは比例関係にあり、多孔質フィルムを用いた水槽では潜熱により水が冷却されることが明らかとなった。多孔質フィルムには 1 m^2 当たり $0.22 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度の酸素供給能力があった。多孔質フィルムを水槽底部に設置し、フィルム表面に4段階の送風処理（0, 1.2～1.5, 10～11, 20～21 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）を実施したところ、風速 $1.2 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ で水温が最も低くなった。それ以上の風速では、水の蒸発量は多くなるが水温の低下は小さくなった。風速 $1.2 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ で処理時の水温低下は、冷却限界と考えられる湿球温度までの水温低下の約53～65%であった。また、水温の低下は相対湿度の影響を受け、低湿度下で大きくなった。

III 通気防水性資材を利用した根圏冷却による高温期のハウレンソウの生育改善効果

II章では、通気防水性資材である多孔質フィルムを利用した湛水冷却法に飽差に比例した冷却効果があること、多孔質フィルムを通して水に酸素が供給されることを明らかにした。多孔質フィルム資材の性能を恒温室内の実験で評価したが、気温が変動する実際の栽培条件下で冷却実施時の根圏温度の変動特性を把握することが、本冷却法を利用する上で重要である。そこで本章では、養液栽培のハウレンソウに多孔質フィルムによる冷却を実施し、冷却が根圏温度の変動特性と生育に及ぼす影響を明らかにした。

ホウレンソウ (*Spinacia oleracea* L.) は冷涼な気候を好むアカザ科の葉菜である。平成18年度の統計では、わが国での作付け面積は2万3300 ha、出荷量が23万9800 tで、主要な野菜の一つとなっている(農林水産省大臣官房統計部, 2008)。過去には高温期を避けて栽培されたが、近年は品種改良がすすみ、夏期でも高冷地等で生産されるようになった。しかし、生育適温から外れるわが国の夏にハウス内でホウレンソウを栽培する際には、何らかの高温対策が必要である。

一方、ホウレンソウの養液栽培は古くから研究が実施され(辻ら, 1978)、近年は施肥を制御して機能性成分等を調整する研究が実施されている。例えば、養液栽培で施肥や灌水の制御により、可食部位の硝酸含量の低下(川口ら, 2006; 塚越ら, 1999; 王ら, 1997; 王ら, 1998)、アスコルビン酸含量の増加(建部ら, 1995; 渡邊ら, 1988; 安田ら, 2004; 吉田ら, 1998)、シュウ酸含量の低下(張ら, 1990)が可能である。しかし、NFT式の養液栽培では盛夏期には栽培が難しい(土屋ら, 1991)。

養液栽培では、根圏冷却技術が高温対策として効果を上げている。Leeら(1995)は培養液温を16°Cから33°Cまで9段階に設定し、ホウレンソウを栽培したところ、培養液温が26°C以下で生育が良好となり22°Cで最も良好であったことを報告している。NFT式の養液栽培で培養液温を高温(25~32°C)で管理した場合よりも20°Cで管理した場合に生育が良くなること(上田ら, 1998)や毛管水耕で培養液を18°Cとすると23°Cより収量が13~16%高くなることが報告されている(塚澤, 2000)。また、明期の培養液温が高くて(30°C)、暗期に20°Cとすると正常に生育することが報告されている(李ら, 1998)。一方、養液栽培で培養液温が高温となっても、根圏のDOを高めることで生育阻害を改善可能である。後藤ら(2003)によれば、ホウレンソウの養液栽培で培養液温35°CではDOを高めても生育改善効果はなかった。しかし、25°Cと30°Cでは、過飽和させた場合も含めてDOを高めることで地上部乾物重(DW)が大きくなることを報告している。Morimotoら(1989)も高培養液温(33°C)でのホウレンソウの生育改善のために、DOを高めることの有効性を指摘している。これらのことは、培養液温がわずかに30°Cを超える程度であればDOを高めることで、生育阻害を軽減可能であることを示している。

ホウレンソウの地床栽培でも、高温対策は重要である。遮光資材を利用した高温対策も有効であるが(井上ら, 2000; 小林ら, 1987; 小澤ら, 1990)、過度の遮光は光合

成の低下を招き減収となる。温室全体をヒートポンプで冷却すると、収量が増加することが報告されている(森田ら, 1988)。しかし、導入コストが高いため広範な普及には至っていない。一方、地床栽培で地下水(20~23°C)により地温を低下させた結果、生育が促進されたことが報告されている(井上ら, 2000)。

以上より、地床栽培や養液栽培で、高温期のホウレンソウの生育不良を根圏の冷却によって軽減可能で、冷却にかかるコストが低い潜熱による冷却が実用化されればその利用価値は大きいであろう。さらに、養液栽培では根圏へ酸素が供給されるシステムであれば理想的であろう。

また、ホウレンソウは一般には地床栽培が行われるが、地床栽培で潜熱により根圏を冷却した例は見あたらない。そこで、多孔質フィルムを利用した潜熱による冷却を、地床栽培でも利用可能とする装置の開発を行った。

1 通気防水性資材による培養液への酸素供給と培養液温低下が生育に及ぼす影響

前章で、多孔質フィルムを水槽の資材として利用すると、水温が低下し、酸素が供給されることを明らかにした。そこで、多孔質フィルムを水耕槽の資材に利用し、培養液の冷却と根圏への酸素供給が、養液栽培でのホウレンソウの生育へ及ぼす影響を明らかにした。また、栽植密度を変えて栽培に必要な多孔質フィルム面積を調査した。培養液温の低下が生育を促進しない時期の栽培は、多孔質フィルムの酸素供給が生育に及ぼす効果を把握するために適すると考えられるため、高温期以外にも実験を実施した。

a 材料および方法

1) 多孔質フィルム製の水耕槽により異なる栽植密度で栽培したホウレンソウの生育(実験1)

実験は岩手県盛岡市にある、東北農業研究センター野菜花き部内のガラス温室で行った。2002年6月12日に、ホウレンソウ'アクティブ'の種子を消毒した培土に播種した。水耕槽は直径20 cm高さ10 cmのポリスチレン製の容器を利用して製作した(図-8 A)。水耕槽は、容器の一部を切り抜き800 cm²(容器表面積の85%)の多孔質フィルムを張り付けたもの、および未加工の容器の2種類を使用した。未加工の水耕槽は周囲を多孔質フィルムで覆い容器表面の色をそろえた。培養液への酸素供給処理として、水耕槽に多孔質フィルムを用いる処理区(フィルム区)、エアポンプを用いてエアレーションする処理区(エア区)、多孔質フィルムを利用しエ

アレーションも行う処理区（フィルム＋エア－区）、どちらの処理も行わない処理区（無処理区）の4処理区を設けた。エア－区およびフィルム＋エア－区では6時間おきに15分ずつ $1\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ の流量でエアレーションした。すべての水耕装置で、根圏への光の透過を軽減するために装置全体を白色のポリエチレンフィルムで遮蔽した。培養液量は4 Lとし、培養液の組成は山崎(1982)のシュンギク・ハウレンソウ用の処方(12.0 mM $\text{NO}_3\text{-N}$, 1.3 mM $\text{NH}_4\text{-N}$, 4 mM $\text{PO}_4\text{-P}$, 8 mM K, 2 mM Ca, 2 mM Mg)を用い、微量元素は2 mM S, $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Fe, $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Mn, $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn, $0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu, $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ B, $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Moとした。水耕槽に浮かべた発泡スチロール板に直径20 mmの穴をあけてプラスチックの網を張り付け、播種後7日目の苗を1装置あたり1, 2および3個体植え付けた。1装置あたり2株植え付けた場合の様子を図-8 Bに示す。定植後7日おきに培養液のDOを測定し、培養液または水道水を補充することで培養液のpHを6.3に、EC値を $2.0\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ に調整した。測定時刻は午前11~12時（次のエアレーション処理の1~2時間前）とし培養

液を攪拌したのち、培養液のDOおよび培養液温を測定した。21日間栽培した後に1株あたりの植物体地上部の新鮮重(FW)を測定した。地下部の乾物重(DW)は 80°C で3日間風乾したのち測定した。実験は多孔質フィルムの有無2水準×エアレーションの有無2水準×栽植密度3水準を完全無作為化して実施し、植物体数1個体の処理区では2装置、その他の処理区では1装置を実験に使用した。

2) 多孔質フィルム製の水耕槽で栽培した低温期のハウレンソウの生育(実験2)

10月4日にハウレンソウ'ソロモン'を播種し、10月10日に実験1と同じ水耕装置に定植した。培養液の量および組成、栽培期間中のpHとEC値の調節法は実験1と同様とし、1装置当たり2株定植した。処理区として多孔質フィルム(800 cm^2)を水耕槽に用いる区(フィルム区)、多孔質フィルムを用い装置の側面を黒色のポリエチレンフィルムで被覆する処理区(フィルム＋黒区)、多孔質フィルムを使用せずエアレーション処理を2時間おきに15分行う処理区(エア－2H区)およ

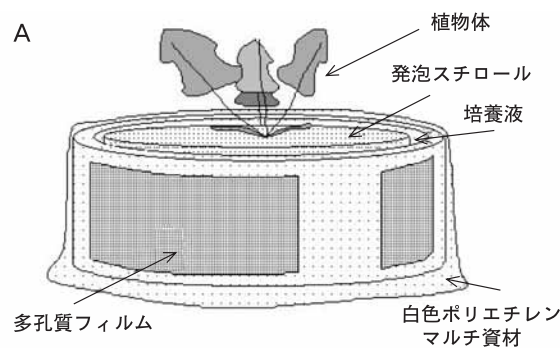


図-8 多孔質フィルムを水槽の資材として利用した水耕装置

(A) 水耕装置；(B) ハウレンソウ定植時の様子。(B)の水色の資材が多孔質フィルムである。

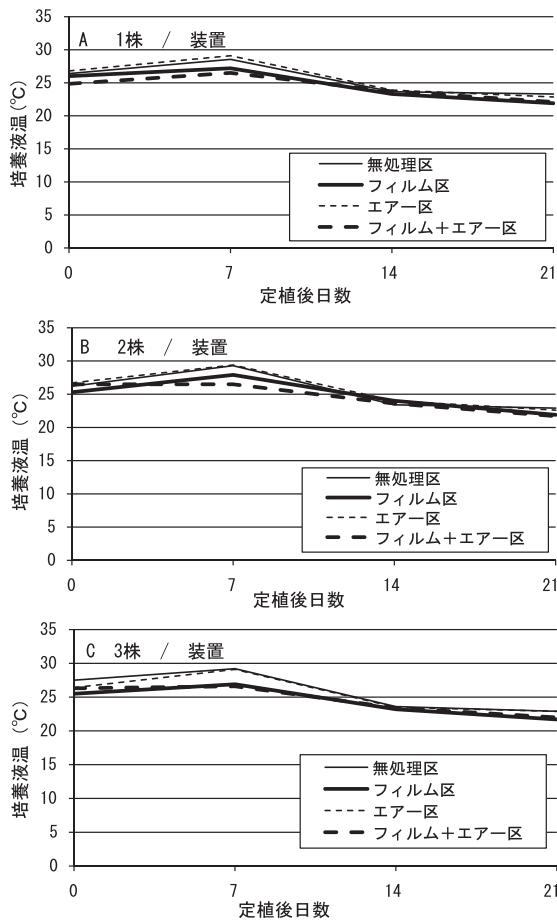


図-9 多孔質フィルムの利用とエアレーション処理が培養液温に及ぼす影響(実験1)

1装置あたりの植物体数は(A)1株,(B)2株および(C)3株とした。処理区は水耕槽にプラスチック製容器を用いる区(細線),多孔質フィルムを用いる区(太線),エアレーションを行わない区(実線)と行う区(破線)で試験を実施した。実験期間:2002年6月12日~7月10日(定植:6月19日)。

び4時間おきに15分行う処理区(エア-4H区),多孔質フィルムを使用せずエアレーションも行わない処理区(無処理区)の5処理区を設けた。フィルム+黒区は,多孔質フィルムによる培養液温低下を抑制する目的で設定し,その他の処理区は実験1と同様に白色のポリエチレンフィルムで装置全体を覆った。エアレーションは $1\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ で実施した。定植後4日おきに培養液のDOを測定し,測定時刻はエア-2H区では次のエアレーション処理の1時間前~直前,エア-4H区では1~2時間前となる午前11~12時とした。また,データロガを利用して(RT-11, Tabai Espec),1処理区につき1装置の培養液温を10分間隔で測定した。定植後48日目に植物体の地上部FWと地下部DWを測定した。実験は1処理区あたり4反復(1反復につき1装置)を完全

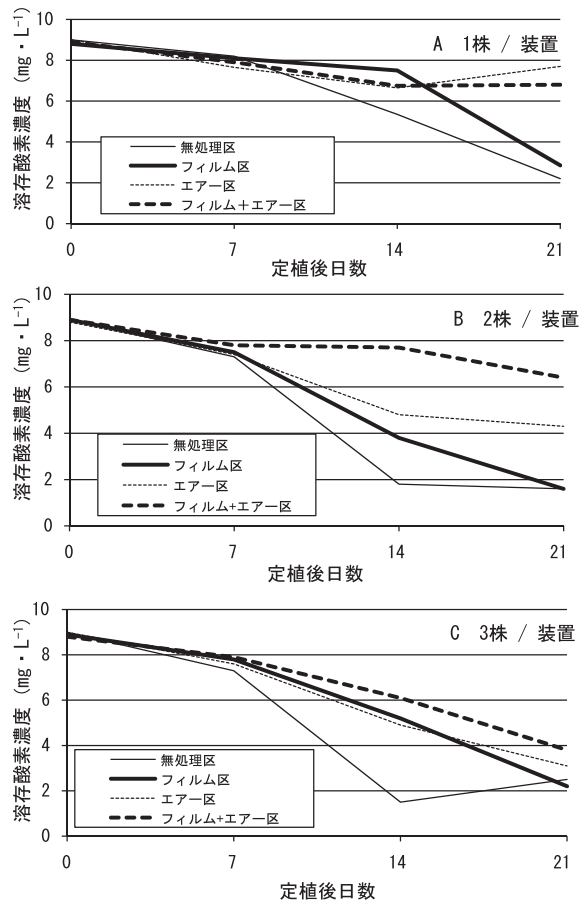


図-10 多孔質フィルムの利用とエアレーション処理が培養液の溶存酸素濃度に及ぼす影響(実験1)

1装置あたりの植物体数は(A)1株,(B)2株および(C)3株とした。処理区は水耕槽にプラスチック製容器を用いる区(細線),多孔質フィルムを用いる区(太線),エアレーションを行わない区(実線)と行う区(破線)で試験を実施した。実験期間:2002年6月12日~7月10日(定植:6月19日)。

無作為化して実施した。

b 結果

1) 多孔質フィルム製水耕槽により異なる栽植密度で栽培したホウレンソウの生育(実験1)

栽培期間中(6月12日~7月10日)の平均気温は 22.6°C であった。多孔質フィルムの利用により4回測定した培養液温の平均値は低くなったが,他の処理は影響を及ぼさなかった(図-9,表-8)。フィルム区と無処理区の培養液温の差が最大となったのは定植後7日目で,その差は 1.6°C であった。

無処理区では他区に比べて,栽培期間中のDOは低くなる傾向があった(図-10)。フィルム区のDOは定植後14日目までは無処理区より高かったが,栽培終了

表-8 多孔質フィルムの利用, 栽植密度, エアレーション処理が培養液温におよぼす影響 (分散分析表)

処 理	自由度	不偏分散	分散	F ₂
栽植本数 (N)	2	0.03375	0.01688	0.1572ns
水槽資材 (M)	1	4.676	4.676	43.56**
エアレーション(A)	1	0.005625	0.005625	0.05240ns
N×M	2	0.05266	0.02633	0.2453ns
N×A	2	0.003750	0.001875	0.01747ns
M×A	1	0.04516	0.04516	0.4207ns
N×M×A	2	0.2077	0.01038	0.9672ns
誤差	4	0.4294	0.1073	
全体	15	5.454		

ns : F 検定により有意水準 5% で有意差なし, ** : 1% 水準で有意差あり.

時には同程度となった。エア-区の DO は定植後 14 日目まではフィルム区と差がなかったが、栽培終了時にはやや高くなった。フィルム+エア-区は、栽培後期には最も DO が高くなった。

1 株当たりの地上部 FW は水耕槽資材, エアレーション, これらの交互作用の効果が有意となったため (表-9), 無処理区, フィルム区, エア-区, フィルム+エア-区の処理区間で Tukey-Kramer の多重検定を実施した。地上部 FW は, 無処理で小さくなり, 他の 3 処理区の間には差がなかった (図-11 A, 表-9)。また, 地下部 DW は多孔質フィルムの利用で高くなり, 3 株/装置で他の栽植密度より低くなった (図-11 B, 表-10)。フィルム区の 1,2,3 株/装置で装置当たりの地上部 FW はそれぞれ 39.7, 73.0, 71.9 g / 装置となり, 地下部 DW はそれぞれ 0.81, 1.09, 1.13 g / 装置となった。

2) 多孔質フィルム製の水耕槽で栽培した低温期のホウレンソウの生育 (実験 2)

栽培期間中 (10 月 4 日~11 月 28 日) の平均気温は 16.7°C であった。培養液温の平均値は無処理区, エア-2 H 区, エア-4 H 区, フィルム区, フィルム+黒区でそれぞれ 18.4, 18.3, 18.6, 17.3, 17.1°C となり, エアレーションした処理区と無処理区でほとんど差はなかったが, 多孔質フィルムを使用した処理区では低くなった (図-12)。フィルム+黒区では培養液温の低下抑制のため黒いフィルムで覆ったが, フィルム区と培養液温にほとんど差がなく, 想定した効果はなかった。

多孔質フィルムを使用した処理区では, 無処理区より培養液の DO は高くなり, エアレーションした処理区より低くなった (図-13)。DO はエア-2 H 区で栽培

表-9 多孔質フィルムの利用, 栽植密度, エアレーション処理がホウレンソウの生体重におよぼす影響 (分散分析表)

要因	自由度	不偏分散	分散	F 値
栽植本数 (N)	2	526.1	263.06	65.56***
水槽資材 (M)	1	753.7	753.73	187.8***
エアレーション(A)	1	55.19	55.193	13.76*
N×M	2	0.03630	0.01815	0.995ns
N×A	2	29.11	14.56	3.627ns
M×A	1	107.7	107.7	26.85**
N×M×A	2	36.94	18.47	4.603ns
誤差	4	16.05	4.013	
全体	15	1524		

ns : F 検定により有意水準 5% で有意差なし, * : 5% 水準で有意差あり, ** : 1% 水準で有意差あり, ***: 0.1% 水準で有意差あり.

表-10 多孔質フィルムの利用, 栽植密度, エアレーション処理がホウレンソウの乾物重におよぼす影響 (分散分析表)

要因	自由	不偏分散	分散	F 値
栽植本数 (N)	2	0.2105	0.1053	37.26**
水槽資材 (M)	1	0.3103	0.3103	109.9***
エアレーション(A)	1	0.01925	0.01925	6.815ns
N×M	2	0.004009	0.02004	0.71ns
N×A	2	0.006655	0.003327	1.178ns
M×A	1	0.01094	0.01094	3.872ns
N×M×A	2	0.03380	0.01690	5.982ns
誤差	4	0.01130	0.002825	
全体	15	0.6068		

ns : F 検定により有意水準 5% で有意差なし, ** : 1% 水準で有意差あり, ***: 0.1% 水準で有意差あり.

終了時まで高くなった。DO はフィルム区とフィルム+黒区との間にほとんど差がなく, 栽培終了時には約 4 mg · L⁻¹ まで低下した。

地上部 FW はフィルム区で無処理区の約 1.4 倍, フィルム+黒区で約 1.5 倍となった (図-14 A)。地上部 FW はフィルム区とフィルム+黒区ではエア-4 H 区と同程度で, エア-2 H 区よりも小さくなった (図-14 A)。

c 考察

以上の実験より, 多孔質フィルムを水耕槽に利用すると, 無処理区よりも地上部 FW が大きくなったが (図-11 A, 図-14 A), 酸素供給と液温低下が影響したと考えられる。

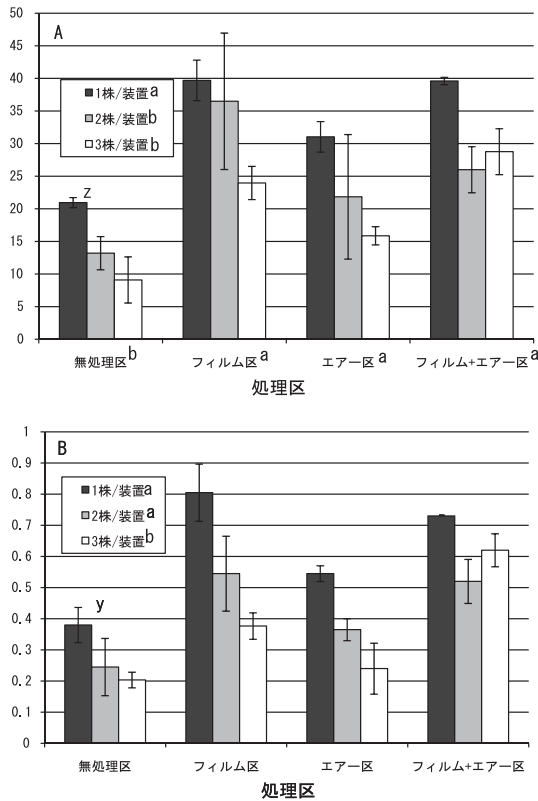


図-11 水耕槽の資材としての多孔質フィルムの利用, 栽植密度, エアレーション処理がホウレンソウの生育に及ぼす影響 (実験1)

A: 地上部新鮮重 B: 地下部乾物重. 実験期間: 2002年6月12日~7月10日 (定植: 6月19日). 図-8で示した装置で栽培を行った. z, y: 標準偏差. 凡例中のアルファベットの異なる文字間の栽植密度の処理間で Tukey-Kramer の多重検定の結果, 5%水準の有意差あり. 地上部 FW でのアルファベットの異なる文字間の処理区で Tukey の多重検定の結果, 5%水準の有意差あり. 地下部 DW は水耕槽資材と栽植密度は分散分析の結果, 有意な効果があり, エアレーションはなかった (表-10).

NFT 方式でホウレンソウの養液栽培を行うと, 液温が高温 (25-32℃) の場合には 20℃とした時より, また低温 (9-15℃) の場合には 15℃とした時より生育が劣ると報告されている (上田ら, 1998). Lee ら (1995) は, 培養液は 26℃以下が望ましく, 最も生育に好適なのは 22℃としている.

実験1では, 栽培時期が高温であるため, 定植日と定植後7日目の培養液温は各区とも 26℃以上となり (図-9), 測定時の培養液温はホウレンソウの生育適温より高かったが, 14日目と21日目は各区とも生育適温であった. 定植後7日目の培養液温は, フィルム区では無処理区より 1.6℃低かった (図-9). この温度差が生育にどの程度影響を及ぼすかは明らかではないが, 多孔質フィ

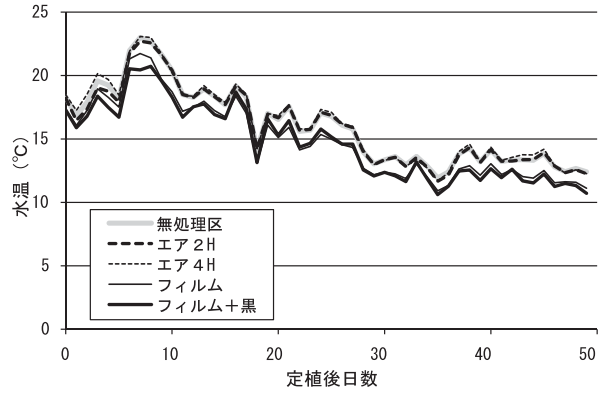


図-12 ホウレンソウの水耕栽培期間中の培養液温の変化 (実験2)

プラスチックの水耕槽を用いた3処理区 (エアレーションを行わない (無通気処理区), エアポンプにより2時間おきに15分ずつエアレーションを実施 (エア-2H区), 4時間おきに15分ずつ実施 (エア-4H区)) および多孔質フィルムを用いた2処理区 (装置を白色ポリエチレンシートで覆う処理区 (フィルム区) と黒色ポリエチレンシートで覆う処理区 (フィルム+黒区)) で試験を実施した. 1装置あたり2個体栽培した. 各処理区4反復とし, 完全無作為化して実施した.

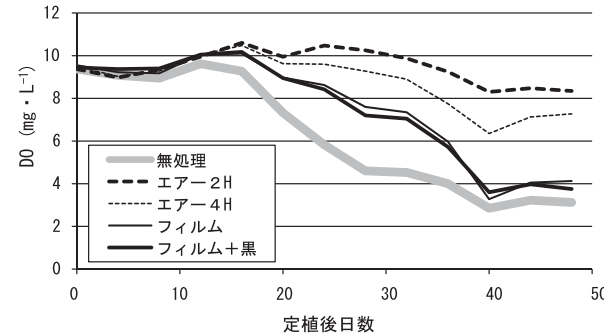


図-13 ホウレンソウ栽培期間中の培養液の DO の変化 (実験2)

処理区の説明は図-12を参照のこと.

ルムによる培養液温の低下は生育を促進する可能性がある.

実験2では秋期の実験のため, 実験1より培養液温は低くなった (図-12). 定植後20日目に各個体の最大葉長を測定したところ処理区間に有意な差 (F検定, 10%レベル) がなく (図-15), 栽培期間前半の培養液温は 24℃以下で全区が生育適温の範囲内のため温度差は生育に影響しなかったと考えられた. 栽培期間後半 (定植後25~48日目) の培養液温は全処理区の平均値で 13.6℃であったが, 上田ら (1998) や Lee ら (1995) の結果から考えると, 生育が最も良い培養液温より低いと考えられる. 多孔質フィルムはさらに培養液温を低下させる

ことから（図-12）、多孔質フィルムによる培養液温の低下は生育を遅らせる方向に作用したと考えられる。

実験1、2では、エアレーションをせずに多孔質フィルムを使用すると無処理区よりDOは同程度か高くなる傾向が見られた（図-10、図-13）。地下部DWは無処理区より多孔質フィルムを利用した方が大きくなる傾向があったが（図-11B、表-10、図-14B）、多孔質フィルムの利用でDOが高まった。また、ナス、トマト、トウガラシなどの多くの作物の根の呼吸量は根圏温度が高くなると増加する（位田、1963）。培養液温低下による根の呼吸速度の低下もDOを高めることに寄与した可能性がある。

実験2では、多孔質フィルムによる培養液温の低下が生育を遅らせると考えられるが、酸素供給によって無処理区より地上部FWが高くなったと考えられる。低温期の培養液温の低下による生育遅延より酸素供給による促進の効果が上回った結果、無処理区より地上部FWが大きくなったと考えられる。

また実験1のフィルム区のDOは1株/装置で2~3株/装置より高くなる傾向があったが、装置当たりの地上部FWと地下部DWが低く、根の酸素吸収量が少なかった可能性が考えられる。

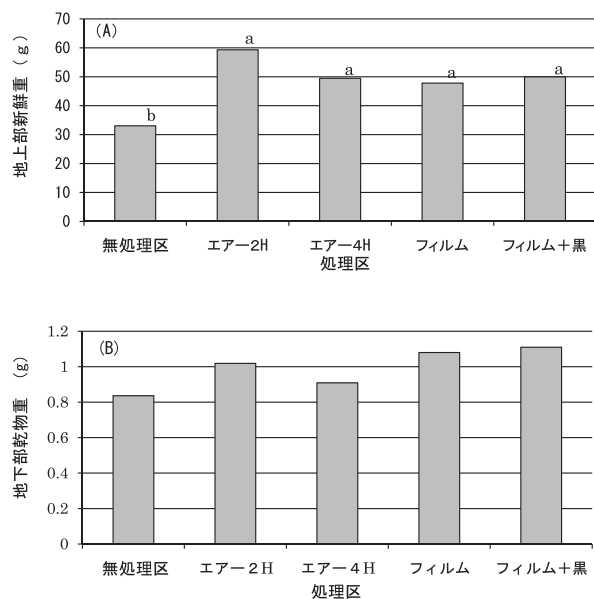


図-14 水耕槽資材としての多孔質フィルムの利用とエアレーション処理がホウレンソウの生育に及ぼす影響（実験2）

(A) 地上部新鮮重 (B) 地下部乾物重。地上部乾物重はグラフ中異なる文字間で Tukey の多重検定により 5%水準の有意差あり。地下部乾物重は有意差なし。処理区は図-12の説明を参照のこと。

実験1で地上部FWが40g以上となった個体の地下部DWは0.63~0.76gであった。2章1節で示したように多孔質フィルム1㎡当たりの酸素供給量は0.22 μmol・s⁻¹程度である。Morimotoら（1989）は、DOが8.2 mg・L⁻¹、液温20℃の明条件下でホウレンソウの根の呼吸速度は乾物重1g当たり0.05~0.10 μmol・s⁻¹としている。このことから、多孔質フィルム1㎡当たりの酸素供給量は、高DO下で栽培した乾物重2.2~4.4gの根の呼吸量に相当する。高DO下でも多孔質フィルムによる酸素供給速度が変わらないと仮定すると、栽培可能な個体数は1㎡当たり3~7個体である。実際には、DOの低下により呼吸量は低下し（Morardら、1996）、多孔質フィルムの酸素供給量は低DO下で高くなるため、1株当たり800cm²のフィルム面積があれば、比較的高温期でも地上部FWが40g程度となるまで栽培可能であった（図-11A）。

橘（1986）は、養液栽培での根圏への酸素供給の不足が、植物の養分吸収の低下や生育不良を引き起こすことを指摘している。ただ、培養液のDOが高いほどホウレンソウの生育が良いわけではない。たとえば、実験2のエアー4H区ではフィルム+黒区よりDOが高く、また、培養液温も栽培後半高くなったが、地上部FWと地下部DWに差はなかった。低DOでも培養液の攪拌速度を高めるとトマトの生長量が大きくなり、その効果は根表面での酸素と養分供給の増加が影響している可能性を指摘している（中野ら、2001）。エアレーション処理では、ポンプ停止時には酸素の供給がなくなるが、多孔質フィルムを利用すると継続して酸素が供給され、DOが低くても生長が低下しなかったと考えられる。

実験1で1株定植の場合には株当たりの地上部FWは他区より大きかったが全個体の地上部FWは他区より小さくなったため、2株以上で栽培することが適当で

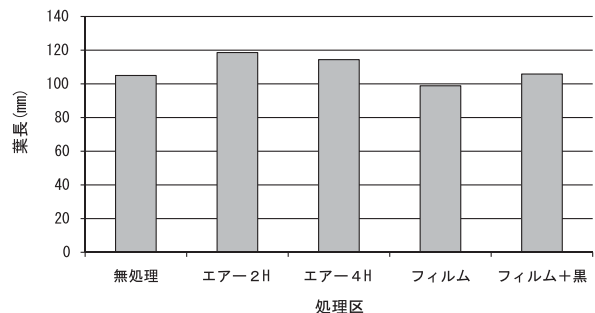


図-15 定植後20日目の最大葉長（実験2）

処理区の説明は図-12を参照のこと。F検定により処理区間に10%水準で有意差なし。

あろう。2株 800 cm²の多孔質フィルムに対して2株定植した場合の地上部FWは、6月播種で30g以上(図-11)、10月播種で50g程度であった(図-14)。草丈は現在市場で好まれる25cm程度となり、多孔質フィルムの価格によっては商業的栽培が可能であろう。

2 培養液冷却装置の温室内での冷却特性と生育に及ぼす影響

水耕槽資材として多孔質フィルムを利用すると、培養液へ酸素が供給され、培養液温が低下するため、高温期のハウレンソウの生育が促進される。ただ、前節の装置では効率的に培養液温を低下させることができなかった。そこで、多孔質フィルム表面の風速制御によって潜熱による冷却を調節する装置を利用し、圃場での培養液の冷却特性を明らかにした。また、装置を利用した根圏冷却がハウレンソウの生育に及ぼす影響を明らかにした。

a 材料および方法

実験は東北農業研究センター内のガラス温室で行った。2003年6月9日(6月播種)および7月23日(7月播種)に、ハウレンソウ'アクティブ'の種子を消毒した培土を入れたセル成型トレイ(128穴)に播種した。7日間(6月播種)および8日間(7月播種)育苗した後、1水耕装置あたり14個体を定植した。水耕槽(長さ120cm×幅20cm×高さ10cm)は装置全体を厚さ2cmの発泡スチロールで製作したものと(対照区)、容器の側面は発泡スチロールを用い、底部にポリカーボネート製の波板を使用し、容器の内部に多孔質フィルムを張り付けたもの(図-16)の2種類で栽培を行った。また、多孔質フィルムを用いた処理区では、波板とフィルムとの間

に送風処理を行う処理区(送風区)と行わない処理区(無風区)の2処理区を設け、対照区とあわせて3処理区で実験を行った。対照区では発泡スチロールからの漏水を防ぐために水耕槽内部にポリエチレンフィルムを敷いた。送風区では、6月播種の場合には午前4時から午後8時までの16時間、7月播種の場合には終日、風速1~2 m・s⁻¹の送風処理した。II章2節の実験で1.2~1.5 m・s⁻¹の処理風速で最も培養液温が低下したため、その値に近い風速で処理を行った。培養液量は20Lとし、培養液の組成は前節と同じものを使用した。栽培期間中、培養液へ酸素供給を行うため4時間おきに15分ずつエアポンプにより流量1.5 L・min⁻¹(1装置につき2カ所)のエアレーションを行った。栽培期間中7日おきに、培養液の減少分を蒸留水および培養液により補充し、培養液のEC値を2 mS・cm⁻¹、pHを6.4に調整し、同時にDOを測定した。各水耕槽中央部の培養液温は、6月播種では7月4日から、7月播種では8月9日から、それぞれ6日ずつ15分間隔で測定した。実験は1処理区につき3反復を完全無作為化して実施した。

6月播種では定植後28日目に、7月播種では31日目に地上部FWと地下部DWを測定した。

b 結果および考察

栽培期間中の実験温室内の平均気温は6月播種では24.6℃、7月播種では24.8℃であった。

6月播種の7月4日から6日間の培養液温の平均値は、送風区では無風区より2.4℃、対照区より2.2℃低くなった。その最大の温度差は、無風区に対して5.1℃、対照区に対して4.9℃となった。培養液温は送風開始直後か

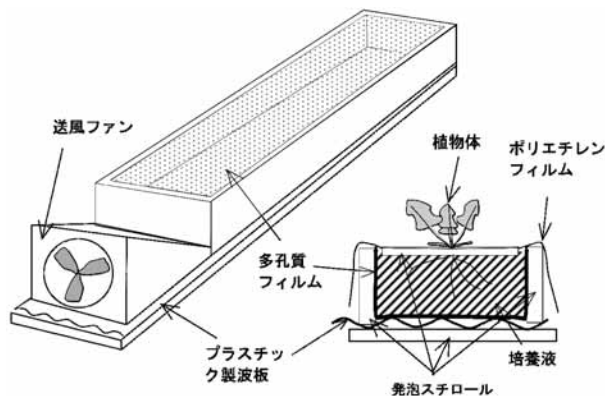


図-16 多孔質フィルム表面の風速制御で冷却を制御する培養液温制御装置

多孔質フィルムとプラスチック製波板の間の空間を送風ダクトとして使用し、送風ファンによって冷却制御する。

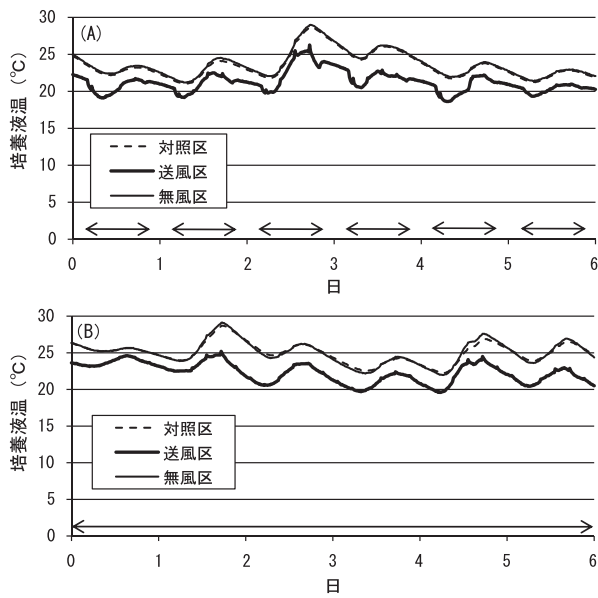


図-17 水耕槽の資材に利用した多孔質フィルム表面の風速制御が培養液温に及ぼす影響

(A) 2003年7月4日～10日 (B) 2003年8月9日～15日。対照区は発泡スチロール製の水耕槽を使用し、送風区と無風区では水耕槽底部および内面に多孔質フィルムを使用した。送風区では図中矢印で示した時間、ダクトに送風処理を行った。

ら急激に低下し、送風終了後には培養液温の低下が抑制されるか、一時的に上昇した(図-17 A)。飽差は培養液温測定開始から2日後の日中に最も大きくなり(図-18 A)、その日に処理区間の差が最も大きくなった(図-17 A)。

7月播種の送風区では、終日送風を行ったため、6月播種での送風停止時と送風開始時の培養液温の上昇と低下は観測されなかった(図-17 B)。7月播種の送風区での培養液温の平均値は他の2処理区より2.8°C低くなり、6月播種より低下量は大きかった。

終日送風を行った7月播種で、培養液温低下が熱伝達のみによるのであれば、平均気温と培養液温は同程度となるであろう。しかし、送風区の培養液温は気温より3.0°C低くなったが、対照区と無風区では0.3°C低いだけであり、送風処理によって潜熱による冷却が促進されたと考えられる。無風区では、波板と多孔質フィルム間のスペースが小さく空気の流動が起こりにくい構造であったため多孔質フィルム面に空気の動きがなく、フィルム面の湿度が高くなり、水の蒸発が抑制されたため、対照区と差がなかったと考えられる。

送風処理による培養液温の低下程度は、1日の範囲内でも変化した(図-17 AB)。夜間は飽差が小さく、気温と同程度までしか培養液温は低下しないが、昼間は飽

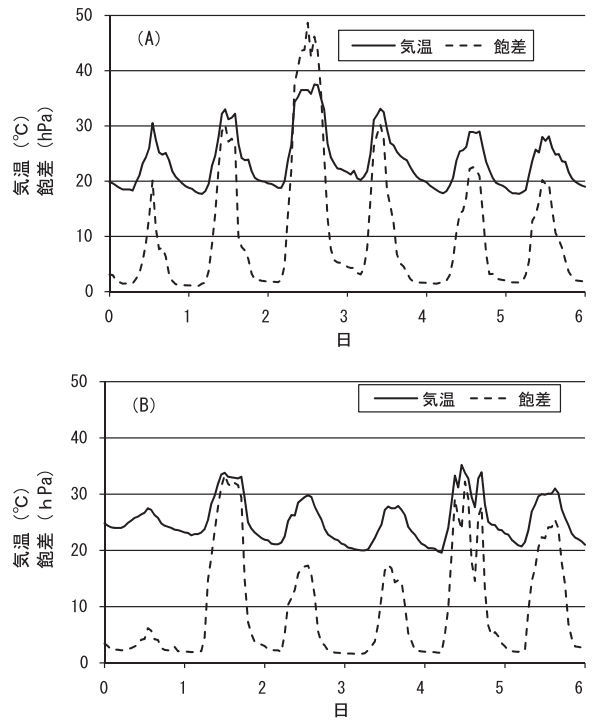


図-18 ホウレンソウ栽培期間中の温室内の気温及び飽差の変化

(A) 2003年7月4日～10日 (B) 2003年8月9日～15日。

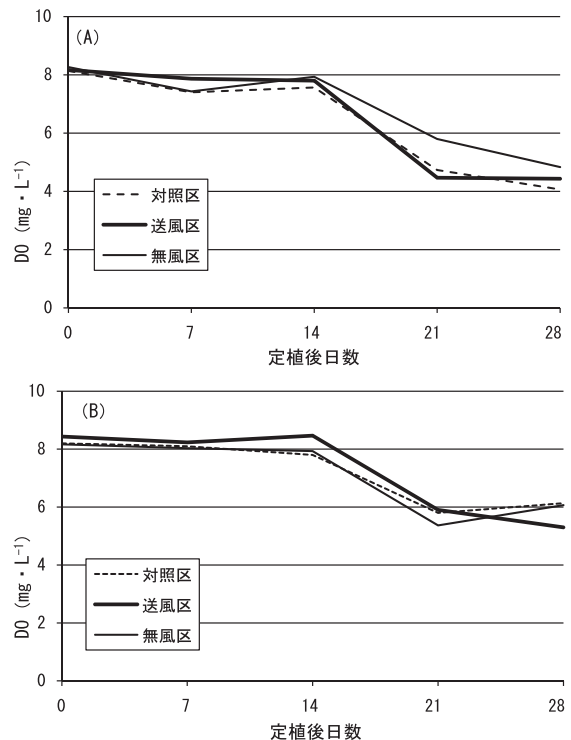


図-19 培養液温制御装置を使用時の溶存酸素濃度の変化

(A) 2003年6月16日定植 (B) 2003年7月31日定植。処理区の説明は図-17を参照のこと。

表-11 水耕槽の資材として利用した多孔質フィルム表面の風速制御がホウレンソウの生育に及ぼす影響

処理区	6月9日播種		7月23日播種	
	地上部 FW	地下部 DW	地上部 FW	地下部 DW
	(g/株)	(g/株)	(g/株)	(g/株)
対照区	15.7a	0.26ab	23.6a	0.26a
送風区	19.5a	0.31b	25.9a	0.28a
無風区	12.7a	0.21a	20.5a	0.25a

処理区の説明は図-17を参照のこと。

同一列内の異なる文字間に Tukey の多重検定により 5% 水準の有意差あり。

差が大きく気温より培養液温が低くても送風処理による冷却効果がみられた(図-18 AB)。このことから、送風処理により、夜間には培養液温と気温の温度差による熱の移動の影響で、また昼間は潜熱の効果でそれぞれ培養液が冷却されたと考えられた。

気温が急激に上昇する午前中に、送風区と他の処理区との温度差がしばしば小さくなった(図-17 AB)。こうした時間帯は、培養液から奪われる潜熱より、多孔質フィルム面での空気による加熱が大きかったと考えられる。6月播種では、送風処理停止時(20時)には培養液温が一時的に上昇し、送風開始直後(4時)に培養液温が急激に低下した。また、無風区では対照区とほぼ培養液温が同じであった。これらのことから、多孔質フィルムへの送風制御することで培養液温を制御可能と考えられる。

一方、培養液の DO は、処理区間にほとんど差がなかった(図-19)。前節では多孔質フィルムの利用で培養液へ酸素が供給されることを示した。したがって、DO が同程度であったとしても、無風区および送風区では多孔質フィルムを通じた酸素供給があり、根に供給された酸素量は多くなる可能性がある。

しかし無風区と対照区で培養液の DO の差は小さく(図-19 AB)、これらの処理区間で地上部 FW および地下部 DW に有意な差がなかった(表-11)。本実験では、全処理区でエアレーションを行っており、酸素供給が生育に及ぼす影響は小さいと考えられる。

6月播種、7月播種とも、地上部 FW は処理区間に有意差がなかった(表-11)。また、地下部 DW は送風区では無風区より有意に大きくなり、送風処理によって高温によるホウレンソウの生育抑制が軽減できたが、7月播種では処理区間に有意な差はなかった。植物体地上部の生育に影響がなかった原因は不明であるが、培養液温が生育不良を引き起こすほどの高温でなかったことなどが考えられる。

以上より、多孔質フィルムを水耕槽の資材として用い、フィルム表面に送風して培養液温を制御可能であることが明らかとなった。低温期には送風しないことで、ホウレンソウの根圏温度を過度に低下させないことが可能であると考えられた。

3 地床栽培での通気防水性資材を利用した根圏冷却法の開発

2節の冷却装置は養液栽培での利用を前提としているが、養液栽培のみでは園芸生産での利用法が限定される。そこで、多孔質フィルムの液相と気相の境界面を自由に設定できるという特性を生かした、地床栽培用の根圏冷却装置を開発し、開発装置による根圏冷却がホウレンソウの生育に及ぼす影響を明らかにした。

a 材料および方法

1) 根圏冷却装置の概要

長さ5m直径20mmのナイロン繊維製のメッシュチューブ(モノドレイン裸チューブ、前田工織)の外側を、円筒状に加工した多孔質フィルムで包んだ多孔質フィルム製ダクト(以下ダクト)を製作した。そのダクトを円周18cmの円筒状に加工したポリエチレンフィルム内に入れたものを冷却チューブとして利用した(図-20 A B)。多孔質フィルムとポリエチレンフィルムはシーラーで熱溶着させて円筒状に加工した。メッシュチューブ内は送風空間として利用し、多孔質フィルムとポリエチレンフィルムの間には水道水を満たして使用した。冷却チューブを使用する時は、図-20 Cのように両端各50cmを上方に折り曲げて6Lの水を溜めて使用した。

2) 多孔質フィルム製ダクトへの送風処理が冷却チューブの表面温度の低下に及ぼす影響(実験1)

実験は東北農業研究センターのガラス温室で行った。高さ50cmのコンクリート製の台に厚さ20mmの発泡スチロール板を敷き詰め、その上に両端を折り曲げた長さ5mの冷却チューブを10cm間隔で平行になるように配置した。多孔質フィルム製ダクトとポリエチレンフィルムとの間には送風処理を行う前日に6Lの水道水を満たした。

送風処理はダクトの片端をブローア(U 2 V-30 S, 昭和電工)に接続し、ダクトを通して空気を吸引する方向で行い、無風状態を含めて4段階の風速を設定した。送風処理期間中には、30分ごとの冷却チューブ表面の温度を測定した。測定位置は発泡スチロールと冷却チューブ

ブとの接触面とし、チューブの両端からそれぞれ1 mの地点（折り曲げた部位から50 cm）と中間地点（端から2.5 m）の合計3カ所で測定を行った。実験は2004年11月18日（1回目）および11月22日（2回目）の2回実施し、それぞれ正午より24時間送風処理を行った。風速はダクトの空気取り入れ口（吸気口）付近で測定し、 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ （以下 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）、 $4 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ （以下 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）および $8 \sim 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ （以下 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）とした。風速の各水準につき2反復で実験を行った。また装置間の誤差を排除するため2回の実験で、同じ装置に異なる風速の処理を行った。

3) 冷却チューブ設置圃場での送風処理が地温低下に及ぼす影響（実験2）

圃場条件で冷却チューブの効果を確認するために、岩手県盛岡市にある東北農研センターのビニールハウス内に長さ5 m、幅70 cmの畝を作成し実験を実施した。冷却チューブは畝の中心線上に深さ5 cmの溝を掘って埋め込んだ（図-20 C）。冷却チューブのうち畝内に埋め込んだ部分の長さは4 mとし、両端は50 cmずつ上方

に折り曲げた。10月27日に冷却チューブ内に6 Lの水を入れた。冷却チューブを設置した処理区のうち半数は、ダクトの片端を直径30 mmの塩ビチューブを介してプロアーに接続し、送風処理を行った。送風処理は2004年10月29日14時から $8 \sim 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ の風速で実施した。また、対照区として冷却チューブを設置しない処理区を設けた。

冷却チューブの中間地点（端から2.5 m）で、冷却チューブ直下（地表下5 cm）の地温を30分間隔で10月30日から31日にかけて測定し、対照区についても畝の中心線で同様に測定を行った。実験は、冷却チューブを使用しない区（対照区）4反復、冷却チューブを使用し送風処理を行わない処理区（無風区）と送風処理を行う区（送風区）は2反復で実施した。

4) 冷却チューブによるハウレンソウの根圏冷却（実験3）

実験は、東北農業研究センターのビニールハウスで実施した。1 aあたり換算成分量で窒素、リン酸、カリがそれぞれ0.7 kgとなるように全面に施肥し、70 cm幅

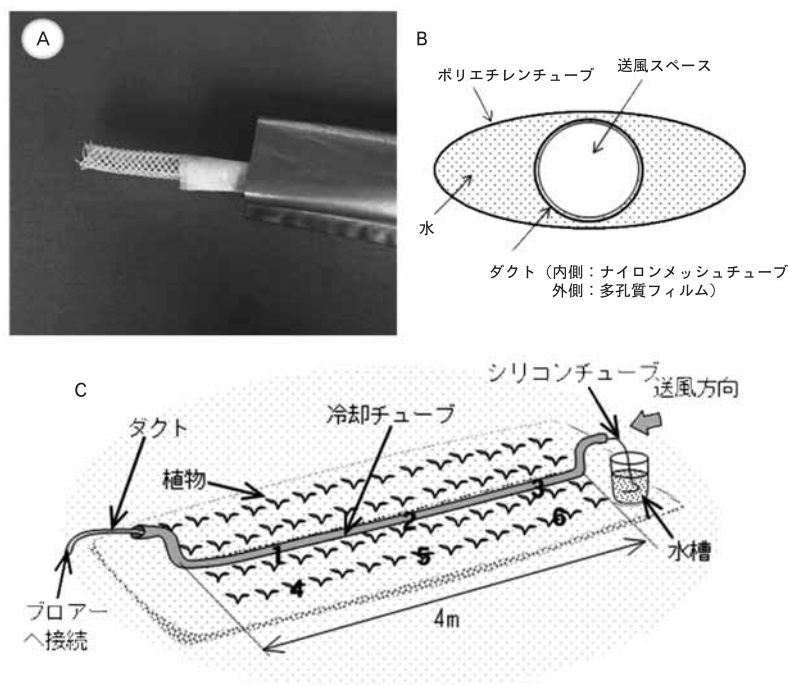


図-20 地床栽培用の根圏冷却チューブとその設置法

A 冷却チューブ； B 冷却チューブ断面図； C 地表への冷却チューブの設置方法。図Cの数字1から6は地温の測定点。数字1と4はダクト吸引口から4m、数字2と5が吸気口から2.5m、数字3と6がダクト吸引口から1m地点である。また、数字1～3の位置は畝の中心線上、数字4～6は畝の中心線から15 cm離れた地点を示す。

の畝を作成した。処理区は冷却チューブによる冷却を行う区（冷却チューブ区）および冷却チューブを設置しない区（対照区）の2処理区とし、4反復で実験を行った。冷却チューブは実験2と同じ方法で設置し、水槽とシリコンチューブを使用したサイホンにより自動的に水を冷却チューブに供給した(図-20 C, 図-21)。

ハウレンソウ‘次郎丸’，‘豊葉’，‘キングオブデンマーク’，‘アクティブ’，‘ノーベル’，‘晩抽パルク’の6品種を2004年8月20日に播種した。一畝あたり条間12 cm，株間8 cmの4条として，畝の中心線の両側の2条ずつに分け，片側に3品種ずつを割り付けて各品種30株で栽培を行った。播種は一穴4粒まきとし，播種後7～8日目に1個体に間引いた。

冷却チューブへの送風処理（風速 $8\sim 9\text{ ms}^{-1}$ ）は8月27日から開始し，同時に地温（地表からの深さ5 cm）を，冷却チューブ区の4反復のうちの1カ所で，冷却チューブの端から2.5 m地点（実験区中央部）の畝中心線直下と中心線から15 cm離れた地点において30分間隔で測定した。対照区でも同様に測定した。なお，ハウレンソウの根の分布から考えるとやや浅い深さ5 cmで測定したが，冷却チューブと畝との接する部分であり，冷却チューブによる地温低下を確認するために最も適当であると考えた。

また，2004年9月1日から9月5日に対照区と送風区で，ダクト吸引口から1 m，2.5 mおよび4 mの，畝中央および畝中央から15 cm離れた地点の地温を，30分間隔で測定した。送風区の地温測定地点は図-20 Cの図中数字1～6で示した。

収穫は，‘次郎丸’‘豊葉’‘アクティブ’を10月1日に，‘ノーベル’‘晩抽パルク’を10月4日に，‘キングオブデンマーク’を10月5日に行い，条ごとに畝の通路側と畝中心線側とに分け，それぞれ15株ずつ地上部FWを調査した。

実験は冷却装置の有無に関する要因を1次要因，品種を2次要因とする分割区法により実施した。

b 結果および考察

1) 多孔質フィルム製ダクトへの送風処理が冷却チューブの表面温度の低下に及ぼす影響（実験1）

平均気温と相対湿度の平均値は1回目が 21.2°C ，58%，2回目が 23.7°C ，46%であった（表-12）。

発泡スチロール上でダクト内に1，4および $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ で送風処理を行うと，無風（ $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）に比べて，各測定位置で冷却チューブの温度が低くなった。 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ と $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ では，吸気口からの距離が長いと冷却効果が低下したが， $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ では吸気口から1 m地点よりも2.5



図-21 冷却チューブによる根圏冷却を実施したハウレンソウ

畝中心線上にあるのが冷却チューブである。写真右手前に見える塩ビパイプの先にはプロアーが接続されている。写真奥の容器に水を満たしサイフォンで冷却チューブに水を供給している。

表-12 多孔質フィルムダクトへの処理風速が冷却チューブの表面温度に及ぼす影響

風速 ($m \cdot s^{-1}$)	吸気口からの各距離での冷却チューブ表面温度の平均値 (°C)		
	1m	2.5 m	4 m
反復1 (気温 21.2°C 相対湿度 58%) ^z			
0	20.4 ^y	20.4	20.5
1	19.0	19.7	20.2
4	18.0	18.3	18.3
8	18.6	17.6	17.4
反復2 (気温 23.7°C 相対湿度 46%)			
0	22.9	23.6	23.7
1	20.6	22.0	23.0
4	19.4	19.9	20.5
8	19.7	19.3	19.4

z: 実験温室内の平均気温および湿度を表す。

y: 反復1は2004年11月18日、反復2は2004年11月22日の正午から24時間の間の測定値の平均を表す。

mと4m地点で温度が低くなった。吸気口から4m地点の温度は $1 m \cdot s^{-1}$ 時には無風と同程度であった。相対湿度が低かった2回目の実験の方が各風速で無風との温度差が大きかった。最も温度低下が大きい $8 m \cdot s^{-1}$ での冷却チューブ端から2.5m地点の温度は、1回目の実験では無風より最大で $5.5^{\circ}C$ 、2回目では $10.9^{\circ}C$ 低かった。

5mの装置を利用し風速が低いと、ダクト内の湿度が上昇し水が蒸発しにくくなるが、 $8 m \cdot s^{-1}$ では吸気口から最も遠い4mの地点で冷却チューブの温度が最低となり、ダクトをさらに長くしても、温度低下が可能と考えられる。これらのことから、5mの冷却チューブ全体を冷却するためには $1 m \cdot s^{-1}$ 程度の風速では低く、 $8 m \cdot s^{-1}$ 以上の風速で処理すると全体が冷却されると考えられる。

2) 冷却チューブ設置圃場での送風処理が地温低下に及ぼす影響 (実験2)

測定期間の地温の平均値が送風区では $14.3^{\circ}C$ となり、無風区 ($15.7^{\circ}C$) や対照区 ($15.6^{\circ}C$) に比べて有意に低くなった。

10月30日の正午頃には気温が地温より $10^{\circ}C$ 近く高くなったが、送風区の地温は他区より低くなった (図-22 A)。また、送風区と他の処理区との日中の温度差は、相対湿度が低かった10月30日の方が大きかった。これらのことから、日中は送風処理により潜熱が奪われて

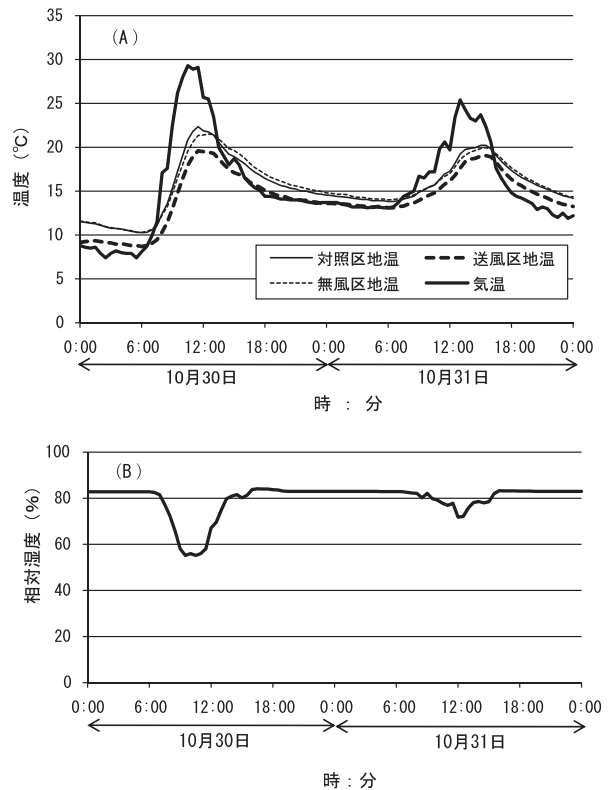


図-22 露地圃場に設置した多孔質フィルムダクトへの送風処理が冷却チューブ直下の地温に及ぼす影響
対照区では冷却チューブを未設置。無風区と送風区では冷却チューブを設置し、送風区では冷却チューブの多孔質フィルムダクトに送風処理した。送風区の測定地点は図-20の数字2の地点。(A) 地温および気温 (B) 相対湿度。

温度が低下したと考えられた。

しかし、夜間は日中より湿度が高く (図-22 B)、蒸発による温度低下は期待できない。10月30日~31日の夜間の気温 ($10 \sim 15^{\circ}C$) と相対湿度 ($80 \sim 90 \%RH$) 下での潜熱による最大の冷却温度である乾球と湿球の温度差は $1 \sim 2^{\circ}C$ である。送風区では冷却チューブの温度が気温と同程度か高くなったことから、送風した空気と冷却チューブの温度差による熱の移動で冷却チューブの温度が低下したと考えられた。

3) 冷却チューブによるハウレンソウの根圏冷却 (実験3)

送風処理期間中の冷却チューブ区の冷却チューブ直下および畝の中心線から15cm離れた地点の平均地温は $19.2^{\circ}C$ および $20.8^{\circ}C$ となった (表-13)。一方、対照区の畝中心線直下および中心線から15cm離れた地点での地温はそれぞれ $21.0^{\circ}C$ および $21.5^{\circ}C$ となり、送風区

表-13 冷却チューブによる根圏冷却がハウレンソウ栽培時の地温に及ぼす影響

処理区	畝中央からの距離	各栽培期間における平均地温 (°C)					平均地温 (°C)
		8/27~9/3	9/3~9/10	9/10~9/17	9/17~9/24	9/24~10/1	
対照区	0 cm	23.2	23.9	20.7	21.4	18.8	21.0
	15 cm	23.3	24.2	21.3	21.9	19.5	21.5
冷却チューブ区	0 cm	21.2	21.6	18.5	19.5	17.5	19.2
	15 cm	23.3	23.7	20.4	21.0	18.6	20.8

期間開始日の正午から期間終了日の正午までの平均値を示す。

表-14 冷却チューブによる根圏冷却がハウレンソウの生育に及ぼす影響

処理区	畝内の位置	各品種の地上部 FW(g/株)					
		ノーベル	晩抽パルク	アクティブ	キングオブデンマーク	豊葉	次郎丸
対照区	内側	12.3±2.1	16.4±1.8	16.8±1.5	10.1±0.4	14.5±2.8	15.1±4.0
	外側	14.9±4.1	17.6±3.5	19.3±3.7	9.2±0.4	14.0±3.8	14.5±5.7
冷却チューブ区	内側	17.4±4.1	18.1±3.8	19.8±2.4	14.1±1.0	17.2±2.8	19.8±2.6
	外側	14.9±3.6	17.0±4.0	18.9±4.8	14.0±2.5	14.2±3.4	16.0±4.0

栽培期間は2004年8月20日~10月5日。

各データは、平均値±標準偏差。

では冷却チューブ直下の地温が低くなった。気温が高く推移した9月1日から4日間の処理区中央での地温の変化を図-23に示した。日射量が少なく気温が低く推移した9月2日(屋外の全天日射量 $6.95 \text{ MJ} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{day}^{-1}$)よりも、気温が高く推移した9月1, 3および4日 ($16.7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{day}^{-1}$ 以上)の方が地温の低下が大きかった。また、夜間より日中で冷却効果が大きかった(図-23)。

また、地温はダクトの吸気口からの距離が長いほうが、日中は高く、夜間は低くなる傾向が見られた(図-23 A)。長い冷却チューブを使用する場合には地温のばらつきを小さくするために、冷却に使用する水を循環させる必要性も考えられる。ただ、対照区の畝中心線上の地温も測定地点によって2°C程度の差がある(図-23 D)。そのため、冷却チューブを設置時のダクト吸気口からの距離による温度のばらつきは大きくなかった。

10月1日から5日にかけて植物体の地上部FWを調査した。冷却チューブにより地温が低下した畝の中心線側の植物体についてのみ統計処理を行った。その結果、冷却チューブ区では対照区に比べて、地上部FWは各品種の平均で25%程度大きくなった(表-14)。

冷却チューブ区では畝の中心線側が通路側の植物体よりも地上部FWがやや大きくなる傾向が見られたが、対照区では畝内の位置による明らかな生育差は見られな

表-15 冷却チューブによる根圏冷却がハウレンソウの生育に及ぼす影響(分散分析表)

要因	自由度	偏差平方和	分散	F値
冷却チューブ	1	148.5	148.5	6.67*
1次誤差	6	133.6	22.3	
品種	5	203.9	40.8	12.21**
交互作用	5	16.3	3.3	0.98 ^{ns}
2次誤差	30	127.7	4.3	

1畝4条で栽培したうちの内側2条のデータに対する分散分析。
ns: F検定により有意水準5%で有意差なし, *: 5%水準で有意差あり, **: 1%水準で有意差あり。

かった(表-14)。

養液栽培の場合には培養液温が28°C以上で、地上部FWが低下することが報告されている(Leeら, 1995)。また、井上らが(2000)、ハウレンソウ栽培時に畝間にチューブを設置し、沢水を通水する処理を実施した結果、1株重が大きくなることを報告している。9月上旬には対照区や冷却チューブから離れた部分ではしばしば地温が30°Cを越えたが(図-18)、冷却チューブ直下では最高でも28.5°Cであった。高地温となる条件下で、冷却チューブの利用によってハウレンソウの高温による生育抑制が改善されたと考えられる。使用品種は、東洋種と

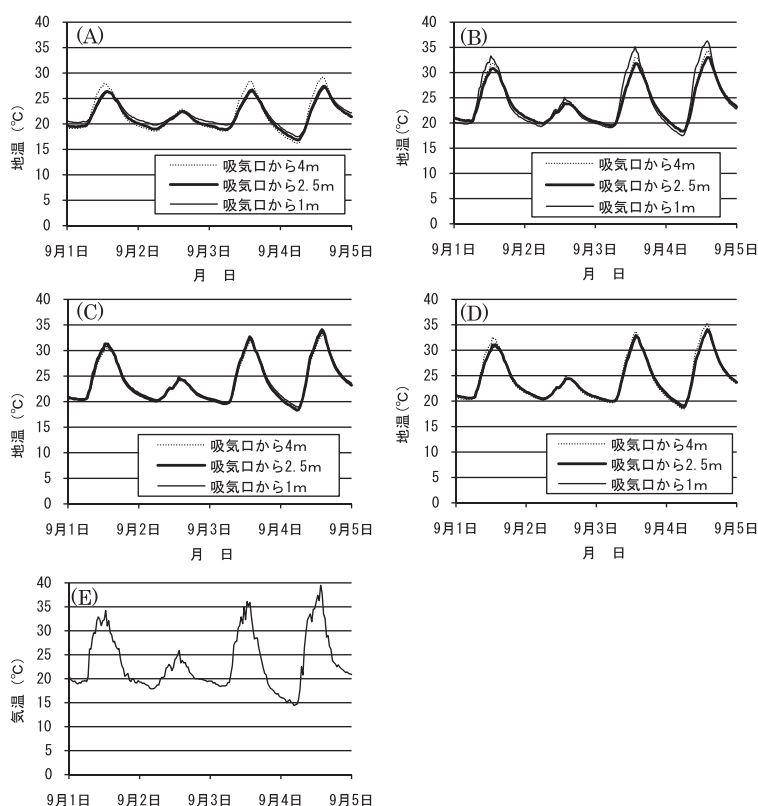


図-23 露地圃場に設置した冷却チューブ内の多孔質フィルム製ダクトへの送風処理が地温に及ぼす影響 (2004年)

(A) 冷却区の畝中心線 (B) 冷却区の畝中心線から 15 cm 離れた地点 (C) 対照区の畝中心線 (D) 対照区の畝中心線から 15 cm 離れた地点. (E) 実験時の気温. (A) の吸気口から 4 m, 2.5 m, 1 m の地点は図-20 の数字 1, 2, 3 の地点. (B) の吸気口から 4 m, 2.5 m, 1 m の地点は図-20 の数字 4, 5, 6 の地点に相当する. (C) (D) は異なる 3 地点のデータ. 気温は地表から 20 cm 地点で測定した.

西洋種の交配種で抽だいの早い'次郎丸'、'豊葉'と晩抽性の'アクティブ'、西洋種の交配種である'晩抽パルク'、およびオランダの品種であり晩抽性の'ノーベル'や極晩抽性の'キングオブデンマーク'である(香川, 2004). しかし、冷却チューブと品種の交互作用が地上部 FW に影響を及ぼさないことから(表-15)、冷却チューブによる地上部 FW の増加は、特定の品種によらないと考えられる.

冷却チューブから 15 cm 離れた地点では地温の低下がほとんどなく、冷却チューブ区の通路側の植物体は畝中心線側の植物体よりもほとんどの品種で地上部 FW が小さくなる傾向が見られた(表-14). ホウレンソウの栽培で生育促進を図るためには冷却チューブを植物体の近くに配置する必要があると考えられる. ただ、'キングオブデンマーク'は、通路側でも地上部 FW が大きくなる傾向があり、品種によって冷却チューブが生育に影響を及ぼす範囲が異なる可能性がある.

本実験で、地床栽培でも多孔質フィルムの利用により潜熱冷却を適応可能であった. しかし、プロア-の種類

と冷却チューブの長さには注意を払う必要がある. 圃場での送風処理には出力 300 W の最大静圧が高く(8.82 kPa)、最大風量の小さい($1.0 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)プロア-を使用し、5 m (埋設した長さは 4 m)の冷却チューブ 4 本に対して送風処理を行った. 送風ダクトの径が小さく、長さが長い場合には、送風時の抵抗が大きくなるため最大静圧の高いプロア-を使用する必要がある. 実験 3 では冷却チューブの温度分布に大きな差がみられなかったが、チューブ長を長くするとダクト内の湿度が上昇し、さらに冷却効率が低下し、温度差が生じることが考えられる. 今後、冷却チューブの配置とともに、ダクト径とダクト長を送風装置の特性に合わせて最適化することで、冷却チューブを利用した根圏冷却法が実用化に近づくと考えられる.

4 総合考察

本章では、多孔質フィルムによる根圏冷却がホウレンソウの生育に及ぼす影響と、温室内での根圏温度の変動特性を明らかにした. また、多孔質フィルムを水耕槽と

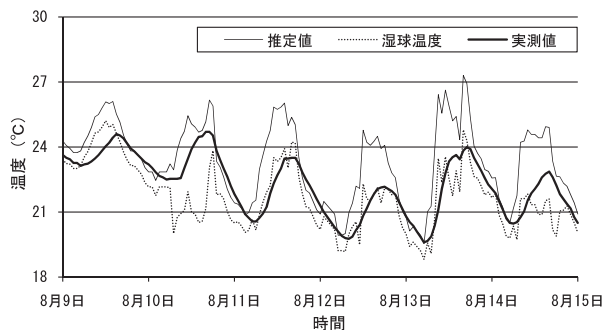


図-24 ホウレンソウ水耕栽培期間中の水温の実測値、湿球温度、推定値

実験は2003年8月9日～15日の岩手県盛岡市で実施した。実測値は2節の実験1における送風区の結果である。湿球温度は計算によって算出した値である。推定値は図-7の回帰式より算出した。

して利用したときの培養液への酸素供給がホウレンソウの生育に及ぼす影響を明らかにした。

1節の実験から、水耕槽の資材として多孔質フィルムを用いると、温室内でも潜熱によって培養液が冷却されることが明らかとなった。温室内での冷却特性は多孔質フィルム表面の風速を制御した2節の結果からより詳しく考察可能である。2節の養液栽培装置は、II章2節で示した装置と原理的に同じであり、恒温室でこの装置で冷却すると培養液温は、I章で算出した回帰式(図-7)による推定値近くになると考えられる。

そこで、回帰式による培養液温の推定値、湿球温度、2節実験時の培養液温の実測値を図-24で示した。その結果、回帰式による推定値と実測値は温度が低下する時間には良く一致した。恒温室では、回帰式の推定値となるまでに、6時間程度必要であった(図-5)。しかし、気温が低下する時間には、潜熱による冷却と空気と培養液との温度差による熱伝達により、恒温室よりも早く推定値まで達したと考えられる。

一方、気温が上昇する時間には、実測値の方が推定値より低くなる傾向が見られ、実測値が湿球温度を下回る時間もあった。実測値の方が湿球温度より低くなることは、水耕槽の断熱効果が大きいこと、水の比熱が大きいことが影響したと考えられる。また、推定値が実測値を上回る時間に送風処理を実施すると、培養液温は上昇すると考えられる。ただ、気温下降時と異なり、気温と水温の差による加温と潜熱による冷却が同時に起こるため、水温の上昇速度が低くなると考えられる。

これらのことから、気温が低下する時間は回帰式によ

る推定値まで培養液温は低下可能で、気温が上昇する時間の培養液温は、装置の断熱性や培養液の量に影響されることが考えられる。本実験より培養液量を減らして養液栽培すれば、比熱が小さくなり、培養液温の実測値は、推定値に早く近づくと考えられる。そのため、2節の培養液冷却装置を利用する場合には少なくとも回帰による推定値まで温度を低下可能で、推定値は作物を栽培する時期や適地を決定するための値として利用可能であろう。

そこで、2節の冷却法をV章で実験を実施した愛知県武豊町で2008年7月10日から9月30日に実施したと仮定した場合の推定値を示した(図-25)。気温および気温と相対湿度から計算した湿球温度も図-25に示した。計算した湿球温度、また推定値とも、気温が35°Cを超える日が多かった時期でも30°C以下となった(図-25 BC)。しかし、8月20日頃までは暗期でも推定値が27°C以上となる日が多かった。

Leeら(1995)はホウレンソウの養液栽培で、培養液温を26°C以下に冷却するとそれ以上の温度の場合より生育が改善されること、22°C程度が生育の適温であることを指摘している。このことから、8月20日頃までの期間は、ホウレンソウを栽培することは難しいと考えられる。また、李ら(1998)はホウレンソウの養液栽培で明期の養液の温度が30°Cに達しても暗期を好適な温度(20°C)で管理することで、ホウレンソウを正常に生育可能であることを報告している。8月の後半には明期26～27°C暗期22°C程度の培養液温になる日が増加しており(図-25 C)、ホウレンソウの栽培に適した培養液温まで冷却できる可能性がある。

計算によって算出した湿球温度は、潜熱によって冷却可能な限界値を示しているため、推定値より低くなっている。多孔質フィルムの改良がすすみ、理論的冷却値付近まで冷却が可能となれば、より栽培の適応範囲は広がると考えられた。

恒温室で実験した回帰式による推定は、培養液量が少ない場合には正確な冷却限界を示すが、培養液量が多い場合には、送風処理方法なども検討する必要がある。湿球温度よりも水温が低い場合に送風処理をしても冷却効果はない。湿球温度を基に、送風処理を実施するか決定することは、効率的に培養液温を低下させるために有効であろう。

一方、3節の冷却チューブは、2節で示した断熱的な冷却系に比べて多くの送風が必要であった。日射が大きい場合に冷却チューブ未設置の場合との温度差が大きくなり、高市ら(2000)のイチゴの高設栽培での潜熱によ

る冷却結果と同様であった。冷却チューブと太陽光の放射、地中や空気からの伝熱による熱収支に関しては、植物による遮光の効果などもあり、非常に複雑である。ただ、冷却チューブの温度が湿球温度以下の場合には送風処理による冷却効果はない。湿球温度は、潜熱による冷却効率を判断する際の基本的なパラメータであり、細霧を利用した温室の冷却効率を評価する際にも利用されているが (Bottcher ら, 1989), 根圏冷却に潜熱を利用する際にも、重要な指標であろう。

ただ温室で、湿球温度を継続測定することは難しく、気温センサと相対湿度センサの測定値から湿球温度を計算するならば、コンピュータを利用する必要がある。近年は安価に導入可能な複合環境制御システムの開発がおこなわれ (Hoshi ら, 2004), 小規模な温室においてもコンピュータ制御を実施することが困難ではない。湿

球温度を基にした環境制御を実施し、潜熱による冷却を効率的に実施するためには、コンピュータを利用した環境制御を検討する必要がある。

また、潜熱による冷却は温室内の空気を利用する機会が多い。しかし、温室内の空気の状態は換気によって影響をうける。IV章で、温室内外の熱収支によって換気率を測定する機器の開発を紹介するが、換気率をモニターすることで、潜熱冷却を実施するために温室が適した状態であるかを判断することも重要であろう。

5 摘要

通気防水性資材である多孔質フィルムを利用した潜熱による根圏冷却が、ハウレンソウの生育に及ぼす影響を調査し、圃場条件で冷却を実施した場合の根圏温度の変動特性を明らかにした。高温期に水耕槽の資材として1株当た

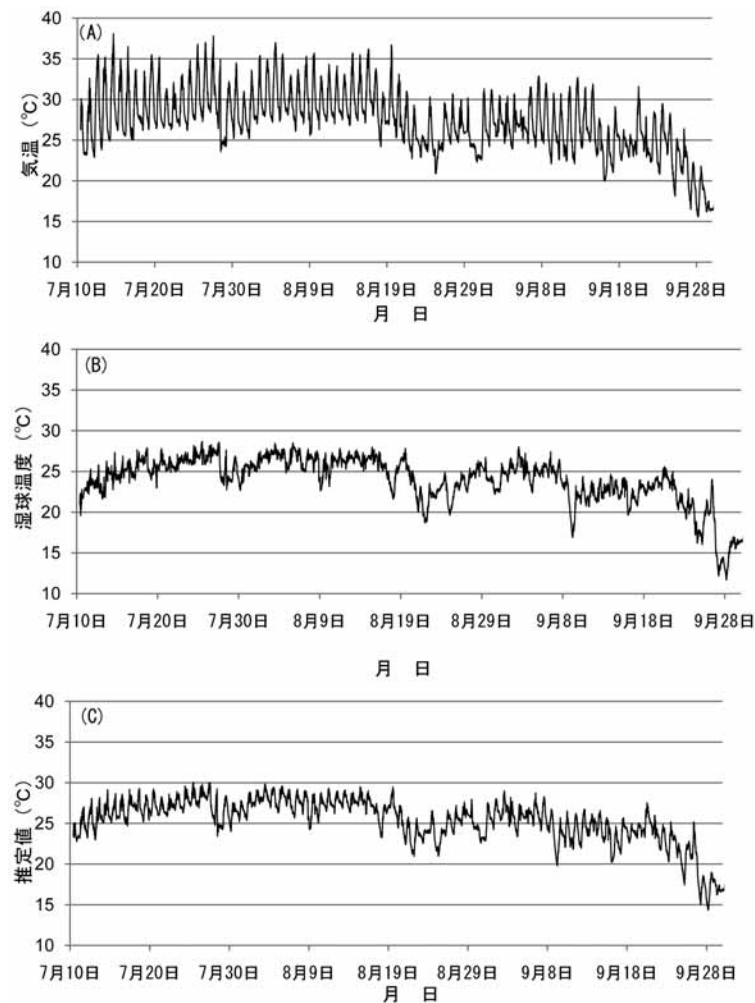


図-25 2008年7月～9月の愛知県武豊町屋外での (A) 気温, (B) 湿球温度, (C) 推定値

屋外気温は通風して測定した。湿球温度は屋外の気温と相対湿度から算出。推定値は図-7の回帰式から算出した。

り800 m²の多孔質フィルムを利用し、エアレーション装置を用いずにハウレンソウの養液栽培を実施したところ、根圏への酸素供給と培養液冷却の効果により、地上部FWが30~50 g程度になるまで栽培可能であった。

水耕槽の資材として多孔質フィルムを利用し、多孔質フィルム表面に1~2 m・s⁻¹の風速で処理した結果、培養液が冷却され、高温期に栽培を行ったハウレンソウの生育は促進された。また、送風処理による冷却によって、気温が低下する時間帯にはインキュベータ内で実施した実験と同程度 ($y = 0.25x - 0.3415$ (y: 送風を実施した気温に対する培養液の低下温度(°C); x: 送風を実施した空気の飽差(hPa)))の温度まで培養液温を低下させることが可能であった。気温上昇時は、培養液の比熱などの影響で湿球温度以下で培養液温が推移する場合もあり、回帰式による推定値より培養液温は低く推移した。

また、地床栽培において、多孔質フィルムを利用した冷却チューブによる根圏冷却を実施した結果、供試した6品種のハウレンソウでは、冷却チューブ近傍の株の生育が促進された。地床栽培における冷却では、養液栽培での処理風速以上の送風が必要であった。

IV 自律分散型環境制御システムを利用した温室の換気率等のモニターリング手法の開発

温室の環境制御に温室用コンピュータを利用することの有用性は古くから指摘され、温室専用のシステムが開

発されてきた(本條, 1992)。温室用コンピュータを用いて、温室外部から温室内の情報を入手可能なシステムも開発されている(輪竹, 1997)。近年は、ネットワーク接続を利用して、温室環境を遠隔操作が可能で、温室内で異常が発生すると警報メールを送信するシステムも開発されている(布施, 2003)。

しかし、温室用コンピュータの普及率は低く、園芸施設の1%程度といわれているが、高価であることが原因の一つである。

本條(1992)は、環境制御機器それぞれにコンピュータを設置すると高価になり、統一的な制御が難しくなると指摘している。しかし、近年はコンピュータの価格も低下し、各環境制御機器にマイコンを搭載した、UECSが開発された(Hoshiら, 2004)。UECSではLANを利用した統一規格の通信文の授受により環境制御を実施し、また各機器がお互いの情報を共有している。情報の共有により、統一的な温室の環境制御が可能となった(図-26)。

UECSでは、温度センサは測定した温度を、温風加温機はボイラの燃焼に関する情報や送風ファンの稼働状況をすべての機器に送信している。そのため、LAN内で流通する必要な情報を利用して環境制御を実施可能で、各機器のマイコン基板で作動するプログラムに従って、自立的に動作する。一方、複雑な環境制御を実施する場合には、LANに接続可能なPCより指示を出して制御可能である。

UECSのメリットは、大規模施設から雨よけ施設の

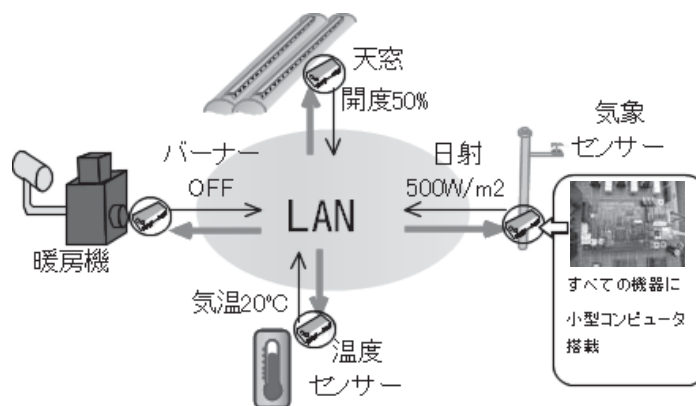


図-26 自律分散型の環境制御システムである UECS の概念図

UECSでは、環境制御機器にはLANに接続可能なマイコンが実装してある。各機器は自身が保有する情報(温度センサであれば気温、天窗開閉装置であれば天窗の開度)を、他のすべての機器に送信する。通信方法と、通信文の書式が決まっており、各機器は自身が必要とする情報を受信し、マイコンに書き込まれているプログラムに従って環境制御を実施する。

ような小規模な施設まで導入可能であること、高価な集中管理型の温室用コンピュータを使う必要がないことである（林ら、2004）。従来の複合環境制御システムは1台の温室用コンピュータで集中管理を行うため、コンピュータが壊れた場合にはシステム全体が動作不能に陥る。しかし、UECSでは、機器が一台壊れたとしても、各機器は自立的に動作するため、システム全体が動作不能に陥ることはなく安定性が高い。

そこで、UECS導入温室での利用を想定した、温室環境のデータ収集と環境制御のスケジュール管理を実施するソフトウェアと温室の換気率を計算し送信する換気率計算ノード（UECS対応機器のことをノードと呼んでいる）の開発を行った。

黒崎ら（2006）によって、UECSの通信情報を収集し、警報メールの送信機能を有するソフトウェアが開発されており、UECS導入温室で利用されている。そこで、さらにUECSの利便性を高めるため、環境制御を実施する機能とタイムサーバーの機能を付与したデータ収集・スケジュール管理ソフトウェアを開発した。ソフトウェアの利用で、設定ファイルに記載したスケジュール通りに通信文を送信し、各機器を制御し、通信文の内容を1分ごとに記録可能である。また、時間を示す通信文を定期的に送信する機能を利用し、UECSの各機器の時間をソフトウェアを実行しているPCと同期できる。

後者の換気率計算ノードは熱収支法に基づいて、温室内外の気象条件から温室の換気率や温室内の蒸発散速度を計算する機能を有する。換気率を測定するためにはトレーサーガスを利用する方法があるが（石井ら、2007）、長期間の測定が難しい。一方、温室の熱収支に基づいて換気率を計算する方法は、各熱収支項を厳密に評価するのは難しいが、連続測定に適している。しかし、熱収支による換気率の測定には、温室内外の気温および湿度、日射量など複数のセンサの情報を利用して計算する必要がある。開発したノードはこれらのセンサの情報のうちUECSのLANから必要なものを入手して、換気率や蒸発散速度を計算する。換気率を計算するために必要なデータが入手可能な温室であれば、新たにセンサを導入せずに、開発したノードを使用可能である。

細霧による冷却を実施する場合に換気率に基づいて細霧の噴霧時間を決定している例もあり（Handartoら、2007）、換気率は細霧冷房時の有用な情報となる。

データ収集・スケジュール管理ソフトウェアと換気率計算ノードを活用することで、温室の換気率と蒸発散速度を容易にモニター可能となり、得られた情報は潜熱に

よる冷却の効率的な実施にとって有益なものとなる。

1 データ収集・スケジュール管理ソフトウェアの開発

施設園芸では、しばしば定期的に環境制御の設定を変更することが必要である。例えば、果菜類の栽培では、省エネルギーに配慮しつつ効率的に転流を促進させるために変温管理が利用される。また、灌水をタイマー制御によって実行する場合や、カーテンの使用目的を遮光と保温で切り替える処理なども定期的に行う処理である。

そこで、UECSで流通する通信文の内容を解析して記録し、開発したソフトウェア用の設定ファイルに記載されたスケジュールに従って通信文を送信する、PCで動作可能なデータ収集・スケジュール管理ソフトウェアの開発をおこなった。

a 材料および方法

1) UECSの環境制御に使用する通信文の書式

UECSでは、各機器は共通のフォーマットの通信文を送受信している。形式はWorld Wide Web Consortiumで勧告されたXMLで記載され、UECSエレメント（<UECS>と</UECS>で挟まれた部分）にデータが記載されている。UECSの一般的な通信文では、UECSエレメントがDATAエレメントを1つ保有する。DATAエレメントには環境制御機器の保有する情報が記載されている。以下に、気温を測定するノードが送信する通信文の例を示す。

```
<? xml version=" 1.0" ?>
<UECS>
<DATA type=" InAirTemp" room=" 1" region=" 1"
order=" 0" priority=" 15" >23.5</DATA>
</UECS>
```

DATAエレメントは属性値としてtype, room, region, order, priorityをもつ。type属性はデータの種別が記載されている（上記の通信文のInAirTempは温室内の気温を表す）。また、room, region, orderの3つの属性値は0から29の値である。これらの3属性値には任意の値を設定し、環境制御機器はこれらの値がすべて一致した通信文を受信すると、その情報に従って自身の動作方法を決定する。ただし、これらの属性値が0の場合には、環境制御システム全体に係る通信文とし

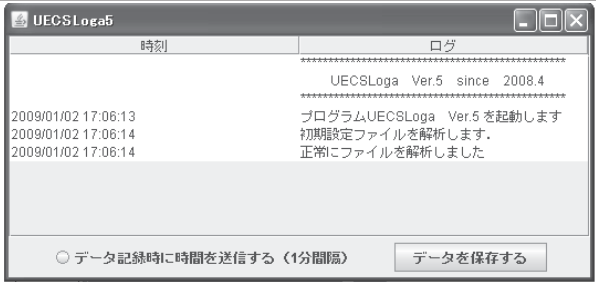
て解釈される。priority 属性も 0 から 29 の値を持つが、この属性値が小さいほど、データの重要性が高いことを示している。もし、type, room, region, order の各属性値が等しい通信文を送信する 2 つのノードがある場合に、priority 属性値が大きいノードは通信文の送信を行わず、priority 属性が小さいノードが UECS から外されると、通信文を送信する。DATA タグで囲まれた値（上記の例では 23.5）は、この通信文が示す値を表す。

上述の文は、気温を測定するノードが、温室内の気温が 23.5 であることを送信する際の通信文例である。この通信文を受信した環境制御機器は自身の持つ属性の値が、room が 1, region が 1, order は 0~29 の場合には、受信した情報が自身の動作に関係するとして取り扱う。

2) 開発したソフトウェア概要

ソフトウェアの開発には JAVA TM SE Development Kit 6 (Sun Microsystems) を使用した。ソフトウェアを実行させるためには Java (TM) SE Runtime 6 をインストールした LAN に接続可能な PC が必要である。開発したソフトウェアを起動するとソフトウェア用の設定ファイル (init.xml) を読み込み、ファイルに記載されたスケジュールに従って、通信文を LAN 内に送信する。また、起動直後から受信した通信文の解析を開始し、解析結果を 1 分ごとに記録し、カンマ区切りのテキストファイルとして保存する。さらに、現在の時間を示す通信文を定期的に送信する。ソフトウェアは init.xml ファイルの更新を監視し、設定ファイルが更新されると自動的に新しいスケジュールに従う。ソフトウェアの動作方法を図-27 に示す。

設定ファイルである **init.xml** ファイルを作成し、ソフトウェアを起動する。設定ファイルの記載例は図-28 に示す。



起動画面

タスク 1. ソフトウェアが受信した通信文の 1 分ごとの最新の値を記録し、ファイルを作成する。init.xml ファイルに記載した順に記録を残す。

	A	B	C	D	E	F
1	ラベル	内気温南東	内湿度南東			
2	type	InAirTemp	InAirHumid	InAirTemp	InAirHumid	WAirTemp
3	Room/Region/Order/Priority	/1/1/0/10	/1/1/0/10	/1/2/0/1C	/1/2/0/1C	/0/0/0/1
4	IP	/192.168.1.65	/192.168.1.65	/192.168.1	/192.168.1	/192.168.1
5	2008/12/8 18:27	15.8	83	16.4	81	10.5
6	2008/12/8 18:28	15.7	83	16.2	81	10.5
7	2008/12/8 18:29	15.6	83	16.1	82	10.5
8	2008/12/8 18:30	15.6	84	16	83	10.5
9	2008/12/8 18:31	15.6	84	16.1	83	10.5
10	2008/12/8 18:32	15.7	84	16.1	83	10.5
11	2008/12/8 18:33	15.7	84	16.2	82	10.5
12	2008/12/8 18:34	15.8	83	16.3	82	10.5
13	2008/12/8 18:35	16	83	16.4	82	10.4

タスク 2. スケジュールに従って、通信文を送信

以下は図-28 の設定ファイルで動作させた場合の毎日 18 時に送信される通信文

```
<? xml version="1.0" ?>
<UECS>
<DATA type="AOrderTemp" room="1" region="0" order="0" priority="10">12</DATA>
</UECS>
```

タスク 3. 時間を示す通信文を送信。上記ソフトウェア画面の”データ記録時に時間を送信する (1 分間隔)”と書かれたチェックボックスが ON の場合に実施する。

図-27 UECS 用のデータ収集・スケジュール管理ソフトウェアの概要

3) init.xml ファイルの記載方法

init.xml ファイルは XML で記載する。ソフトウェアは設定ファイルのルートエレメントである UECSLOGA エレメントの内容に従って処理を実行する。UECSLOGA エレメントは子エレメントとして、データの収集に関連する事項を記載する LOGADATA エレメントと、通信文を定時送信するための設定を記載した SENDTIME エレメントを含む。

LOGADATA エレメントは記録する通信文の情報を示した DATA エレメントを含む。

DATA エレメントは7つの属性値 (id, ip, label, type, room, region, order, priority) をもつ。id 属性値はソフトウェア内部で使用する値であり、各 DATA エレメントで異なる値を設定する。label 属性値は受信データを表す名前としてデータ保存時に利用される。ip 属性値はデータ送信元の IP アドレスを設定する。type, room, region, order, priority 属性値は、前述した UECS の通信文の属性値である。ソフトウェアは DATA エレメントで記載された順番にデータ系列を作成し、未記載の通信文を受信した場合には、受信した順番に記録を残し、データファイルを作成する。

次に、SENDTIME エレメントは hour, min の属性値を持ち、通信文を送信する時刻を記載する。SENDTIME エレメントは設定時間に送信する通信文の情報を記載した SENDDATA エレメントを含む。

SENDDATA エレメントは、6つの属性値をもつ (ip, label, type, room, region, order, priority)。ip 属性値はデータを送信するアドレスを指定する。アドレス

に” 255. 255. 255. 255” を指定すると、全機器に対して送信を行う。label 属性値はこの通信文の内容を示す任意の文字列を記載する。type, room, region, order, priority 属性値は UECS の通信文の属性値を示す。

設定ファイルの例は図-28 に示した。

b 結果および考察

開発したソフトウェアで、遮光、保温共用のカーテンの動作や暖房機の制御目標温度を定時に変更する処理に使用した。毎日決まった時間に実行または変更する環境制御は、暖房機の変温管理、灌水、カーテンの遮光と保温の切り替えなど数多くある。本ソフトウェアを用いると、複雑な処理でなければ、PC より UECS 導入温室の環境制御を実施可能であると考えられた。また、タイムサーバー機能により、PC の時間と環境制御機器の時間を同期させて、統一的な環境制御を実施可能である。

設定ファイルが更新されると、自動的に新しいスケジュールで環境制御を実施する。設定ファイルを FTP (File Transfer Protocol) などのファイル転送用のプロトコルを利用して更新すれば、温室環境を遠隔操作可能となる。インターネットを利用した環境制御機器の遠隔操作を利用すれば、温室で問題が生じた時の迅速な対処が可能となろう。

UECS は分散型の環境制御システムであり、集中管理型の温室用コンピュータのアナログのデータ伝送とは異なり、デジタル通信を行っている。工業用のデータ伝送にもデジタル通信は利用されるが、通信内容が理解しにくく、通信用のアナライザの必要性が指摘されている

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<UECSLOGA xsi:noNamespaceSchemaLocation="uecsLoga5.xsd" xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
  <LOGADATA>
    <DATA id="1" ip="192.168.1.65" label="内気温南東" type="InAirTemp" room="1" region="1" order="0" priority="10" />
    <DATA id="2" ip="192.168.1.65" label="内湿度南東" type="InAirHumid" room="1" region="1" order="0" priority="10" />
  </LOGADATA>
  <SENDTIME hour="18" min="0">
    <SENDDATA ip="255.255.255.255" label="暖房設定温度" type="AHOrderTemp" room="0" region="0" order="0" priority="10">12</SENDDATA>
  </SENDTIME>
  <SENDTIME hour="6" min="0">
    <SENDDATA ip="255.255.255.255" label="暖房設定温度" type="AHOrderTemp" room="0" region="0" order="0" priority="10">15</SENDDATA>
  </SENDTIME>
</UECSLOGA>
```

図-28 開発したソフトウェアの設定ファイルの記載例

(元吉, 2006). UECS でも, 環境制御機器が正常に作動しているかを確認するために通信文の解析が必要であり, 温室の情報を監視するソフトウェアが開発されている(黒崎ら, 2006). ここで開発したソフトウェアも, 通信内容をファイル化する機能を有し, 温室環境や環境制御機器の動作記録を確認可能である. 収集したデータを表計算ソフトウェアで表示した例を図-27 に示した. また, 開発したソフトウェアによるデータ収集は, 本章2節およびV章で示した実験に使用した.

2 換気率計算ノードの開発

温室の換気率の測定法は, トレーサーガスを使用する方法もあるが, 長期的な測定には熱収支法によって計算する方法が適している. 通常は多機能なデータログを利用し, 複数のセンサを利用して気温などのデータの測定を行い, 換気率を計算する必要がある. UECS を導入した温室では, センサで収集した情報は LAN から収集可能である. そこで, UECS の利用を前提とした, 新たなセンサの導入を必要とせず, マイコン上で換気率を計算し送信するノードを開発した.

a 材料および方法

1) 開発したノードの概要

開発したノード(換気率計算ノード)は動作クロックが 20 MHz の CPU (H 8/3048 F-ONE, ルネサステクノロジー) と LAN コントローラーなどを搭載した UECS 用のマイコンボード (USE, エヌアイシステム) を使用した. 開発環境は GNU C Compiler をベースとした UECS 機器開発用のミドルウェア (EOLUS, エヌアイシステム) を使用した. 換気率計算ノード内の USE で稼働している HTTP (WEB) サーバーが提供するページを利用して, ハウス被覆資材の熱貫流率など, ほとんど変更する必要のない値を入力し, 屋外の気温湿度および日射量, 温室内の気温および湿度, 遮光カーテンの開度は屋外気象ノード, 温室内外気象ノード, カーテン開閉ノードより送信される UECS の通信文から情報を入手するようにした. これらの情報より, 温室の換気率および温室内の蒸発散速度を次節の算法より計算し, 送信する機能を有するノードを開発した. 細霧の噴霧量の決定を支援する情報も同様の方法により送信するようにした. 送信する通信文は UECS の通信規格に則った XML 形式の通信文であり, ノードの IP アドレスの 16520 番ポートからブロードキャストの UDP パケットとして送信された.

2) 温室の換気率と温室内の蒸発散速度の計算方法

VETH 線図作成時の計算方法(三原, 1980)を基本として, 温室の換気率等を算出した. ただし, 遮光カーテンによる遮光率の変化が日射透過フラックスに与える影響と地中への熱流フラックスを考慮して計算を行っている. 具体的には以下の3式を用い, 温室の換気率 q と温室内の蒸発散速度 E の方程式として解を得た.

$$(C_p \rho q + 0.0143 \cdot \kappa \omega) \cdot (T_{in} - T_a) = 0.0143 \cdot R_n - I E - 0.0143 \cdot Q_{soil} \quad (\text{第 4-1 式})$$

$$E = (\chi_{in} - \chi_a) \cdot \rho \cdot q \quad (\text{第 4-2 式})$$

$$R_n = \tau R_s \cdot (1 - C) \cdot (1 - \alpha) \cdot 1000 \quad (\text{第 4-3 式})$$

q : 換気率 ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{min}^{-1}$)

E : 蒸発散速度 ($\text{kg m}^{-2} \text{min}^{-1}$)

C_p : 湿り空気の比熱 ($0.25 \text{ kcal kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) {定数とした}

ρ : 空気の比重 (1.2 kg m^{-3}) {定数とした}

I : 水の気化熱 ($588 \text{ kcal }^\circ\text{C}^{-1} \text{ kg}^{-1}$) {定数とした}

κ : 被覆資材熱貫流率 ($\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) {WEB 画面より値を設定}

ω : 床面積に対するハウス被覆面積の比 {WEB 画面より値を設定}

T_{in} : 温室内外気温 ($^\circ\text{C}$) {UECS の通信より値を収集}

T_a : 屋外気温 ($^\circ\text{C}$) {UECS の通信より値を収集}

R_n : 温室内外純放射 (W m^{-2}) {第 4-3 式より算出}

Q_{soil} : 地表伝熱量 (地中への熱流フラックス) (W m^{-2}) {後述する 1 次比例式で推定. 傾きと切片は WEB 画面上より値を設定}

χ_{in} : 温室内外絶対湿度 (kg kg^{-1}) {UECS の通信より相対湿度と気温の値を収集し第 4-4 式に代入し算出}

χ_a : 屋外絶対湿度 (kg kg^{-1}) {UECS の通信より相対湿度と気温の値を収集し第 4-4 式に代入し算出}

τ : 日射透過率 {WEB 画面より値を設定}

R_s : 屋外日射フラックス (kW m^{-2}) {UECS の通信より値を収集}

α : 温室内外反射率 {WEB 画面より値を設定}

C : 遮光率 {UECS の通信よりカーテンの開度を収集し, WEB 上で設定するカーテン資材遮光率とから算出}

ただし絶対湿度の近似式は以下の式を使用した.

$$\chi = 8.18 \cdot 10^{-6} \cdot H \cdot (0.046 \cdot T^2 - 0.87 \cdot T + 16).$$

5) (第 4-4 式)

χ : 絶対湿度 (kg kg⁻¹)

H : 相対湿度 (%)

T : 気温 (°C)

地中への熱流フラックスは Rn に対する 1 次回帰式を当てはめた。

$Q_{soil} = \text{ConstA} \cdot Rn + \text{ConstB}$ (第 4-5 式)

ConstA : 定数 {WEB 画面より値を設定}

ConstB : 定数 {WEB 画面より値を設定}

なお、第 4-1 式の定数である 0.0143 は W を kcal min⁻¹ に変換するための値である。ノードは 10 秒ごとに受信する最新の値によって温室の換気率と温室内の蒸発散速度を計算し、計算値を 10 秒間隔で LAN 内に送信する。

3) 細霧の噴霧量の決定を支援する値の計算方法

温室内外のエンタルピー差が小さい場合などでは、センサの測定位置やセンサの精度の問題から、換気率や蒸発散速度が負となる場合がある。そこで、これらの 2 値が正の値を示す時に、相対湿度を 100% にするために補充が必要な蒸発速度とそのときの予想気温、WEB 画面より設定する管理目標気温 (細霧目標温度) にするために補充が必要な蒸発速度と噴霧した場合の相対湿度の推定値を算出した。

最初に、相対湿度を 100% にするために補充が必要な蒸発速度とそのときの温室内部気温を計算する。換気率は変化しないと仮定して計算を行う。細霧噴霧時に値が変化するのは、第 4-1 式から第 4-3 式の T_{in} と χ_{in} と E である。ここで、細霧の噴霧によって相対湿度を 100% にする温室内部気温、絶対湿度および蒸発散速度 (細霧の蒸発分を含む) をそれぞれ T'_{in} 、 χ'_{in} および E' とする。第 4-4 式の T、 χ をそれぞれ T'_{in} 、 χ'_{in} におきかえると、以下の式が得られる。

$$\chi'_{in} = 8.18 \cdot 10^6 \cdot 100 \cdot (0.046 \cdot T'_{in}{}^2 - 0.87 \cdot T'_{in} + 16.5) \quad (\text{第 4-6 式})$$

さらに、第 4-1 式から第 4-3 式の T_{in} 、 χ_{in} を、 T'_{in} 、 χ'_{in} と置き換えて、第 4-2 式の χ'_{in} に第 4-6 式を代入し、さらに第 4-1 式の E' に第 4-2 式を代入することで、第 4-1 式は T'_{in} だけの式になるため、 T'_{in} が求まる。一方、 T'_{in} が求めれば第 4-6 式より χ'_{in} が求まり、第

4-2 式より E' が求まる。先に求めた E を E' から減じた値を相対湿度を 100% にするために補充が必要な蒸発速度とし、 T'_{in} とともに 10 秒間隔で LAN 内に送信するようにした。

次に、細霧目標温度にするために補充が必要な蒸発速度とそのときの推定相対湿度を計算する細霧目標温度を T''_{in} とする。温室内部気温を T''_{in} とするように細霧を噴霧した際の温室内部の蒸発散速度 (細霧の蒸発分を含む) と、絶対湿度および相対湿度をそれぞれ、 E'' 、 χ''_{in} および H'' とした。第 4-4 式の T、 χ 、H をそれぞれ T''_{in} 、 χ''_{in} 、 H'' におきかえると、以下の式が得られる。

$$\chi''_{in} = 8.18 \cdot 10^6 \cdot H'' \cdot (0.046 \cdot T''_{in}{}^2 - 0.87 \cdot T''_{in} + 16.5) \quad (\text{第 4-7 式})$$

さらに、第 4-1 式から第 4-3 式の E、 T_{in} および χ_{in} の部分を、 E'' 、 T''_{in} と χ''_{in} と置き換えて、第 4-2 式の χ''_{in} に 4-7 式を代入し、第 4-1 式の E' に第 4-2 式を代入することで、第 4-1 式は H'' だけの式となり、 H'' が求まる。 H'' が求まると第 4-7 式より χ''_{in} が求まり、さらに第 4-2 式より E'' が求まる。E' から E を減じた値を、細霧目標温度にするために補充が必要な蒸発速度として 10 秒間隔で送信した。E' が先に求めた E' 以上になる場合もあるが、その場合、温室内部の補充による蒸発速度の最大値は E' から E を減じた値であると確認可能であり、細霧目標温度にするために補充が必要な蒸発速度は補正をせずに送信した。なお計算により H'' は 100% を超える場合もあるがその場合は予想相対湿度を 101% として WEB 画面上で表示した。

4) 換気率計算ノードからブロードキャスト送信される情報

開発したノードを LAN に接続すると、換気率は、通信文の DATA エレメントの type 属性値が VentiRate の通信文を受信可能になる。type 属性値は蒸発散速度では EvapoRate となり、相対湿度を 100% にするために補充が必要な蒸発速度、そのときの予想室内気温、および細霧目標温度まで冷却するために補充が必要な蒸発速度ではそれぞれ UseMistMaxVol、UseMistMinTemp、MistAddEvapo となる。

5) 換気率計算ノードの WEB ページから確認できる情報

トップページでは、換気率等の情報と、値を計算してからの経過時間が示される (図-29)。また、ノードが収集

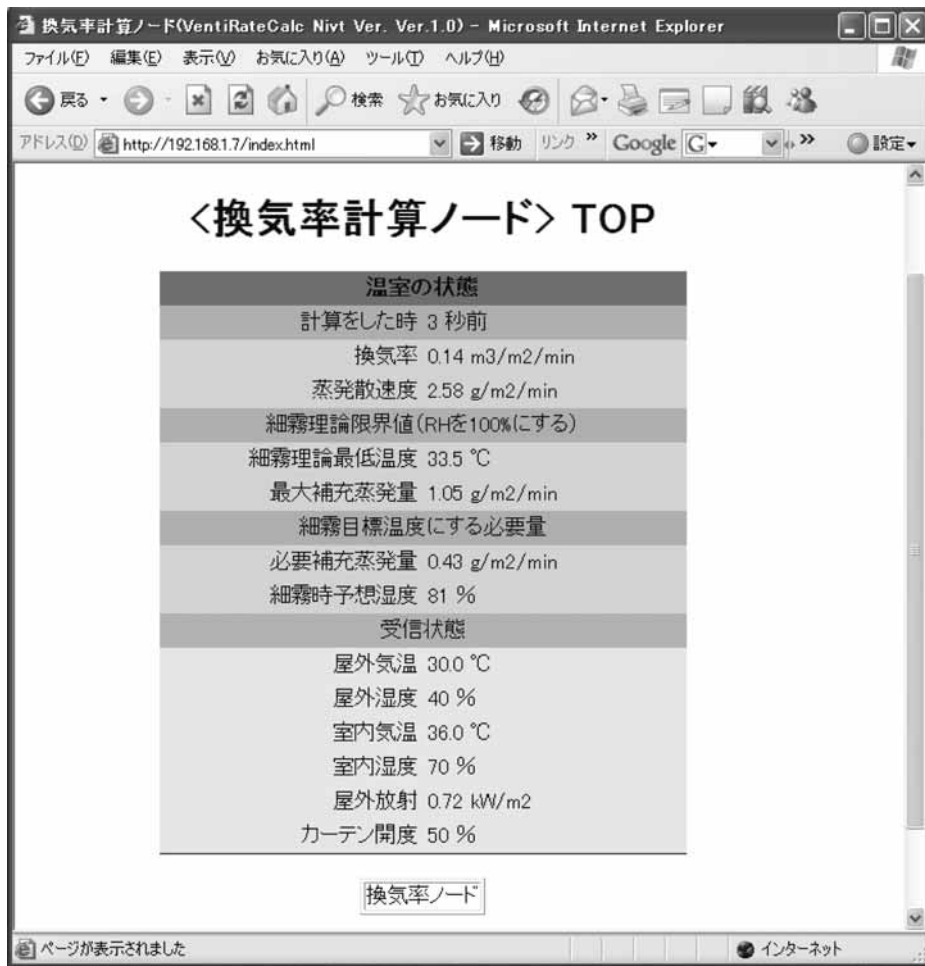


図-29 換気率計算ノードの http サーバーにアクセス時に表示されるトップページ
開発したノードの IP アドレスは 192.168.1.7 に設定した場合を表示している。

した通信文の情報（屋外気温など）が WEB ページで確認可能である。なお、画面上の通信文の情報は最新の情報が示されるため、換気率等を計算した情報と異なる。

設定画面のページによりハウスの特性などの基本的な情報を入力する（図-30）。カーテンは、1層カーテン、1軸2層カーテン、カーテンなしの3種類が設定可能である。細霧目標温度に入力された値に温室内の気温を制御するために補充が必要な蒸発速度をノードは計算し送信する。地中への熱流フラックスの近似式は、地中への熱流フラックスが温室内の日射量と比例すると仮定して熱収支式に反映させる機能を持たせた。当研究所の温室において、植物のほとんどない状態で、2008年の6月に地中への熱流フラックス（地表から1cm）と温室内の日射とを調査した結果、第4-5式の定数は ConstA が 0.29, ConstB が -13.9 であった ($R^2 = 0.87$)。地中への熱流フラックスを考慮しない場合は各定数に 0 を代入し、定数としたい場合には ConstA を 0 とし ConstB に

値を入力する。

b 結果および考察

換気率計算ノードを愛知県武豊町にある野菜茶業研究所の UECS 導入温室（南北長さ 36 m × 東西長さ 27 m × 軒高 3.5 m）に、2008年6月15日に設置し、6~18時まで換気率等の受信状況を調査した。気温、湿度、屋外日射の測定は UECS 対応の気象観測ノードが、それぞれ、サーミスタ、湿度センサ (TA 503, トウプラスエンジニアリング)、日射センサ (JSS-200, 日本オペレーター) を利用して行った。温室内ではハイワイヤー誘引でトマトが栽培され、温室の約 75 % に誘引高さ 2.2 m に達する植物体が存在した。

1分ごとに受信した通信文のうち温室の換気率、温室内の蒸発散速度および相対湿度 100% にする細霧を噴霧した場合の予想気温を図-31 に示す。なお、換気率または蒸発散速度が負の場合のデータはのぞいた。比較的

換気率計算ノード (VentRateCalc Nivt Ver. 1.0) - Windows Internet Explorer

http://192.168.1.120/Setpoint/set0.html

2009/1/26 14:58

TOP 設定 ノード情報

〈換気率計算ノード〉各種設定

ハウス設定

被覆面積/床面積 2.6

被覆日射透過率 0.54

床日射反射率 0.15

被覆資材熱貫流率 6.0 W/m2/K

カーテン種類 1軸2層

カーテン資材光透過率 50 %

細霧設定

細霧目標温度 23.0 °C

地中への熱流(Qsoil)近似式

$$Q_{soil}(W/m^2) = ConstA \times Rin(W/m^2) + ConstB$$

$$Rin = CrThr \times Rout \times ThrR \times (1 - RefR)$$

(CrThrカーテンによる遮光程度 Rout屋外日射量 ThrR被覆日射透過率 RefR床日射反射率)

ConstA 0.44

ConstB -16.4

設定書込 入力リセット

図-30 換気率計算ノードの換気率を計算するための設定値入力ページ
カーテンの種類は、カーテン未使用、1軸1層、1軸2層の3種類に対応し、カーテンの開度は温室内への日射の透過量のみに影響を及ぼすとして計算を実施する。地中への熱流(Qsoil)近似式は、ページ上の近似式によって計算を実施した。

天窓開度が大きくなった午前には換気率が上昇し、日射量が大きく植物からの蒸発散が盛んになると考えられる日中に蒸発散速度が高くなるなど、WEBで設定する値は一般的なものを使用したが、おおむね想定される変化をノードは送信した。細霧によって低下可能な気温は換気率が高い時間帯に大きくなった(図-31 C)。細霧の噴霧によって低下可能な気温は屋外の湿球温度であり、妥当な変動を示していると考えられる。熱収支法による換気率測定では測定高さによって値が異なり、測定位置が低い場合に値が高くなるのが指摘されている(林ら, 2003)。UECSでは気温および湿度の平均値を算出して送信するノードも開発されているため、このノードを活用することも考えられる。

なお、ここでは、被覆資材の日射透過率、床面の日射反射率および被覆資材の熱貫流率にそれぞれ、0.7、0.15、

および $5.8 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ min}^{-1}$ とし、地中への熱流フラックスは考慮しないで算出した結果である。特に植物の生育状況で値が変化すると思われる地中への熱流フラックスなどは、今後、実験において明らかにしていく必要があり、実験結果をWEBで設定する値に反映させていくことで、計算精度の向上が可能と考えられる。

開発したノードはUECSを導入し、所定のセンサの情報を受信できれば、リアルタイムに換気率や細霧の噴霧に関する情報を送信する。従来開発されたソフトウェアを用いることで、同様の情報を得ることは可能である(福田ら, 2004)。また、リアルタイムに換気率等を計算して、細霧を噴霧させることも可能である(Handartoら, 2006; Handartoら, 2007)。しかし、遮光カーテンの作動状況を換気率に反映させることは不可能ではないが、非常に大きな労力を要する。本ノードは遮光カー

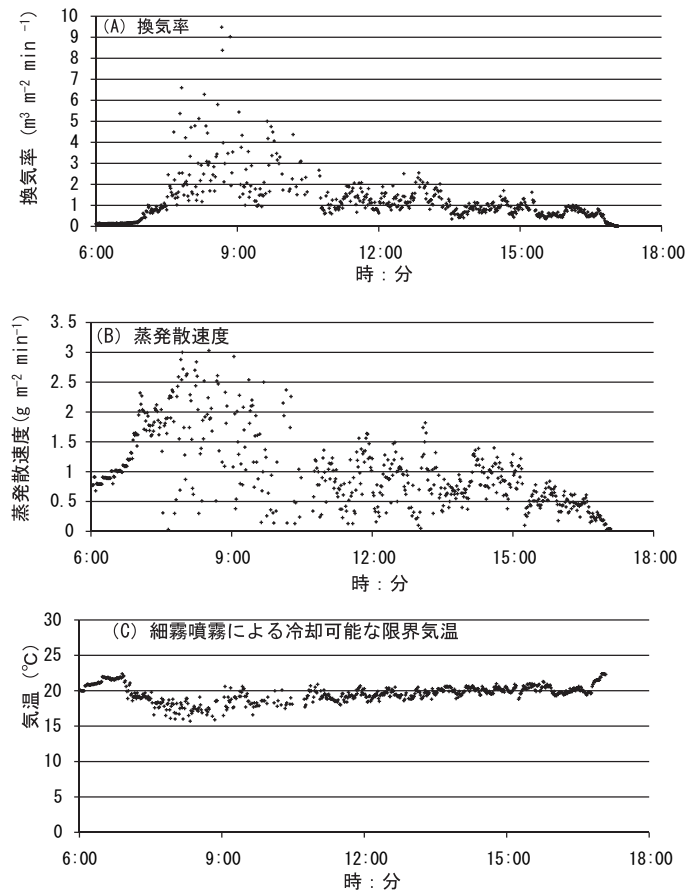


図-31 換気率計算ノードから発信される (A) 換気率 (B) 蒸発散速度 (C) 細霧噴霧による冷却可能な限界気温に関する通信文の1分ごとの受信状況

2008年6月15日における床面積972m²軒高3.5mの温室での測定結果。データは1節で示したソフトウェアによって収集した。

テンの動作状況を温室内への日射量に反映させることが可能であり、しかも、UECSのシステムの情報を用いて計算を行っているため、LANに接続するのみで情報を入手することが可能である。

細霧噴霧装置がtype属性にUseMistMaxVol, MistAddEvapoを含む通信文を受信し、解釈する機能を持てば噴霧量を決定可能であろう。また、細霧噴霧装置未導入の温室でも、開発したノードを接続し、通信文を定期的に収集することで、必要な細霧噴霧量を推定することが可能で、細霧の導入を検討している場合には利用価値がある。

一方、情報の正確さは、UECSに接続したセンサの精度や測定方法等によって大きく左右される。特に湿度センサは測定誤差が大きいものが多いため、高品質のものを用いる必要がある。細霧を噴霧している温室では、気温センサの濡れも考慮する必要がある。

センサによる測定精度が低い場合や熱収支式の定数項

の誤り、温室内外の気象条件の急激な変化などによって、換気率や蒸発散速度が負となる場合がある。計算のもとになる情報は10秒おきの瞬時値を利用しているため、その程度の時間内に気象条件が急激に変化する場合にも、値が不正確になる可能性がある。また、温室の換気率が大きく、温室内外のエンタルピの差が小さい場合には、熱収支法による換気率の計算法の特徴から、計算値が負となる可能性が大きくなる。そのような場合でも開発したノードは送信を行う仕様としてあり、不適切な値が送信される場合には、温室内外の気象条件の測定方法の改善や定数の変更を検討することでより正確な計算が可能であると考えられる。

細霧の噴霧量の決定に乾湿球温度を用いることも考えられる。ただ現在、UECSで湿球温度を示す通信文が定まっていないため、相対湿度に換算してLANに送信する必要がある。

3 総合考察

本章では、自律分散型の環境制御システムである UECS での利用を想定した、データ収集・スケジュール管理ソフトウェアと換気率計算ノードの開発を示した。

データ収集・スケジュール管理ソフトウェアは、温室内の環境制御の情報を記録するために有用で、2節で開発したノードの通信文の内容を記録した。開発したソフトウェアとノードを利用することで、換気率等の情報収集が容易となると考えられる。

換気率を PC で計算して送信する方法も考えられる。しかし、開発したノードは電源と LAN に接続するだけで使用可能であり、PC を利用できない環境でも、換気率に基づいた環境制御を可能とする。換気率は、細霧を噴霧する際に重要な指標となるほか (Handarto ら, 2007)、Ⅲ章で示した根圏冷却を実施するときにも、有用な情報である。温室内の空気中で潜熱による根圏冷却を実施すると、その効果は換気率に影響される。もし、十分な冷却効果がない場合には、換気率をモニターし、温室の換気が十分であるか検討する必要がある。また、換気率のモニターは、省エネルギーの観点からも重要である。例えば、換気窓をすべて閉め切った場合には、隙間換気率が測定できる。隙間換気率が大きい温室は、暖房時に換気によって屋外に放出されるエネルギーが大きく、隙間換気率を低下させる対策が必要であろう。開発したソフトウェアとノードを有効活用することで換気率を簡単に測定できる利点は大きいと考えられる。

4 摘要

自律分散型の複合環境制御システムである UECS を利用した、データ収集・スケジュール管理ソフトウェアと換気率計算ノードを開発した。UECS では環境制御機器の持つ情報は LAN から入手可能で、LAN に通信文を送信することで環境制御が可能である。そこで、UECS 導入温室で、設定ファイルに記載されたスケジュール通りに環境制御を実施し、環境制御機器が送信する通信文の内容をファイル化するデータ収集・スケジュール管理ソフトウェアを開発した。このソフトウェアを利用することで、変温管理など定時に実行する環境制御を実施し、同時に環境制御機器の動作状況を記録することが可能となった。また、温室内外の気象情報を入手し、熱収支法により換気率や温室内の蒸発散速度を計算するノードを開発した。開発した機器を利用することで、必要なセンサが備わった温室では換気率に関する情報を容易に入手可能となった。

V トマトの生育環境改善のための細霧噴霧と換気の協調制御手法の開発

わが国の高温期で温室全体の気温を低下させる手法は、ヒートポンプ、潜熱、地下水の利用の大きく3つに大別される (林, 2003)。ヒートポンプを利用して日中 $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^2$ に達する日射の影響を取り除くには、大がかりな装置が必要となる。そのため、ヒートポンプによる冷却は高付加価値の作物での利用に限定される。地下水による冷却は、豊富な地下水が得られる場所にその利用が限定される。そのため、日中の冷却には潜熱を利用する方法が有効であろう。

温室の潜熱による冷却法として、パッドアンドファン法がある (Carpenter ら, 1957; 中川, 1967)。パッドアンドファン法では温室片側側壁に水を滴下してぬらしたパッドを設置し、もう片方の側面に温室内から屋外に送風するファンを取り付ける。取り付けたファンによって温室内を陰圧にし、外気がパッドから通過するようにして、冷却された空気が温室内に入ることによって温室内気温を低下させる方法である。しかし、この方式の利用は導入コストがかかること、温度ムラが生じやすいことからわが国での一部に限定されている。

そこで、三原ら (1972) は細粒の水を温室内に噴霧し、その潜熱で冷却する手法を開発した。水を噴霧するノズルを温室上部に設置し、粒径の細かい水をコンプレッサによって噴霧する方式で比較的容易に導入、実施することが可能である。これまで細霧の使用により、シクラメンでは生育促進 (片岡ら, 2001)、キュウリでは収量増加 (松沼, 2006) やシンビジウムでは開花促進 (大澤ら, 2000) の効果が示されている。

しかし、細霧噴霧時の温室内の気温の変化は複雑である。片岡ら (2000) は、細霧の噴霧実験を行い、噴霧量がすべて温室内で蒸発したと仮定すると気温の低下は 5°C 程度であるが、実際は、 1°C であったことを報告している。換気によって屋外へ流出する細霧の量が多くなった可能性を指摘しており、温室内外の気象条件、特に屋外の風向風速、循環扇の有無、温室内外の栽培条件などに換気率が影響を受け、換気窓の状態が等しい温室でも換気率は異なる。また、細霧噴霧時に必要以上に多湿になることを嫌うため、換気窓は全開で使用される例が多い (大澤ら, 2000; Handarto ら, 2007; 林ら, 1998)。近年では、温

室内を冷却するために、温室内外の熱収支から換気率を計算し、換気率をもとに細霧の噴霧量を決定する手法の検討も行われているが (Handarto ら, 2006; Handarto ら, 2007), さらに効率的に冷却を行うためには、換気を制御することが重要であろう。

一方、細霧の噴霧は低温期の温室の湿度調節にも利用可能である。園芸生産にとって、湿度の調節は重要で、メロンの栽培では日中 $80 \pm 5\%$ と比較的高い相対湿度が適していること (鈴木ら, 1986), レタスを土耕と水耕で栽培した場合に、相対湿度を 85% とすると 50% で栽培した場合よりも生育が良好であったことが報告されている (Tibbits ら, 1976)。作物葉で効率よく光合成を実施させるには、 CO_2 の吸収を高めるため、気孔開度を高める必要があり、相対湿度は高い方がよいとされる (矢吹ら, 1970)。低温期の細霧の噴霧は、気温の低下を招くため、気温と相対湿度のバランスを保つために換気を制御する必要がある。

そこで、高温期は冷却を目的とし、低温期には温室内の気温と湿度を植物の生育に適した条件とすることを目的として、自然換気温室での細霧噴霧と換気との協調動作手法を開発した。低温期の気温湿度同時制御法の検討を1節で示し、高温期の冷却を2節で示すこととする。

これらの環境制御を取り入れて、トマトの長期多段栽培を実施し、初期収量と生育に及ぼす影響を調査した。

オランダのトマトの収量は1975年には10 a 当たり15 t で日本よりわずかに低かったが、1984年には32 t、1996年には51 t まで増加した (糠谷, 2004)。近年では65 t に達しているという報告もある (高倉, 2008)。現在の日本のトマトの収量が20~30 t 程度で、オランダより収量はかなり低い。オランダでは高軒高ハウスを利用し、収量性の良い品種を使用し (佐々木, 2008)、 CO_2 施用を実施し、循環式のロックウール栽培システムで多収を実現している (鈴木, 2006)。日本は夏期高温であるため、オランダの環境技術をそのまま導入しても、収量を高めることができない。そのため、日本独自の多収生産技術を確立することが求められている。

その中で細霧を利用し、夏期の高温対策や、湿度調節を実施することは重要であろう。これらの個別技術と収量との関連を明らかにすることも必要であるが、潜熱を利用した環境制御技術は CO_2 施用や夜間のヒートポンプによる冷却処理など他の環境制御技術と同時期に利用される。そのため、トマトの多収生産を実現する多くの環境制御技術の一つとして、潜熱を利用した環境制御を位置づけ、実施したすべての環境制御がトマトの収量に

及ぼす影響を評価することも重要である。

そこで、細霧噴霧と換気との協調制御を実施し、 CO_2 施用やヒートポンプによる冷却を利用した環境制御が、トマトの長期多段栽培での初期収量に及ぼす影響を3節で検討した。

1 気温湿度同時制御のための細霧噴霧と換気との協調制御手法の開発

細霧の噴霧は、湿度調節に利用可能である。しかし、相対湿度を目標に細霧を噴霧すると潜熱の影響で気温が低下し、制御目標とする気温より低下してしまう。そのため気温と湿度を同時に制御するための指標が必要となる。そこで、エンタルピを指標として天窓の開度を制御し、細霧の噴霧により気温と湿度を同時制御する手法の検討を行った。

エンタルピは湿り空気の状態と顕熱の和を示す。加湿冷却を実施すると、気温と相対湿度は湿り空気線図では湿球温度線上を移動するが、このときにエンタルピはほぼ変化しない。つまり、換気により目標とする気温と相対湿度に相当するエンタルピに温室内の空気を調整し、その後目的とする相対湿度まで細霧を噴霧すればよく、エンタルピを換気の指標として用いることは合理的である。

そこで、UECS 導入温室で、エンタルピを換気の制御目標値とし、細霧の噴霧処理により目的とする温室内の気温湿度に調整する手法を開発し、その有効性を検証した。

a 材料および方法

1) 実験温室の概要

実験には愛知県武豊町にある UECS を導入した床面積 162 m^2 および被覆面積が 421 m^2 の南北棟の温室 (PO 系フィルム被覆鉄骨ハウス (東西幅 9 m × 南北長さ 18 m × 軒高 4 m)) を利用した。温室は柱幅 9 m 、上部の屋根は2山構造で、各棟に天窓開閉装置を1台ずつ装備し、温室の側面部に巻き上げ式の換気窓開閉装置を設置した。細霧のノズルの合計は20個で、噴霧能力の合計が $14.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$ となる細霧噴霧装置 (FG-2, マツサカエンジニアリング) を装備した。温室内の空気を均一にするため、高さ約 3.5 m 地点と地表部に設置したそれぞれ2機ずつの循環扇を常時作動させた。天窓開閉装置、側窓開閉装置、温室内外の気象センサ、細霧噴霧装置は、各々に UECS マイコン基板を搭載した UECS 対応の環境制御機器とした。環境制御機器の制御は、PC を利用した集中管理で実施した (図-32)。

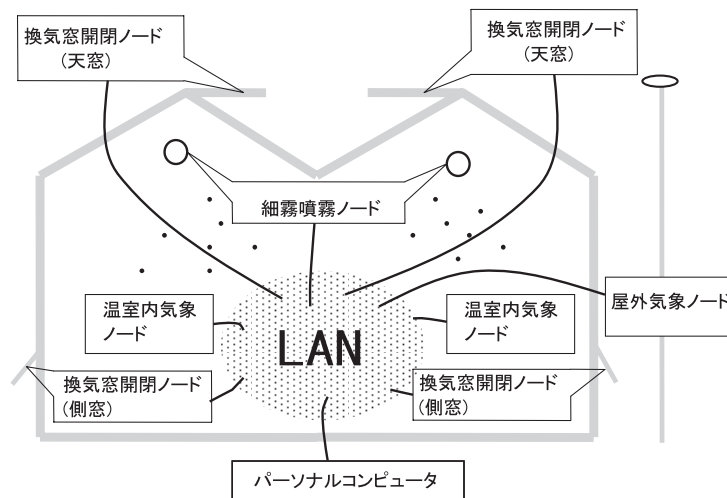


図-32 温室内の気温湿度同時制御に使用した UECS のノード

通信文を受信し PC によって解析し、天窓の開度調節と細霧の噴霧を実施する通信文を送信して環境制御した。温室内外気象ノードでは気温と相対湿度を、屋外気象ノードでは気温、相対湿度、風速、日射、降雨に関する情報を送信した。

2) 天窓開度および細霧噴霧の決定方法

天窓開度は全開を 100 %、全閉を 0 %としたときの開口部面積を 10 %刻みであらかじめ測定し、制御も 10 %単位で行った。側窓ノードでは頻繁に動作させると実際の開口部面積と LAN で送信される開度のずれが大きくなるため、10%の固定とした。天窓開度が 0 %の時には開口部面積が 2.6 m²、開度が 100 %の時は 26.4 m²として計算を行った。

また温室内 2 か所の高さ 1.5 m 地点に通風した温湿度センサを設置し、センサの値の平均値より温室内の空気のエンタルピを計算し、天窓開度の決定を行った。エンタルピの制御目標値は 60 kJ・kg⁻¹としたが、温室内の気温が 23°Cの時に相対湿度が 83%、24°Cの時に 76%となる値であり、トマトの温湿度環境としては好適と考えられる。天窓開度を決定するために、熱収支式により、温室の換気率を計算した。換気率(q)は温室内外のエンタルピ (I_{in}, I_a) および温室内外の気温 (T_{in}, T_a)、温室内外透過日射量(Q_{solar})、被覆資材の熱貫流率(w)、ハウスの被覆面積と床面積の比 (k)、地中への熱流フラックス (Q_{soil})、空気の比重 (p) より以下の式を利用して決定した。なお、T_{in}、T_a、Q_{out}は UECS の LAN から受信した値を利用し、I_{in}と I_aは、温室内外の相対湿度と気温から計算により算出した。

$$I_{in} = I_a + (Q_{solar} - Q_{soil} - (T_{in} - T_a) \cdot k \cdot w) / (p \cdot q) \quad (第 5-1 式)$$

ただし、

$$k : 2.6$$

$$w : 6.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$p : 1.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$$

実験開始前に温室内の地上からの高さ 4 m 付近に上向きおよび下向きに設置した日射計の値の比から床面反射率 (r) を、上向きに設置した日射計と屋外の日射計の値 (Q_{out}) の比より被覆資材光透過率 (t) を算出し、Q_{solar}を以下の式によって求めた。

$$Q_{solar} = t \cdot (1 - r) \cdot Q_{out} \quad (第 5-2 式)$$

ただし、t : 0.69; r : 0.22

Q_{soil}は Q_{out}に対する以下の一次回帰式を当てはめて計算を行った。

$$Q_{soil} = 0.25 \cdot Q_{out} - 14.6 \quad (第 5-3 式)$$

なお、第 5-3 式の一次回帰式の定数は 2008 年 10 月 4 日～7 日に温室床 1 cm 下に埋め込んだ熱流板の測定値と屋外日射量の 1 次回帰式 (R² = 0.82) によって定めたものである。

換気率を計算後、第 5-1 式の I_{in}を 60 kJ・kg⁻¹として換気率 q'を計算し、q'と q の比と現在の天窓開度より I_{in}が 60 kJ・kg⁻¹に最も値が近くなる天窓開度を決定した。

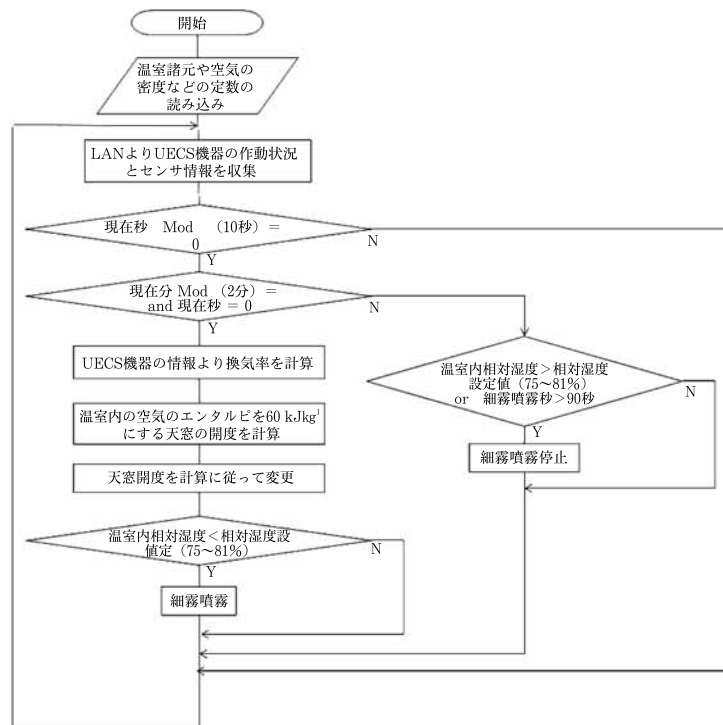


図-33 気温湿度同時制御のための換気および細霧噴霧制御アルゴリズム

表-16 気温湿度同時制御を実施した温室内と屋外のエンタルピ, 気温および相対湿度

日付 月日	エンタルピ		気温		相対湿度	
	温室内 (kJ・kg ⁻¹)	屋外 (kJ・kg ⁻¹)	温室内 (°C)	屋外 (°C)	温室内 (%)	屋外 (%)
11/1	60.3 ± 3.3	37.0 ± 0.6	23.6 ± 1.0	19.8 ± 0.5	78.7 ± 3.1	46.7 ± 2.6
11/2	60.2 ± 3.0	37.9 ± 1.3	23.5 ± 0.9	19.6 ± 0.9	79.2 ± 2.8	51.1 ± 3.4
11/3	57.7 ± 4.6	42.2 ± 1.5	21.4 ± 1.7	18.0 ± 1.1	88.5 ± 3.4	74.4 ± 4.6
11/4	60.4 ± 4.0	38.8 ± 0.5	23.5 ± 1.2	19.6 ± 0.6	79.3 ± 2.6	52.9 ± 3.8
11/6	60.1 ± 2.7	43.1 ± 3.1	23.4 ± 0.9	20.5 ± 1.1	79.4 ± 3.3	59.0 ± 2.6

表中の各値は実験を行った各日の10時から14時の平均値±標準偏差。

開口部面積は換気率に比例するとして計算を行った。

天窓開度の決定は2分間隔で行い、同時に細霧の噴霧を行った。細霧は2カ所の相対湿度の平均値で制御した。相対湿度の制御目標値は10時から14時の各時刻の0~20分は75%、20~40分は78%および40~0分は81%とした。その後10秒おきに相対湿度の平均値が、制御目標値を上回るか、細霧噴霧から90秒以上経過した場合に噴霧を停止した。ここで示した細霧の噴霧方法と天窓開度の決定方法は図-33で示した。

実験期間は2008年11月1日から11月6日とし(ただし、11月5日は除く)、10秒おきにUECSの各機器から送信されるセンサや環境制御機器の作動情報を、IV

章1節で示したソフトウェアを10秒おきに記録可能なように修正して収集し、実験結果の解析に用いた。

b 結果および考察

実験を行った5日間のうち、降雨があった11月3日以外の4日間は実験期間中のエンタルピの平均値は60 kJ・kg⁻¹付近の値となった(表-16)。屋外のエンタルピは37.1から43.1 kJ・kg⁻¹で、温室内より低かった。また、11月3日以外は、温室内の気温と相対湿度は23.4~23.6°C、78.7~79.4%となったが、屋外ではそれぞれ19.6~20.5°C、46.7~59.0%となり温室内よりも低かった。

11月2日のエンタルピは屋外では徐々に上昇し、温

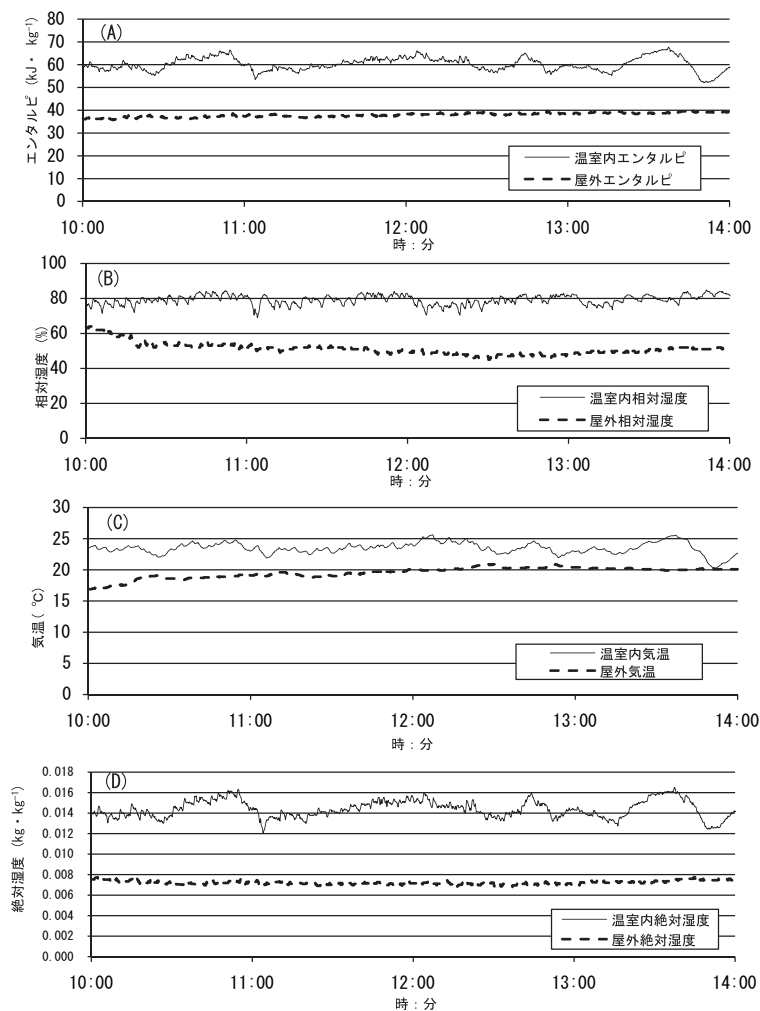


図-34 気温湿度同時制御を実施した温室内と屋外のエンタルピ，相対湿度，気温および絶対湿度の変化（2008年11月2日）

室内では短い周期で変動した（図-34 A）。温室内の相対湿度は各時刻の0～20分，20～40分および40～60分の平均値は77，79および82%となり，制御目標が高いほど温室内の相対湿度は高くなったが（図-34 B），気温（図-34 C）とエンタルピ（図-34 A）には一定の傾向がなかった。温室内の絶対湿度は0.012～0.016 kg・kg⁻¹で（図-34 D），エンタルピの変化と似た傾向を示した。屋外の絶対湿度は温室に比べて低く0.007～0.008 kg・kg⁻¹であり，値の変動が小さかった。

換気率は1.0 m³・m⁻²・min⁻¹以下となった（図-35 A）。天窓開度は0～50%の範囲で変動した（図-35 B）。ただ，天窓開度と換気率との間に一定の関係はなかった。日射量の最大値は約0.7 kW・m²となったが13時以降は，0.3 kW・m²程度と低くなった（図-35 C）。屋外の風速は実験開始時には2 m・sec⁻¹以下であったが，13時以降は2 m・sec⁻¹以上となった（図-35 D）。

天窓開度を調整するための制御目標値をエンタルピとし，換気率は開口部面積に比例するとして，換気を調整したが，ほぼ目的値（60 kJ・kg⁻¹）に制御可能であったため，ここで用いた数式や定数により制御することは，実用的に妥当な方法であることが実証できた。また，相対湿度が75～81%に達するまで細霧を噴霧したが（図-34 B），平均値はその値より1～2%高くなったが，ほぼ目標通りの相対湿度に調整できた。このことから，エンタルピを換気の制御目標値とし，細霧の噴霧で相対湿度を調節する手法を利用することで温室内の気温と相対湿度を同時に制御可能と考えられた。

レタスを気温20℃で相対湿度を85%と50%として土耕と水耕を行ったところ，相対湿度85%で生育させた方が，葉数や葉面積が増加し，植物体のFW，DWとも大きくなると報告されている（Tibbittsら，1976）。トマトでは約75%の相対湿度が果実への乾物の分配に適

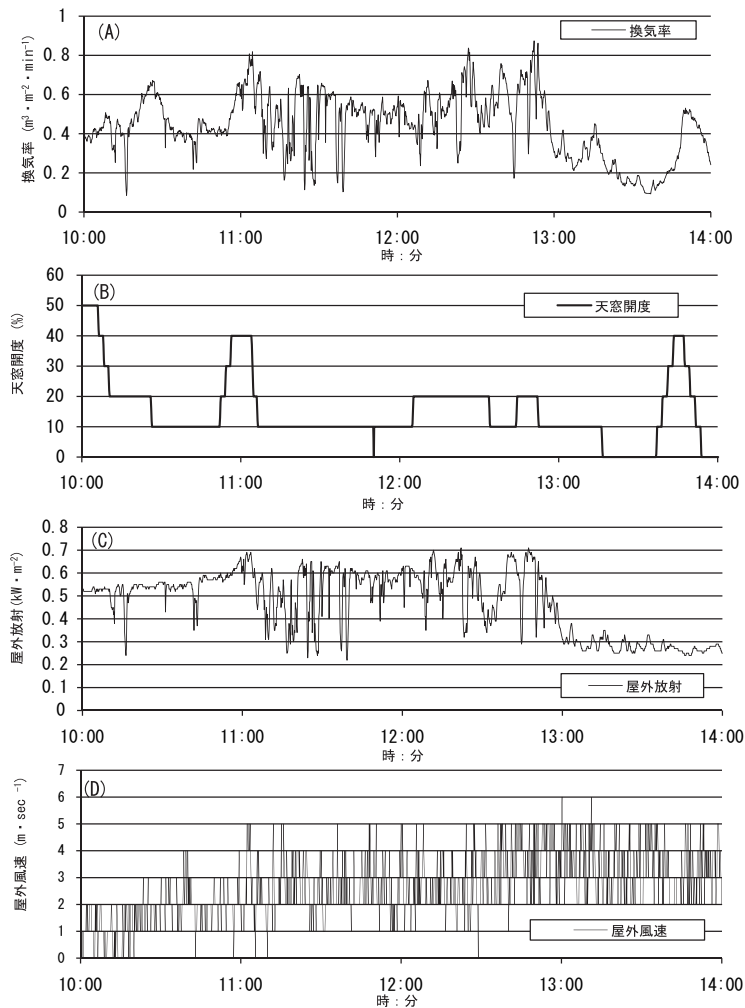


図-35 気温湿度同時制御を実施した温室の換気率と天窗開度，屋外放射，屋外風速の変化（2008年11月2日）

しているという研究や（須藤ら，1975），春期には高湿度でトマトの商品果の割合が増加するという報告もある（Lipton，1970）。また，キュウリの葉で，相対湿度と風速の関係を調査したところ，ある程度以上の風速では相対湿度が50%より85%で光合成量が増加することが報告されている（矢吹ら，1970）。光合成による物質生産の点から気温と相対湿度を制御することの意義は大きいと考えられる。

平均値ではエンタルピは，制御目標値に近い値となったが（表-16），1日の計測データでは，屋外のエンタルピの変化に比べ変動が大きくなった（図-34 A）。気温は屋外の日射量が低下した13時以降に20℃近くまでしばしば低下したが，それ以外の期間はおおむね22～25℃程度で推移した（図-34 C）。今回，2分ごとに換気率を計測し調整を行ったが，変動幅を小さくするためにはより短い間隔で天窗の開度を調整する必要があると思われる。

また，今回の実験では気温と湿度を同時制御したため換気率が $1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ 以下とかなり低く維持された（図-35 A）。細霧によって湿度制御を行うことで，換気率を低く抑えられるため，CO₂施用が効率的に実施できると考えられる。今後，細霧による湿度制御を実施した温室での，効率的な光合成促進法を検討する必要がある。

2 冷却のための細霧噴霧と換気との協調制御手法の開発

高温期に細霧によって温室内を冷却する際には，気温を最大限低下させたいという場合がほとんどであろう。そのためは，冷却した空気を必要以上，屋外に排出しないように換気する必要がある。そこで，高温期の細霧噴霧と換気との協調制御による温室内の冷却法を開発した。

a 材料および方法

1) 高温期の換気窓開口部面積が細霧噴霧時の気温と湿度に及ぼす影響 (実験 1)

実験は 2008 年 7 月 30 日に 1 節の実験温室で実施した。床面積に対する換気窓の開口部面積の比率を 6.3% (開度 (小)), 12.2% (開度 (中)), 31.7% (開度 (大)) とする処理を 11 時から 15 時まで 20 分ごとに合計 4 回実施した。各処理での天窓と側窓の開口部面積と換気窓の開度は表-17 に示した。細霧の噴霧は 2 分ごとに 90 秒とした。高さ 1.5 m に設置した。温室内気象ノード 2 カ所と屋外気象ノード 1 カ所からの通信文を解析し、通風筒内の気温と湿度を 1 分ごとに記録した。また、屋外日射量、風速も記録した。処理期間のうち後半 10 分間のデータの平均値により処理の効果を評価した。また、実験期間中は温室内に植物が無い状態であった。

2) 高温期の細霧噴霧時の換気窓開度の調整が温室内の気温および湿度に及ぼす影響 (実験 2)

実験は 2008 年 9 月に実施した。実験温室では 8 月 29 日に、ロックウールスラブに定植を行ったトマトの栽培中であった。環境制御を実施する基本的な周期は 2 分とし、細霧噴霧の開始と天窓開度の調節を実施した。降雨が無く、温室内気温が制御目標値の 23℃より高い場合は、温室内外の気温、相対湿度および屋外の日射量から熱収支法により、温室の換気率と蒸発散速度を算出した。換気率と蒸発散速度とも正の場合と、いずれかが負の場合で制御方法を変えた。なお、換気率の算出は前節で示した方法で行い、蒸発散速度は次式の計算式で算出した。

$$E = (X_{in} - X_a) \cdot q \cdot \rho \quad (\text{第 5-4 式})$$

ただし X_{in} , X_a は温室内および屋外の絶対湿度、 q は換気率、 ρ は空気密度を表す。

換気率と蒸発散速度が正の場合は、気温を制御目標値と

表-17 換気窓の開口部面積と換気窓開度 (実験 1)

処理	開口部面積 (m ²)		換気窓開度 (%)	
	天窓	側窓	天窓	側窓
開度 (小) ^z	2.2	8.08	10 ^y	30
開度 (中)	11.8	8.08	50	30
開度 (大)	23.7	27.7	100	100

^z: 各処理は午後 11 時より 20 分ごとに順番に実施した。

^y: 各換気窓開閉ノードに換気窓の開度を設定した値。

するために必要な温室内の蒸発散速度 (細霧の蒸発分を含む) を計算し、計算値から現在の蒸発散速度を減じた値を補充が必要な蒸発速度とした。補充が必要な蒸発速度の細霧を噴霧すると、相対湿度が 100% を上回る場合 (温室内の湿度が高すぎて、必要な細霧を噴霧することができない状態) も生じる。この場合には、補充が必要な蒸発速度は相対湿度を 100% にするために必要な速度とし、天窓開度を 10% 増加させた。細霧の噴霧時間 (S_{sec}) は補充蒸発散速度 (E_{add})、温室に設置した細霧噴霧装置の最大噴霧速度 (E_{max})、細霧の有効気化率 (e) より、以下の式によって算出した。 e は三原 (1980) の暫定値を用いた。

$$S_{sec} = E_{add} / E_{max} / e \times 120 \quad (\text{sec}) \quad (\text{第 5-5 式})$$

ただし、 $E_{max} : 14.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, $e : 0.8$ とし、 S_{sec} の最大値は 90 とした。

また、温室内が設定目標の相対湿度の下限値である 75% を下回ったときには、天窓開度を 10% 下げる処理を実施した。細霧は S_{sec} 秒が経過した後、停止させた。

換気率が蒸発散速度が負で、相対湿度が 90% 以上および 75% 以下のときには、それぞれ天窓開度を 10% ずつ増加、減少させる処理をおこなった。細霧の噴霧時間は 90 秒固定とした。

これらの処理により、相対湿度を 75 から 90% の間を維持するように試みた。処理方法を図-36 に示す。

b 結果および考察

1) 高温期の換気窓開口部面積が細霧噴霧時の気温と湿度に及ぼす影響 (実験 1)

実施期間中の温室内外の気象条件の変化を図-37 に示す。屋外の気温は、最高が 34.6℃、最低が 31.5℃で、温室内より約 4℃高かった (図-37 A)。屋外の気温と相対湿度より算出した湿球温度は約 24℃となった (図-37 D)。屋外放射の平均値は 757 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ であったが、11 時 30 分頃まで雲の影響で短期間に値が変動したが、その後はおおむね晴れの状況であった (図-37 E)。屋外風速は平均値で 2.0 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ となり、14 時頃までは比較的強く推移し、その後上昇した (図-37 F)。

温室内の気温は、開度 (中) で最も低く、相対湿度とエンタルピは開度 (大) で最も低くなった (図-38 BC)。開度 (小) では、開度 (中) より気温、相対湿度、エンタルピが高くなる傾向がみられた (図-38)。

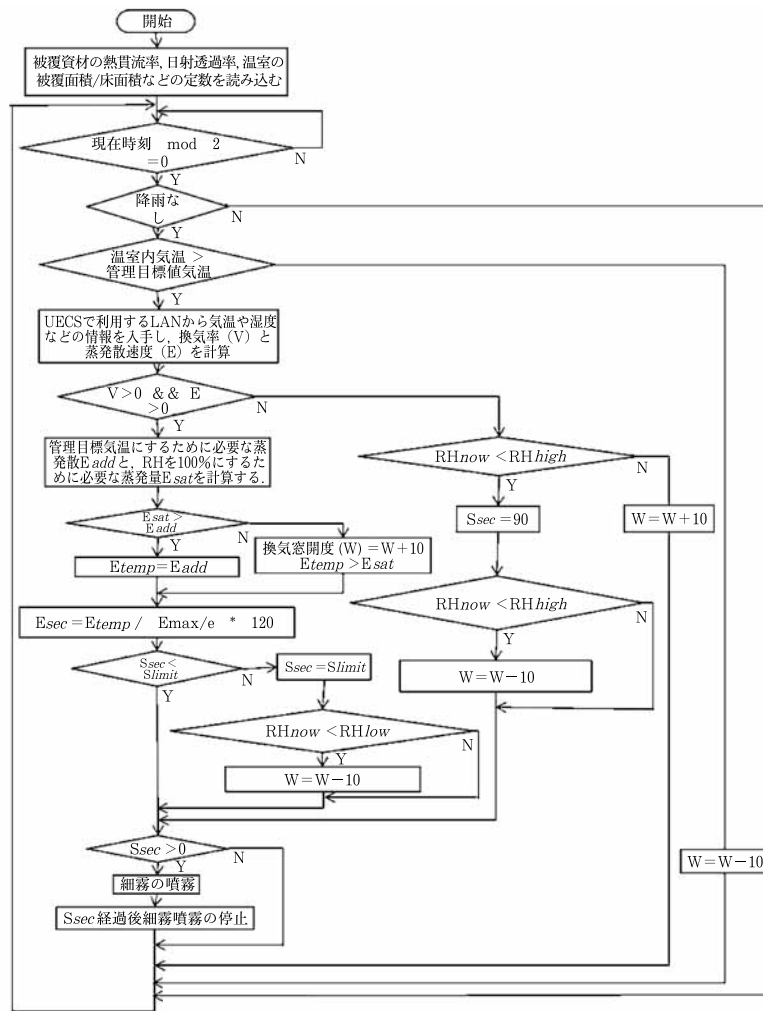


図-36 高温期の細霧噴霧時間の決定と換気窓開度調整に関するフローチャート (実験2)

V: 換気率; E: 蒸発散速度; RHnow: 温室内の相対湿度; Eadd: 気温を制御目標値にするための必要補充蒸発量; Esat: 温室内の相対湿度 100%にするための必要補充蒸発量; RHhigh: 温室相対湿度の高湿度側の閾値; RHlow: 温室相対湿度の低湿度側の閾値; Ssec: 細霧噴霧時間; Slimit: 細霧噴霧最大時間; w: 天窓の開度 (0~100%); Emax: 細霧噴霧装置噴霧速度 (14.4 g・m⁻²・min⁻¹); e: 細霧有効気化率 (0.8)

相対湿度は、開度 (大) で最も低くなったが (図-38 B), 絶対湿度も低くなっている。このことは、開度 (大) では換気率が大きく、噴霧した細霧が蒸発しないうちに屋外に排出しているか、冷却した空気がすぐに屋外に排出されている可能性がある。片岡ら (2000) の細霧の噴霧実験では、噴霧した細霧がすべて温室内で蒸発したとすると温室の気温の低下は 5°C 程度であるが、実際は 1°C しか低下しなかった。換気によって屋外へ流出する細霧の量が多くなった可能性を指摘している。

開度 (小) では、エンタルピーが高まり (図-38 C), 換気量が不足していると考えられた。気温も開度 (中) に比べて高くなる傾向が見られたため (図-38 A), 開度 (小) の処理は細霧を噴霧して冷却するには不適で

あると考えられた。

これらのことは、噴霧した水を温室内の冷却に効率的に利用するために、天窓開度を制御することが重要であることを示している。

2) 高温期の細霧噴霧時の換気窓開度の調整が温室内の気温および湿度に及ぼす影響 (実験2)

温室内の気温は屋外より低くなった (図-39 A)。温室内の相対湿度はほぼ 75% 以上で推移し (図-39 B), 気温と相対湿度から算出した湿球温度は屋外と温室内で大きな違いがなかった (図-39 C)。天窓開度は屋外の風速が小さい 10 時頃まではほぼ全開であったが (図-39 DE), 12 時以降は最低値である 10% 程度で推移した。

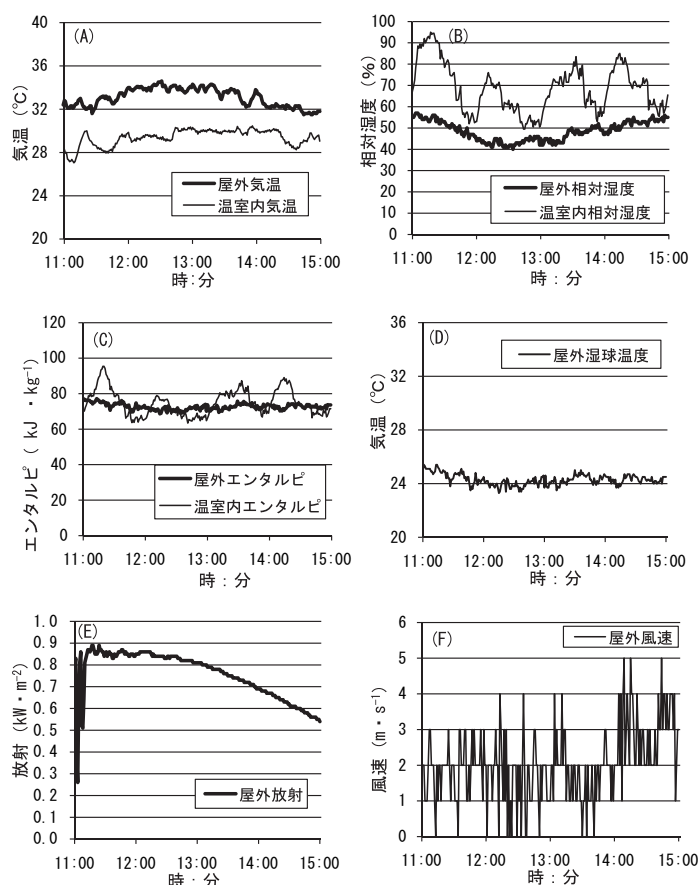


図-37 細霧冷房実施時の換気窓開口部面積の違いが温室内気象環境に及ぼす影響（実験1）

実験実施時の屋外の気象環境も示した、(A) 温室内外の気温 (B) 温室内外の相対湿度 (C) 温室内外のエンタルピ (D) 屋外の湿球温度 (E) 屋外放射 (F) 風速. 開口部面積は各時刻の0~20分, 20~40分, 40分~0分でそれぞれ, 開度(小), 開度(中), 開度(大), に設定.

11時頃にやや屋外放射が小さくなった(図-39 F). 温室内外のエンタルピは, 湿球温度とほぼ同様の变化を示した(図-39 G).

2分おきに換気率と蒸発散速度を計算したが, 換気率と蒸発散速度が正となったのは, 処理を実施した時間のうち20%であり, 74%の時間が換気率を利用せずに細霧の噴霧を実施した. 換気率や蒸発散速度が負となったことは, センサの誤差や暫定的に用いている定数の誤りの可能性, 気温センサの濡れの影響が考えられる(林ら, 1998). また, 強制換気を実施した温室で細霧を噴霧し, 熱収支法によって換気率を算出したところ, 実測の値と近かったことが報告されているが(Arbelら, 1999), 実験データからエンタルピを算出すると, 屋外では温室内に比べて低い. しかし, 本実験では, 温室内のエンタルピは屋外のエンタルピに非常に近く, 日射はあるが温室にエネルギーが蓄積していないため, 実際の換気率は

非常に大きいと考えられた. このため, 換気窓の開口部面積が大きい温室で, 熱収支法による換気率を基準に細霧による冷却を制御することは難しいと考えられた.

実験2で実施した細霧の噴霧制御では, 温室内外のエンタルピの差は小さいが(図-39 G), 温室内の気温は屋外よりも低くなり(図-39 A), 温室内の相対湿度は屋外に比べて高く保たれていることから(図-39 B), 細霧による冷却法の特徴から考えると理想的に温室の冷却ができたと考えられる. 特に12時以降, 屋外の風速が大きくなり(図-39 E), 相対湿度の低下を抑制するために, 天窓開度が低くなったが, 天窓開度を高く保てば, 温室内外のエンタルピに差がなく, 相対湿度は低くなり, 気温は上昇すると考えられる. そのため, 細霧の噴霧で温室の冷却を実施するには相対湿度を指標として天窓開度を調整することが有効であると考えられる.

ただし, 細霧の噴霧量が十分であることが必要である.

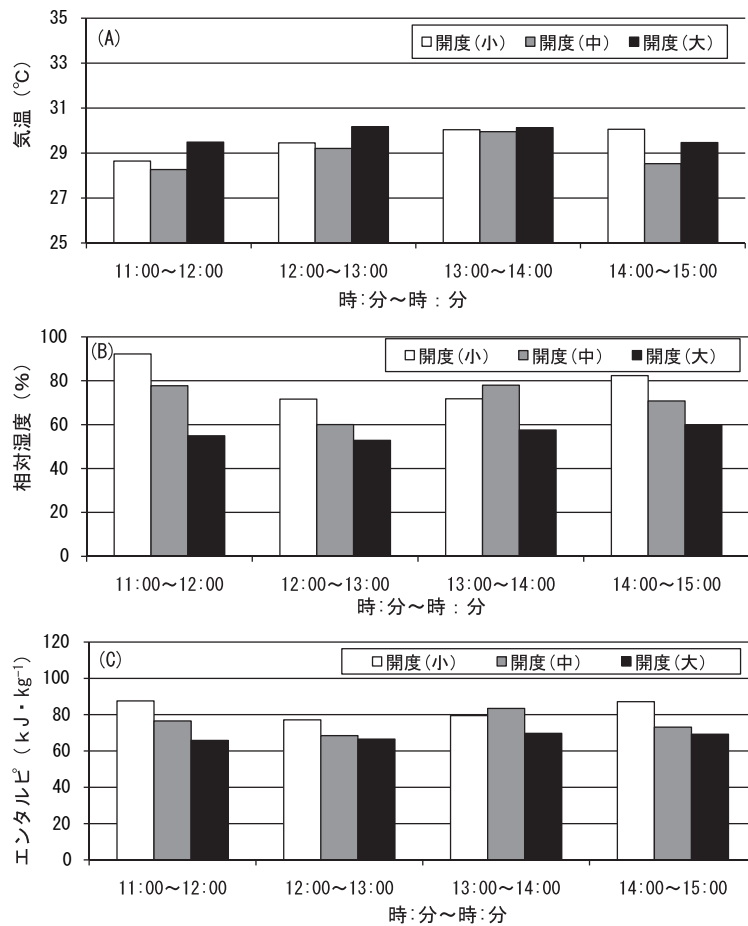


図-38 細霧噴霧時の換気窓の開口部面積の違いが温室内の気温、相対湿度およびエンタルピに及ぼす影響（実験1）

(A) 気温 (B) 相対湿度 (C) エンタルピ。実験は2008年7月30日に実施。

細霧の噴霧能力が不足した場合に、相対湿度で天窓開度の制御をすると、温室内の相対湿度、気温、エンタルピが上昇すると考えられる。そのため、温室内外のエンタルピをモニターして、温室内のエンタルピが屋外に比べて高くないように監視することが必要であろう。

3 細霧等を利用した複合環境制御が長期多段栽培での生育と収量に及ぼす影響

わが国の気象環境に適した、トマトの長期多段栽培での多収生産を可能とする環境制御技術を開発するために、CO₂施用、ヒートポンプによる高温期の夜間冷却、細霧噴霧処理などの技術を導入し、これら環境制御技術全体が収量に及ぼす影響を明らかにするため実験を行った。

前節までの、温湿度同時調節法と高温期の冷却法を導入したが、開発したそれぞれの技術とトマトの生育との関連を評価することは重要である。しかし、導入した複

数の環境制御技術の影響を各技術の相互作用を含めて評価する視点は、多収生産を実現する環境制御技術を構築する上では、不可欠であろう。

実験は、ヒートポンプ、細霧噴霧装置、CO₂施肥装置を導入した温室と、導入していない温室で栽培したトマトの果実収量を比較した。前者は、現在、トマトの多収生産で必要と思われる環境制御機器の多くを導入した温室、後者は、換気窓の開閉装置、温風加温装置、遮光・保温兼用カーテンなどの基本的な環境制御機器を装備した温室であり、2つの温室の収量を比較した。

a 材料および方法

1) 栽培概要

実験は2008年7月より、IV章2節、V章1節の温室で行った。

トマト (*Solanum lycopersicum* L.) ‘桃太郎ヨーク’ (タキイ種苗), ‘朝日和10’ (朝日工業), ‘Du

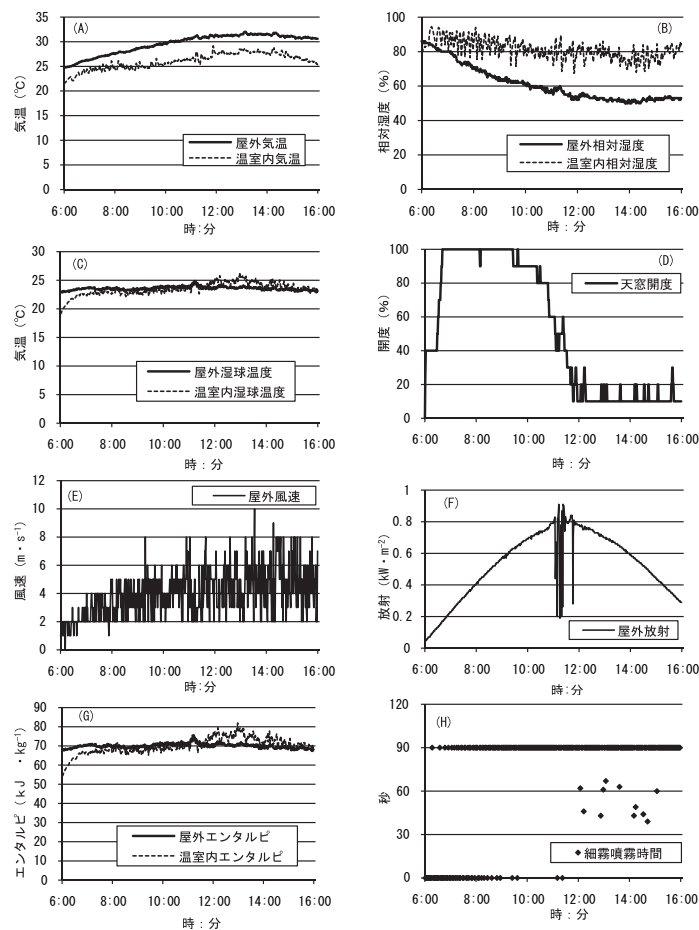


図-39 高温期の細霧の噴霧と換気との強調制御が温室の気象環境に及ぼす影響（実験2）

実験実施時の屋外の気象環境も示した。(A) 気温 (B) 相対湿度 (C) 気温と相対湿度より計算した湿球温度 (D) 天窓開度 (E) 屋外風速 (F) 屋外放射 (G) エンタルピ (H) 2分ごとの細霧噴霧量。実験は2008年9月8日に実施した。

nde' (De Ruiter)の3品種を供試した。2008年7月28日に、市販の園芸用培土（ベストミックス，大洋興業）をつめた72穴セル成形トレイに播種し，閉鎖型苗生産システム（苗テラス，大洋興業）を利用して1次育苗を実施した。1次育苗期間中は16時間日長とし，ほぼすべての品種で発芽した8月2日までは昼/夜温を30/25°Cに設定し，その後23/17°Cに設定して管理を行った。培養液は播種から8月4日までは水道水を，その後1.8 mS・cm⁻¹に調節した市販の培養液（ハイテンポ，大洋興業）を灌水した。灌水は8月2日までは1日1回，その後は2日1回の頻度で，10分ずつ実施した。

8月18日に，幅75×75 mm，高さ65 mmの2次育苗用のロックウール培地（Delta 4 G，グロダン）に移植した。ヒートポンプによる夜間冷却と細霧による冷却（育苗冷却処理）を実施した温室と，遮光カーテンの

展開による高温対策をした温室（育苗遮光処理）の2カ所で2次育苗を実施した。

8月29日に，培養液掛け流し式のロックウール栽培システムとUECSを導入した2つの実験温室（基本環境制御温室，高度環境制御温室）に定植を行った。栽培ベッドの間隔は基本環境制御温室では2.2 m，高度環境制御温室では2 mとした。全体をラッピングした幅200 mm長さ900 mm高さ74 mmのロックウールスラブ（マスタースラブ2075 A 2 W，グロダン）を使用し，1スラブ当たり4個体ずつ定植した。圧力補正式のドリッパ（PCJ-CNL，ネタフィルム）を利用して点滴灌水した。培養液は10月20日までは大塚SA処方（N 17.5 me・L⁻¹；P 4.4 me・L⁻¹；K 10.2 me・L⁻¹；Ca 8.2 me・L⁻¹；Mg 3.0 me・L⁻¹），その後は大塚A処方（N 18.6 me・L⁻¹；P 5.1 me・L⁻¹；K 8.6 me・L⁻¹；Ca 8.2 me・L⁻¹；

Mg $3.0 \text{ me} \cdot \text{L}^{-1}$) を、EC 値を $0.8 \sim 1.6 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ に調節し、タイマー制御と日射比例制御により灌水した。

誘引高さは、基本環境制御温室では 2.8 m 、高度環境制御温室では 3.3 m とし、主枝 1 本仕立てのハイワイヤー誘引により栽培を実施した。生長点が誘引線に達した後は適宜つる下ろしを実施した。収穫実施中の果房の下 3 枚程度の葉を残し、それ以下の葉を 10 日に 1 回程度の頻度で摘葉した。

実験温室の諸元と導入した環境制御装置は表-18 に示した。高度環境制御温室では基本環境制御温室の装置に以外に、空気熱源式のヒートポンプ、細霧噴霧装置、液化炭酸式 CO_2 施用装置を設置した。

実験計画法は 1 処理区 6 株とし、各温室で品種 3 水準 \times 2 次育苗処理 2 水準 \times 3 反復を完全無作為化して実施した。ただし、基本環境制御温室では 'Dundee' を、育苗遮光処理を実施して栽培する処理区は設けなかった。

各温室内の北西と南東に設置した 2 カ所の温室内気象ノードと 1 カ所の屋外気象ノードの送信する情報を参照して、環境制御を実施した。各ノードは高さ 1.5 m 地点に設置し、気温と相対湿度は通風処理をして測定した。高度環境制御温室では、温室北から 4 m 、西から 2 m 地点および温室南から 4 m 東から 2 m 地点に、基本環

境制御温室では、温室北から 9 m 、西から 4.5 m 地点および温室南から 9 m 東から 4.5 m 地点に、気温と相対湿度を測定する温室内気象ノードを設置した。 CO_2 濃度は高度環境制御温室では 2 カ所の温室内気象ノードで測定を行い、基本環境制御温室では、温室中央にデータロガを設置して測定を行った。

病虫害に対する防除は慣行に従った。

収穫は週に 2 回実施し、処理区ごとの果実重を調査した。収穫した果実のうち、裂果などの障害果を除いたものを良品果として調査した。

2) 基本環境制御温室の環境制御手法

換気を開始する気温の制御目標値は 23°C とし、遮光カーテンは屋外の日射が $0.7 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上で遮光率約 50% の資材を展張した。換気は 11 月 26 日までは 6 機の天窓開閉機と 2 機の側窓巻き上げ機で管理を行ったが、その後は側窓を全閉とし、天窓のみで換気を実施した。

11 月 10 日より、18 時～6 時には気温が 13°C 以下の時に、6 時～18 時には 15°C 以下の時に灯油燃焼式の温風暖房機により加温した。

表-18 トマトの長期多段栽培の試験を実施した 2 つの UECS 導入温室の概要

	基本環境制御温室	高度環境制御温室
サイズ	36m (南北長さ) \times 27m (東西長さ) \times 3.5m (軒高)	18m (南北長さ) \times 9m (東西長さ) \times 4m (軒高)
被覆資材	PO 系フィルム	PO 系フィルム
屋根構造	丸屋根式連棟 6 山 屋根高さ 1.3m	丸屋根式連棟 2 山 屋根高さ 1.3m
天窓換気装置	各棟に設置 (東向 3 機, 西向 3 機)	各棟に設置 (東向 1 機, 西向 1 機)
側窓換気装置	温室東西側面に設置 (巻き上げ式)	温室東西側面に設置 (巻き上げ式)
燃焼加温装置	温風暖房機 2 機	温風暖房機 1 機
ヒートポンプ	なし	冷暖房共用 1 機 (5 馬力)
カーテン設備	遮光保温共用 1 軸 2 層カーテン 1 機	遮光保温共用 1 軸 2 層カーテン 1 機
細霧冷房装置	なし	細霧噴霧装置 ($0.72 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ノズル}^{-1}$ 20 個)
炭酸ガス施用装置	なし	液化 CO_2 方式 (CO_2 ボンベ使用)
灌水制御装置	10 月 10 日までタイマー制御灌水装置, その後日射比例制御灌水装置に切り替え	日射比例制御灌水装置

温室外観



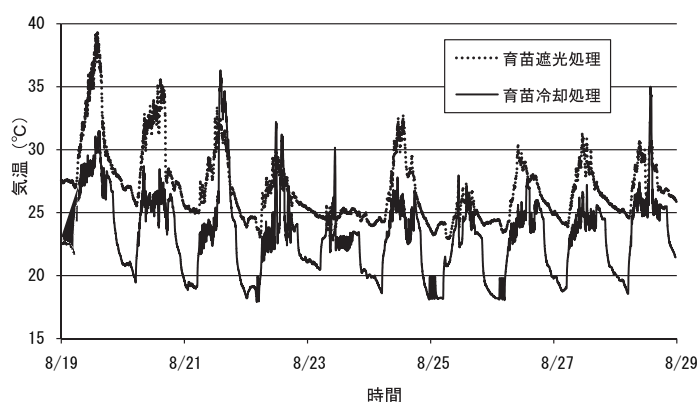


図-40 トマト長期多段栽培における2次育苗実施期間の冷却処理が温室内の気温に及ぼす影響
2次育苗期間は8月18日～8月29日。

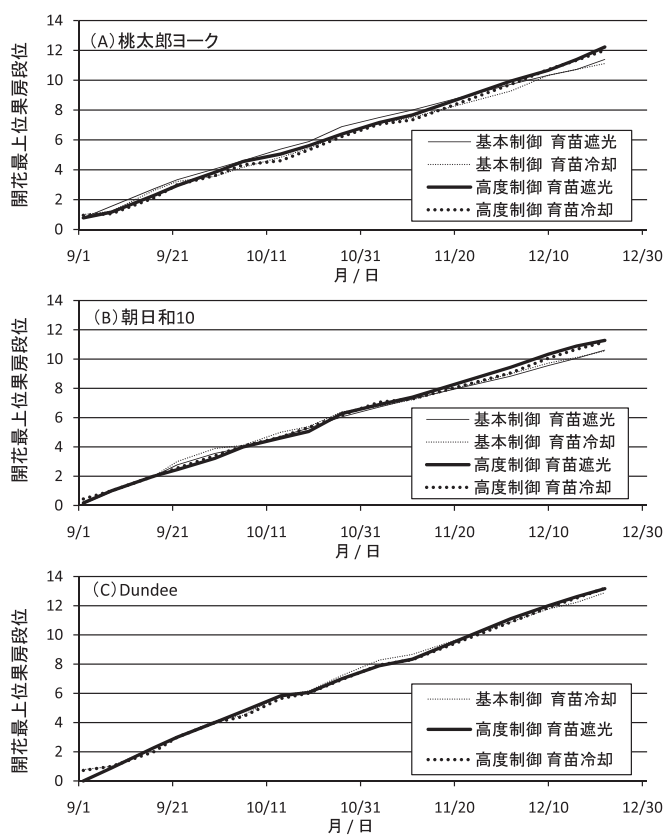


図-41 品種、2次育苗時の冷却処理および本圃の環境制御の違いがトマトの開花した最も最上位の果房段位に及ぼす影響
(A) 桃太郎ヨーク (B) 朝日和10 (C) Dundee.

3) 高度環境制御温室の環境制御手法

定植(8月29日)から9月8日までは20時～5時は、換気窓は全閉とし、気温20℃以上の時にヒートポンプにより冷却した。5時～17時30分は2節の実験2の手法で制御した。17時30分～20時までは細霧の噴霧を停止し、気温の制御目標値を23℃に設定して換気窓の開

閉を制御した。

9月8日から10月16日はヒートポンプによる冷却時間を20時～7時30分とした。5時30分～7時30分は温室の2カ所のCO₂濃度の平均値が1000 ppmとなるように、CO₂を施用した。ただし、9月26日以降は、温室の冷却とCO₂の施用時間を8時まで延長した。そ

れ以外は9月8日までと同じ管理を行った。

10月17日以降、夜間の冷却処理を停止し、ヒートポンプと温風暖房機を利用し、制御目標値を気温16°Cに設定して加温した。

10月17日から10月30日までは、6時～8時に温室内部気温が23°C以上でヒートポンプによる冷却処理を実施し、CO₂を施用した。8～20時は10月16日までと同じ設定とした。

11月1日～7日の6時～8時には、10月30日までと同じ管理を行った。8時～16時の設定は1節で示した手法を実施し、その後、気温の制御目標値を23°Cとして換気窓を制御した。

11月8日から11月19日は、6時から2カ所の温室内の気温の平均値が25°Cを上回るまで、換気窓を全閉としCO₂を施用し、23°C以上ではヒートポンプによる冷却を実施した。一度25°Cを上回った後は、11月7日までと同じ設定とした。

11月20日からは11月19日までの処理と同様としたが、側窓は全閉とし、CO₂施用は気温が27°Cを上回るまでとした。気温が27°Cを上回った後は、温室内部のエンタルピの制御目標値を70 kJ・kg⁻¹とし、細霧の噴霧は相対湿度が80%に達するまで実施した。エンタルピの制御目標値は、その後11月25日に65 kJ・kg⁻¹に、12月10日に60 kJ・kg⁻¹に変更した。

b 結果および考察

1) 2次育苗時の冷却処理がトマトの収量および開花に及ぼす影響

育苗冷却処理の温室では育苗遮光処理の温室より、ほぼ1日を通して気温が低くなった(図-40)。育苗遮光処理の温室では気温が30°C以上となる日が多く、夜温も22°C以上であった。その結果、9月2日には育苗冷却処理で開花が早くなる傾向が見られた(図-41)。さらに、10月までの全果実収量と良品果収量は育苗冷却処理により高くなる傾向が見られ、高度環境制御温室では、12月22日までの良品果収量も高くなる傾向があった(図-42、図-43)。しかし、基本環境温室の‘桃太郎ヨーク’では、育苗遮光処理のほうが、12月22日までの全果実収量、良品果実収量とも高くなる傾向があった(図-42、図-43)。

これらのことは、育苗冷却処理によって開花が早まり、長期多段栽培でのごく初期の収量を高める効果があると考えられた。ただ、12月20日の開花した果房の最上位の段数には育苗時の処理の差がなく(図-41)、育苗冷

却処理が長期間の収量に及ぼす影響はさらに検討を行う必要がある。

2) 環境制御手法の違いが温室内の気温、湿度、CO₂濃度に及ぼす影響

9月中旬までは、高度環境制御温室で細霧による冷却、ヒートポンプによる夜間冷却を実施した結果、基本環境制御温室より平均気温、最低気温、最高気温が低くなった(図-44)。10月中旬以降、加温開始温度を高く設定した高度環境制御温室の方が、最低気温、平均気温とも高くなった。最高気温は高度環境制御温室で高くなる傾向があったが、11月中旬以降、エンタルピの制御目標値を65または70 kJ・kg⁻¹まで、実験的に高めたことと、CO₂施用の時間を長くするため、一日の最初に換気窓が開くまで気温を高め維持したことが影響したと考えられた。エンタルピは温室内部作業者のことを考慮し、最終的に60 kJ・kg⁻¹で管理した。

高温時期の相対湿度の最低値が高度環境制御温室ではほぼ50%以上となった(図-45)。11月中旬以降は、高度環境制御温室で加温開始温度を高く設定したことが影響したためか、相対湿度が低かった。

温室内部のCO₂濃度は、高度環境制御温室の方が高かった。特に屋外気温が低い時期には、明期にもヒートポンプによる冷却によって換気の開始を遅らせてCO₂を施用したため、1日のCO₂濃度の平均値が800 ppmを超える日もあった。また、高度環境制御温室のCO₂濃度の最大値は約1000 ppmとなった(図-46)。

3) 環境制御手法の違いがトマトの果実収量に及ぼす影響

10月の全果実収量と良品果収量は基本環境制御温室の方が、高度環境制御温室よりも高くなった(図-42、図-43)。収穫開始日は、基本環境制御温室では10月9日、高度環境制御温室では10月14日となり、収穫開始が早かったためと考えられる。

一方、12月22日までの良品果収量は、高度環境制御温室の方が高くなり、全果実収量も‘桃太郎ヨーク’以外は高くなる傾向が見られた(図-42、図-43)。特に、12月の‘朝日和10’と‘Dundee’の全果実収量は基本環境制御温室より高度環境制御温室で大幅に多くなった。12月には‘ダンディ’では第3～5果房、‘朝日和10’では第4～6果房を収穫したが、これらの果房の開花時期は9月中旬～10月中旬である(図-41)。ゆえに、12月に収穫した果実の生育は、各温室の環境制御の影響が

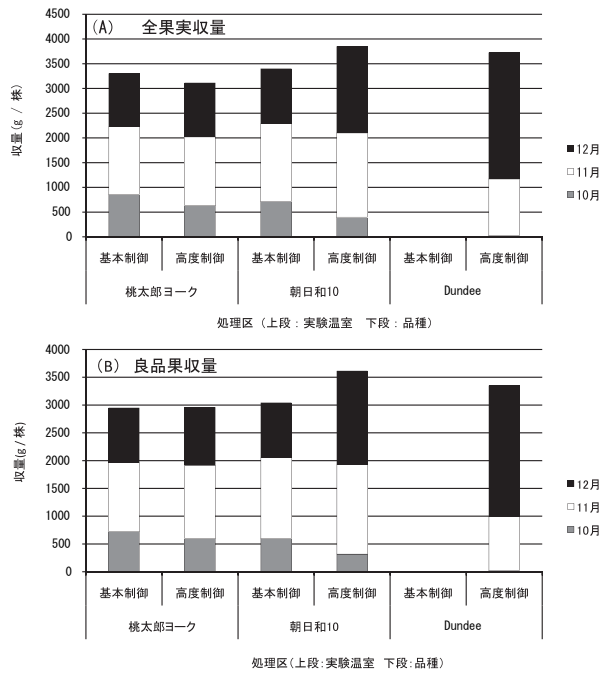


図-42 環境制御法および品種の違いがトマトの1株当たりの果実収量に及ぼす影響（育苗遮光処理）

(A) 全果実収量 (B) 障害果をのぞく良品果収量. 2008年12月22日までのデータを示している. 各データは18株の平均値(3区6株ずつ). 図中, 基本制御および高度制御は基本環境制御温室および高度環境制御温室を示す.

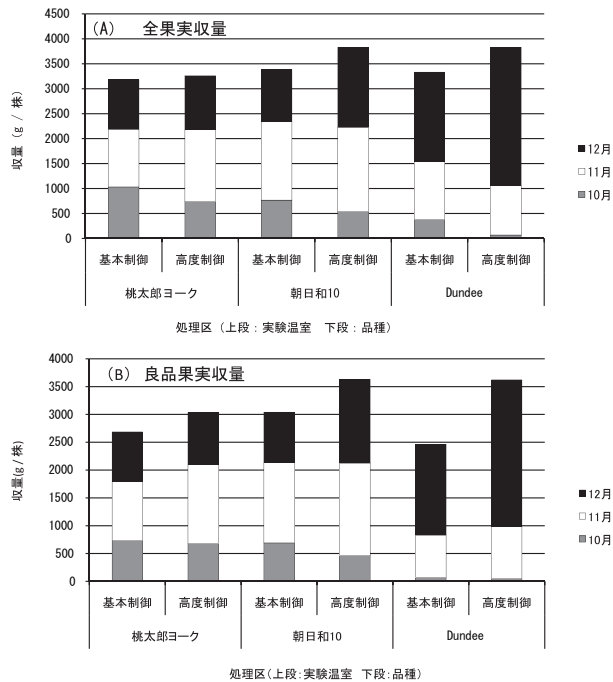


図-43 環境制御法および品種の違いがトマトの1株当たりの果実収量に及ぼす影響（育苗冷却処理）

(A) 全果実収量 (B) 障害果を除く良品果収量. 2008年12月22日までのデータを示している. 各データは18株の平均値(3区6株ずつ). 図中, 基本制御および高度制御は基本環境制御温室および高度環境制御温室を意味する.

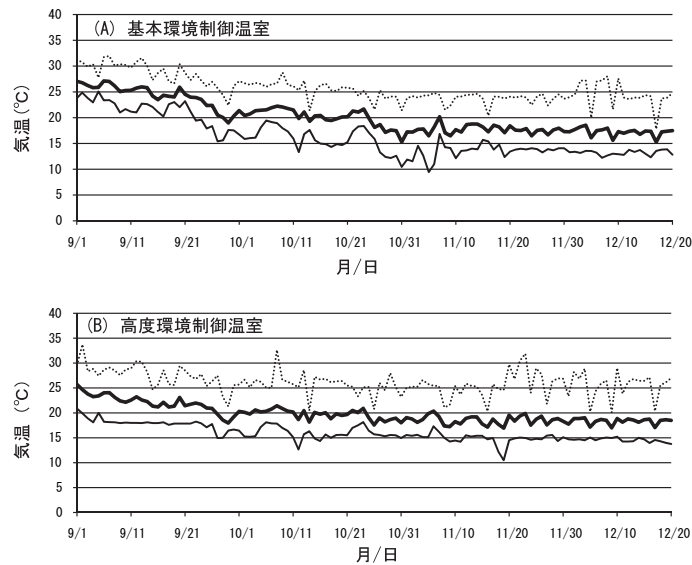


図-44 環境制御の手法が異なる2つの高軒高温室におけるトマト栽培期間中の気温の変化(2008年9月1日~12月20日)
太い実線は平均値, 細い実線が最低気温, 点線が最高気温。

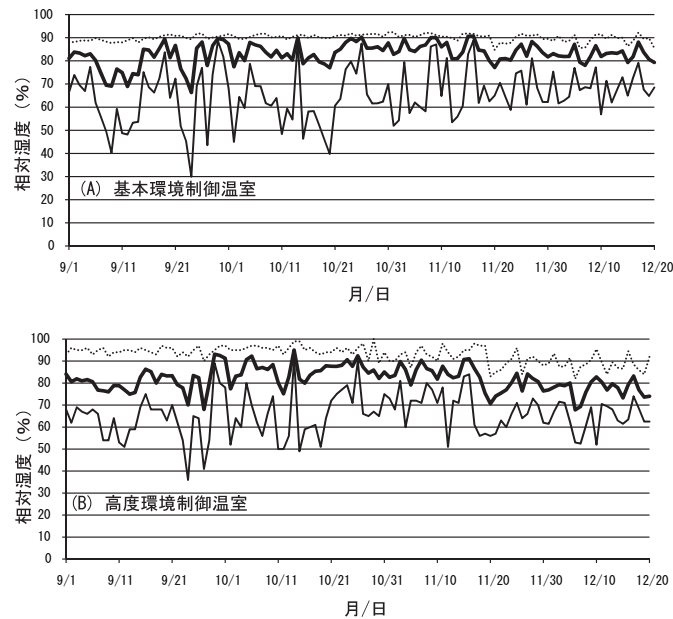


図-45 環境制御の手法が異なる2つの高軒高温室でのトマト栽培期間中の相対湿度の変化(2008年9月1日~12月20日)
太い実線は平均値, 細い実線が相対湿度の最低値, 点線が相対湿度の最高値を示す。

大きいと考えられる。これらの期間、高度環境制御温室では、CO₂施用や細霧による湿度制御などの環境制御を実施し、果実の生育に好適に作用したため、12月の収量が多くなったと考えられる。

ミニトマトでCO₂を750 ppmおよび1500 ppmで施用した場合に収量が高くなり、濃度が高い方がより効果が大きく、また施用時間が長い方が増収の効果が大きいことが報告されている(吉村ら, 1996)。また、長岡ら

(1979)も、CO₂を1000 ppmとなるように施用することで収量は増加し、転流を促進するために夜温を高め管理することの重要性を指摘している。本実験では、CO₂施用により光合成が促進され、高夜温により転流が促進された結果、収量が多くなったと考えられる。

障害果の発生は高度環境制御温室で少なかった。高湿度条件ほど裂果の発生が大きいと考えられているが(太田ら, 1991)、飽差の変動が大きい、比較的温室内が乾

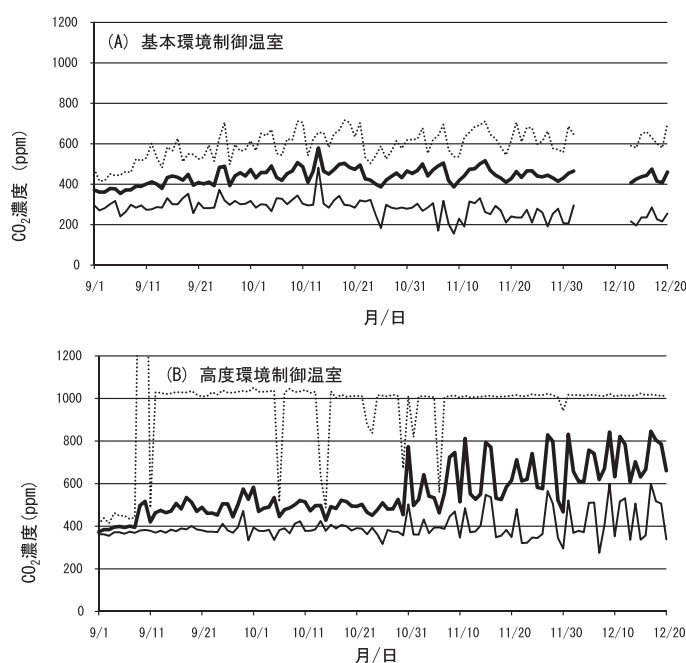


図-46 環境制御の手法が異なる2つの高軒高温温室でのトマト栽培期間中のCO₂濃度の変化(2008年9月1日~12月20日)

太い実線は平均値, 細い実線が最低濃度, 点線が最高濃度を示す。
基本環境制御温室の12月1日~12月12日はデータ欠側。

燥していた日の翌日に高湿度となった場合に発生が多いことが報告されている(渡邊ら, 2006)。高度環境制御温室では, 細霧により相対湿度を維持する管理をしているため, 湿度の変動が少ないことが裂果の抑制に与した可能性が考えられる。

4) 細霧を利用した冷却処理がトマトの葉温に及ぼす影響

高温期(9月5日)の葉温の変化を図-47に示した。基本環境制御温室では, 10時前から15時くらいまで遮光処理を実施したが, その期間の葉温は細霧によって冷却した高度環境制御温室の葉温と同程度であった。遮光カーテンが作動する前には, 基本環境制御温室のトマトの葉温は33°C以上であった。気温と日射量を変えてトマトのCO₂の同化度を測定した結果, 6葉期の苗では気温25°C以上で, 9葉期の苗では気温35°C以上で低下すること, 9葉期の苗では61 klxまで照度を高めたが, 照度が大きいほど同化度大きくなることが報告されている(巽・堀, 1970)。気温を25~48°Cまで変化させ, 30 klxの照度でトマトの光合成を測定したところ25°C程度の気温で光合成速度が最大になったと報告されている(鳥生ら, 1982)。また, 高温となる日中には, 光合成有効量子束密度が高くてもトマトの光合成速度が高くな

らなかったが, 飽差が大きくなり蒸散が多くなったことで光合成が阻害された可能性が指摘されている(Suzukiら, 2001)。図-47で示した細霧処理による葉温の低下が光合成に及ぼす影響は推察の域を出ないが, 遮光せずに気温と飽差を低下させることが可能であり, 光合成を促進する効果が期待できる。また, 夏期に遮光処理を実施してトマトを栽培すると, 遮光率が高いほど全果実収量は低下するが, 裂果の発生が抑制され可販果収量は高くなることが報告されている(Wadaら, 2006)。このことから, 裂果などの障害果の発生がない場合には, 遮光よりも細霧によって冷却を行う方が, 光合成の促進や収量を増加させるために良いと考えられる。

高度環境制御温室では, 明期に細霧噴霧と換気の協調制御による冷却と気温湿度同時調節を実施したが, トマトの多収生産を実現するために, 夜間の冷却やCO₂施用も実施した。そのため, 協調制御単独の果実収量に及ぼす影響を評価することはできないため, 今後検討する必要がある。

また, 1節で示したが気温湿度の同時調節を実施することで, 温室の換気率を低く管理することが可能なため, CO₂施用をより効率的に実施できる可能性がある。今後, 細霧, 換気窓の開閉, CO₂施用の3つの環境制御の協調制御手法を検討し, より光合成に適した環境を構築する

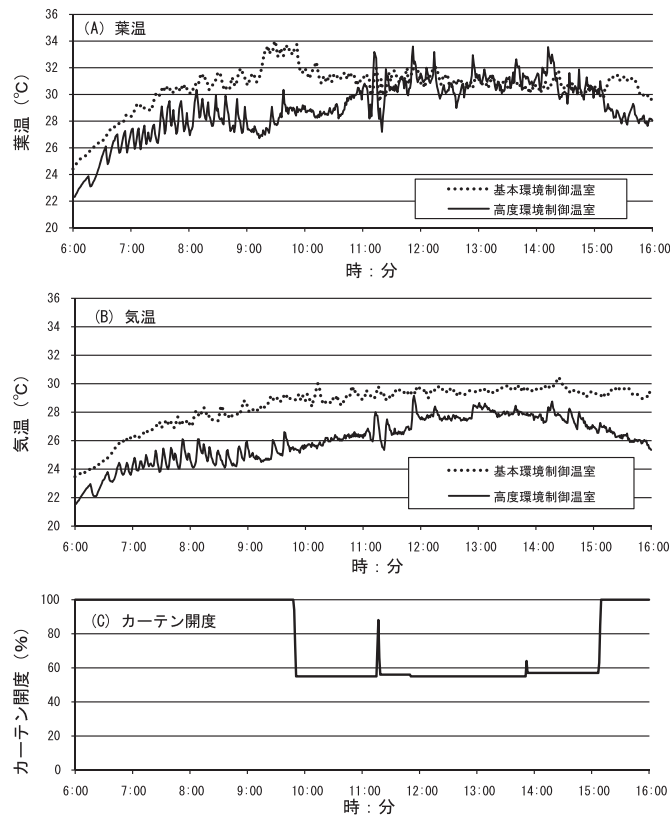


図-47 高度環境制御温室の細霧による冷却処理，基本環境制御温室の遮光処理がトマトの葉温と気温に及ぼす影響（2008年9月8日）

(A) 葉温 (B) 気温 (C) カーテン開度. カーテン開度は基本環境制御温室のデータで，高度環境制御温室では，遮光を実施していない. 葉温は最上位葉から約5枚目の葉について葉裏に接触させた熱電対で測定した.

ことが重要であると考えられた.

4 総合考察

本章では，湿度調節と冷却を目的とした細霧の噴霧と換気窓開閉の協調制御法を検討した. また，これらの制御法を取り入れた環境制御がトマトの長期多段ロックウール栽培での果実収量に及ぼす影響を調査した.

湿度調節に細霧を噴霧する場合には，1節で示したエンタルピを換気の指標とすることは合理的であろう. 細霧の噴霧は，顕熱を潜熱に変換する処理でありエンタルピは基本的に変化しないため，気温と湿度が急激に変化する状況下では扱いやすい指標と考えられる. 一方，冷却に細霧を噴霧する場合は，温室内のエンタルピを監視しつつ相対湿度を基準に，換気窓の開閉を実施する処理が有効であった.

三原（1980）が細霧による冷却のために考案した VETH 線図をみると蒸発散速度，換気率，気温，湿度の関係は明らかである. 温室内の蒸発散速度が大きい場

合には換気率は小さい場合に，逆に温室内の蒸発散速度が小さい場合には換気率は大きい場合に，気温の低下が大きい. 細霧の噴霧と換気のバランスをとることが冷却や湿度調節にとって重要である. そのためにも，細霧の蒸発速度を含めた温室内の蒸発散速度がわかれば，細霧の噴霧量を決定するために有用であろう. しかし，等量の細霧を噴霧しても換気率が大きいと屋外で蒸発する量が多くなり，湿度が違っても温室内で蒸発する量が異なるであろう. そのため，噴霧量に対して温室内で実際に蒸発した量を正確に把握する手法を今後検討する必要がある.

また，林ら（1998）が指摘しているが，湿度制御時，冷却時とも温度センサの濡れが計測誤差となる. 特に細霧の噴霧量の多い時期にはセンサの濡れは避けられないため，細霧を噴霧しない時間を設ける必要がある.

一方，UECS 導入温室でトマトの長期多段栽培時の環境制御手法として，本章で示した細霧による冷却法と温湿度調節法を利用した. ヒートポンプによる夜間冷却

やCO₂施用を実施したため、細霧のみがトマトの収量に及ぼす影響を評価できない。しかしCO₂施用時には、転流促進のため夜温を高める必要性が指摘されており(長岡ら, 1979), 一つの環境制御の導入により他の制御方法にも影響が及ぶため、環境制御全体を評価する視点が必要であろう。今回、定植直後は冷却に細霧を利用し、10月中旬より、湿度制御に細霧を利用する手法とした。細霧による環境制御の切り替え時期も、今後自動化する方法を検討する必要がある。

実験に使用したUECSは潜熱を利用した環境制御を実施するために有効なシステムと思われる。複雑な環境制御を一般的なPCを利用して実施可能であった。もし、温室用コンピュータを導入したとすれば、制御の微調整も難しく、また、コストもPCを利用して制御をする場合より高価となろう。今後、UECSのように低コストな複合環境制御システムの普及が望まれる。

5 摘要

温室の温湿度環境を最適化する目的で、低温期の気温湿度同時調節および高温期の冷却を目的とした換気と細霧の噴霧の協調制御手法の検討を行った。実験は、UECSを導入した軒高4mの温室で実施した。

2008年11月に温室のエンタルピを60kJ・kg⁻¹とするように、熱収支法により算出した換気率を基に換気窓の開度を調節し、温室内の相対湿度を75, 78および81%まで細霧を噴霧した。その結果、温室内のエンタルピは制御目標値付近で、温室内の気温も平均値では23~24℃で維持可能であった。このことから、エンタルピを指標として換気を制御し、細霧の噴霧で湿度を調節する手法が温室内の気温湿度を同時に制御するために有効であることを明らかにした。

2008年7月に細霧噴霧時の換気窓の開口部面積が気温に及ぼす影響を調査した。換気窓の開口部面積が過度に大きい場合や小さい場合には冷却効果が劣った。また、2008年9月に、細霧噴霧時に相対湿度を75~90%に維持するように換気窓の開度を調整する手法を検討した。その結果、温室内のエンタルピや湿球温度は屋外と同程度となり、屋外に比べて温室内の気温は低くなった。高温期の細霧を利用した冷却には、細霧の噴霧量が十分であれば、相対湿度を基準として換気を制御する手法が有効であると考えられた。

多収生産を実現する環境制御技術を明らかにする目的で、2つのUECS導入温室で、トマトのハイワイヤー誘引によるロックウール栽培を実施した。細霧の噴霧と

換気との協調動作により冷却と気温湿度の調整を実施し、CO₂施用と、高温期の夜間冷却を実施した温室で栽培した、定植から約4ヶ月間の収量は、これらの設備を導入しない温室より高かった。また、潜熱を利用した環境制御を実施するためにUECSを利用することは、精密な環境制御を実施することが可能となるため園芸生産上有益であると考えられた。

VI 総合考察

施設園芸での潜熱の利用は、地上部の冷却にはパッドアンドファン法(Carpenterら, 1957; 中川, 1967)や細霧の噴霧による方法(三原ら, 1972)などが、根圏冷却にはイチゴの紙ポット育苗(荒木, 2006)やイチゴの高設栽培装置(高市ら, 2000)など、多くの方法が開発されている。いずれも水が蒸発する際に吸収される2.47kJ・g⁻¹のエネルギーにより冷却を実施している。しかし、実際に潜熱による冷却を行うと気温と湿度にその効果が影響をうけ制御は難しい。そのため、水の蒸発を制御する工夫が必要となる。

本研究でその工夫は、根圏冷却では多孔質フィルムの利用と湛水を冷却することであり、地上部の冷却では細霧と換気との協調制御となる。前者は、水の比熱が大きい性質を利用し、短期間の水温の変化を小さくすることを目的としている。後者は水の気化時の潜熱が大きいという特性のみを利用し、換気によって温室環境を調整する手法でアプローチは全く異なる。

多孔質フィルムによる冷却法は、すでに開発事例があるが(三尾, 1998)、その運用法を整備しなければ広範な普及は難しいであろう。特に、低温時期でも利用可能とするためには、多孔質フィルム面からの水の蒸発を抑制することも必要となろう。I, II章で示したように、フィルム面にダクトを設置し蒸発量を制御することはその一つの解決策となる。また、ダクト内の風速制御で効率的な冷却が可能となる。ただ、気温や湿度の日変化が大きい圃場条件での運用には、残された課題もある。

その一つは、送風用コントローラの必要性である。送風処理による冷却効果がない場合には、無駄な電気を使用しないために送風を停止する必要がある。もっとも原始的な制御では、水温が温室内の湿球温度以下の時には、送風を停止することが必要であろう。

装置全体の熱収支も測定する必要がある。送風速度とダクトの入口、出口の気温と湿度から、装置全体から奪われたエネルギーを計算し、計算値を送風用コントロー

ラの制御法に反映させていくことも重要となろう。地床栽培用の冷却チューブの利用では、熱収支を解析する手法から検討する必要がある。

また水量と多孔質フィルムの面積との比率と冷却特性との関係も明らかにする必要がある。水量に比して多孔質フィルム面積が大きいと、冷却速度は速まる反面、比熱を有効に利用できないため、気温が上昇する時間帯には、水温が上昇しやすくなるであろう。水量と多孔質フィルム面積のバランスによって、装置の特性が変わると考えられる。

また、IV章の細霧の噴霧用に開発した換気率計算ノードにも残された課題がある。計算手法はすでに開発済みで（三原，1980）、換気率を温室の環境制御に利用する研究例はあるが（Handarto ら，2006；Handarto ら，2007）、一般にはそのハードルは高かった。開発したノードを利用することで、換気率の環境制御への利用が容易となろう。しかし、V章で示したように、熱収支法による計算の特性上、換気率が大きい温室での測定は難しく、すべての温室で利用することは難しいであろう。またより正確に測定するために、気温や湿度の計測値の精度を高めるとともに、地中への熱流フラックスや床日射反射率などもより正確に測定または推測する手法を確立することが必要であろう。

換気率計算ノードは細霧の運用以外にも利用場面がある。例えば、CO₂施用を実施した温室で、屋外と温室内のCO₂濃度差と換気率の積を求めれば、屋外へのCO₂の排出速度が推定できる。こういった情報も送信できる仕様とすれば、今まで不可視であった情報がリアルタイムで入手可能となろう。

V章で示した、細霧と換気の協調制御は、温室での環境制御を高度化する上で重要である。換気窓の開閉制御は、気温をもとに実施することが通常である。しかし、本研究の湿度制御や冷却法では気温を換気窓の制御の指標としていないが、いずれも合理的な制御法であると考えられる。この2つの制御法の切り替えに関しては検討の余地があるが、やはり、屋外のエンタルピが温室のエンタルピの制御目標値よりかなり高い時期には冷却の手法、それ以外は湿度調節の手法をとることが必要であろう。また、トマトの長期多段栽培で、これら2つの環境制御を実施したが、同時にCO₂施用なども実施したため、細霧と換気の協調制御のみの効果を把握することはできなかった。単独の効果を把握することも重要であり、今後の検討課題である。

根圏や地上部の冷却を潜熱により効率的に実施するた

めには、複合環境制御の導入を検討する必要がある。IV、V章ではUECS（Hoshi ら，2004）を利用したが、今後、多孔質フィルムによる冷却装置のコントローラを作成する際にもUECS対応とすれば、外気、温室内の空気、ダクトから排出される空気の気温と湿度をモニターして、目に見えない空気中の水の流れを把握することが可能となる。もし、思うような冷却効果がなければ、原因を探索することも容易となる。UECSのようなシステムの普及が期待される。

本研究の養液栽培で示した根圏冷却法では、通気防水性資材である多孔質フィルムを利用することで、水の潜熱と比熱、水耕装置の断熱性などを有効に利用して効率よく冷却が可能であることを明らかにした。さらに、多孔質フィルムを利用することで地床栽培でも潜熱による根圏冷却が可能であることを明らかにした。自然換気温室において細霧噴霧処理と換気窓の開閉の協調制御により、効果的な冷却と低温時の気温湿度同時制御が可能であることを明らかにした。現在のわが国の園芸生産で問題となっている夏期の高温に対する対策として、潜熱による効果的な根圏や温室の冷却手法を開発した意義は大きいであろう。

引用文献

- 1) 荒木陽一（2006）：蒸発潜熱を利用した紙ポット育苗の花芽分化促進技術。農業技術体系 野菜編 3, 418の58-68. 農山漁村文化協会, 東京.
- 2) Arbel, A., O. Yekutieli and M. Barak (1999) : Performance of a fog system for cooling greenhouses. *J. Agric. Engineering Res.*, 72, 129-136.
- 3) Bottcher, R. W., G. R. Baughman and D. J. Kesler (1989) : Evaporative cooling using a pneumatic misting system. *Amer. Soc. Agric. Eng.*, 32, 671-676.
- 4) Carpenter, W. J. and W. W. Willis (1957) : Comparisons of low pressure mist, atomized fog, and evaporative-fan-and-pad systems for greenhouse cooling and plant response. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 70, 490-500.
- 5) 千輝淳二（1981）：水の蒸発。伝熱計算法, 272-288. 工学図書, 東京.
- 6) Diaz-Perez, J. C. and K. D. Batal (2002) : Colored plastic film mulches affect tomato growth and yield via changes in root-zone temperature. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 127, 127-136.
- 7) 土井元章・陳 忠英・齊藤香里・住友恵美・稲本勝彦・今西英雄（1999）：アルストロメリアの地中冷却栽培における秋季収量および切り花品質の改善。園学雑, 68, 160-167.
- 8) 福田裕貴・林 真紀夫（2004）：蒸発冷却法用 VETH 線図ソフトウェアの開発。農業情報研究, 13, 203-212.
- 9) 布施順也（2003）：遠隔操作システム。五訂施設園芸ハンドブック, 330-334. 施設園芸協会, 東京.
- 10) Gosselin, A. and M. J. Trundel (1983) : Interactions

- between air and root temperatures on greenhouse tomato : 1. Growth, development, and yield. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **108**, 901-905.
- 11) 後藤英司・菅原大輔・李 盈徳・高倉 直. (2003) : 酸素ガスを用いたハウレンソウ水耕の DO 制御. 植物工場学会誌, **15**, 27-32.
- 12) Handarto, M. Hayashi, E. Goto. and T. Kozai (2007) : Experimental verification of control logic for operation of a fog cooling system for a naturally ventilated greenhouse. *Environ. Control Biol.*, **45**, 47-58.
- 13) Handarto, M. Hayashi, K. Ohyama, H. Toida, E. Goto. and T. Kozai. (2006) : Developing control logic for a high-pressure fog cooling system operation for a naturally ventilated greenhouse. *Environ. Control Biol.*, **44**, 1-9.
- 14) 林 秀典・山尾正美・津村哲宏 (1999) : ハウスミカン地中冷却栽培における花芽分化促進に関する実験. 徳島果試研報, **27**, 19-30.
- 15) 林 真紀夫 (1995) : 冷房. 農業技術体系 花卉編 3.. 449-458. 農山漁村文化協会, 東京.
- 16) 林 真紀夫 (2003) : 冷房. 五訂施設園芸ハンドブック, 142-157. 施設園芸協会, 東京.
- 17) 林 真紀夫・金子拓生・福田裕貴 (2003) : 熱収支法による商用大型温室の換気率測定. 農気東海誌, **61**, 5-8.
- 18) 林 真紀夫・菅原崇行・中島浩志 (1998) : 自然換気型細霧冷房温室の温湿度環境. 生環調, **36**, 97-104.
- 19) 林 泰正・星 岳彦・高市益行・山口浩明・相原祐輔 (2004) : 施設におけるユビキタス環境制御システムの提案. 農及園, **70**, 845-853.
- 20) He, J. and S. K. Lee (1997) : Growth and photosynthetic characteristics of lettuce (*Lactuca sativa* L.) under fluctuating hot ambient temperatures with the manipulation of cool root-zone temperature. *J. Plant. Physiol.*, **152**, 387-391.
- 21) He, J., S. K. Lee and I. C. Dodd (2001) : Limitations to photosynthesis of lettuce grown under tropical conditions : alleviation by root-zone cooling. *J. Exp. Bot.*, **52**, 1323-1330.
- 22) Hicklenton, P. R. and M. S. Wolynetz. (1987) : Influence of light- and dark-period air temperatures and root temperature on growth of lettuce in nutrient flow systems. *J. Amer. Hort. Sci.*, **112**, 932-935.
- 23) 本條 毅 (1992) : コンピュータシステム, 橋本 康, グリーンハウス・オートメーション, 190-198. 養賢堂, 東京.
- 24) 堀 裕・新井和夫・細谷 毅・小山田光男 (1968) : 培地温と気温の組み合わせがそ菜の生育ならびに養分吸収に及ぼす影響. 園試報, **A 7**, 187-213.
- 25) Hoshi, T., Y. Hayashi and H. Uchino. (2004) : Development of a decentralized, autonomous greenhouse environment control system in a ubiquitous computing and internet environment. *Proc. of 2004 AFITA/WCCA Joint Congress on IT in Agriculture.*, 490-495.
- 26) 今泉 寛 (1974) : M 式装置による野菜の養液栽培[1]. 農及園, **49**, 1497-1502.
- 27) 稲本勝彦・景山 博・真壁照枝・土井元章・今西英男 (2003) : 地中冷却システムを利用したチューリップの早期促成栽培. 生環調, **41**, 241-248.
- 28) 位田藤久太郎 (1963) : 蔬菜の根の通気必要度. 土壤の物理性, **8**, 13-19.
- 29) 井上昭司・村上健二・熊倉裕史・荒木陽一 (2000) : 環境改善によるハウレンソウ生産の安定化. 中国農研報, **21**, 13-40.
- 30) 石井雅久・佐瀬勘紀・奥島里美・森山英樹・池口厚男 (2007) : 細霧冷房時における自然換気温室の換気量測定. 農業環境工学関連学会 2007 年合同大会 講演要旨集, CD-ROM 00548.pdf.
- 31) 香川 彰 (2004) : 野菜園芸大百科 ハウレンソウ・シュンギク・セロリ, 53-60. 農山漁村文化協会, 東京.
- 32) 片岡圭子・小西 剛・西川浩次・札埜高志・森田隆史 (2001) : 夏季のガラス温室における室内気温低下への細霧冷房の効果. 京大農場報, **10**, 7-12.
- 33) 川口岳芳・房尾一宏・伊藤純樹 (2006) : 水耕培地における収穫前の窒素濃度がハウレンソウ収穫時の硝酸濃度に及ぼす影響. 広島農技セ研報, **80**, 39-44.
- 34) 小林 保・大森 豊 (1987) : ハウレンソウの夏期生産に関する研究 第 1 報 雨よけ被覆資材の効果について. 兵庫県農総センター研報, **35**, 65-70.
- 35) 黒崎秀仁・林泰正・星岳彦・高市益行・大森弘美 (2006) : ユビキタス環境制御システムに対応した温室監視ソフトウェア. 農業環境工学関連学会 2006 年合同大会発表要旨, **30**.
- 36) 李 盈徳・後藤英司・高倉 直・蔵田憲次 (1998) : 高温環境下における養液温度がハウレンソウの根の生育に及ぼす影響. 植物工場学会誌, **10**, 225-230.
- 37) Lee, Y. D. and T. Takakura (1995) : Root cooling for spinach in deep hydroponic culture under high air temperature conditions. *Acta. Hort.*, **399**, 121-125.
- 38) Lipton, W. J. (1970) : Growth of tomato plants and fruit production in high humidity and at high temperature. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **95**, 674-680.
- 39) 松沼俊文 (2006) : 施設キュウリの細霧による病害への影響と温熱環境の改善効果. 農及園, **81**, 400-404.
- 40) 松岡孝尚・ヘリースハルディヤント (1992) : 夏期の NFT 養液冷却栽培によるミニトマトの生育過程における熱および流れ特性. 生環調, **30**, 119-125.
- 41) 三原義秋 (1980) : 温室冷房. 温室設計の基礎と実際, 160-169. 養賢堂, 東京.
- 42) 三原義秋・小牧 弘 (1973) . 温室の細霧冷房 (Fog & Fan) 法の実施例について. 農業気象, **28**, 231-236.
- 43) 三尾 彰 (1998) : 養液栽培用ベット. 特許公開, 平 10-28486.
- 44) Morard, P. and J. Silvestre (1996) : Plant injury due to oxygen deficiency in root environment of soilless culture. *Plant and Soil*, **184**, 243-254.
- 45) 森口幸宣・上島良純・広部 純・神藤 宏 (1990) : 夜冷及び根圏冷却がバラの生育, 収量に及ぼす影響. 和歌山県農試研報, **14**, 51-58.
- 46) Morimoto, T., T. Masuda and H. Nonami (1989) : Oxygen enrichment in deep hydroponic culture improves growth of spinach. *Environ. Control Biol.*, **27**, 97-102.
- 47) 森田敏雅・北嶋秀臣・東 隆夫・大田譲一 (1988) : 簡易ハウス利用によるハウレンソウの作型設定と品種選定. 熊本農試研報, **13**, 69-87.
- 48) 元吉伸一 (1996) : フィールドバストは何か. 工場通信ネットワーク入門 1-41. 日刊工業新聞社, 東京.
- 49) 本岡竹司・朝野 明 (1995) : 施設栽培アルストロメリアの地中冷却による増収効果. 茨城県農総園研報, **3**, 48-53.
- 50) 長岡正昭・高橋和彦・新井和夫・花田俊雄・吉岡 宏 (1979) : 光の強さ・夜温・CO₂ 濃度が施設トマトの生育・収量に及ぼす影響. 野菜試報, **A6**, 105-122.
- 51) 中川行夫 (1967) : 農業構造物の環境調節に関する研究 (1) パッド・アンド・ファン式による夏のガラス室の冷房.

- 農業気象, 22, 143-148.
- 52) 中野有加・渡邊慎一・岡野邦夫・巽 二郎 (2001): トマト幼植物の生長および養水分吸収に及ぼす培養液流動の影響. 生環調, 39, 199-204.
- 53) 日本化学会 (1993): 溶解度. 改訂4版化学便覧 基礎編 2, 156-160. 丸善, 東京.
- 54) 野村康弘・鈴木隆志・塩谷哲也 (2005): 遮光資材による夏秋トマト裂果発生抑制技術. 岐阜県中山間農業技術研究所研報, 5, 11-16.
- 55) 農林水産省大臣官房統計部 (2008): 平成18年度野菜生産出荷統計. 農林水産省大臣官房統計部, 東京.
- 56) 糠谷 明 (2004): 野菜園芸大百科 第2版 トマト, 603-611. 農林漁村文化協会, 東京.
- 57) 大平民人. 1995. 農業技術体系 花卉編 3, p.473-477. 農山漁村文化協会, 東京.
- 58) 大澤梅雄・福田正夫・宇都宮裕人 (2000): シンビジウムの生育・開花に及ぼす高圧細霧冷房の影響. 愛知農総試研報, 32, 175-182.
- 59) 太田勝巳・伊東憲弘・細木高志 (1991): 水耕ミニトマトにおいて湿度が裂果発生に及ぼす影響ならびに裂果発生の制御. 園学雑, 60, 337-343.
- 60) 小澤智美・馬場英実・中山利明・土屋弘道 (1999): ホウレンソウの夏まき栽培における被覆資材利用による遮光効果について. 長野南信農試報, 3, 9-14.
- 61) 佐々木英和 (2008): 日本型トマト多収生産に向けた研究開発のマイルストーン[10] 多収生産技術の確立に向けた日本品種とオランダ品種の栽培生理特性と収量性の研究. 農及園, 83, 1229-1233.
- 62) Sasaki, H., T. Yano and A. Yamasaki. (2005): Reduction of high temperature inhibition in tomato fruit set by plant growth regulators. *JARQ.*, 39, 135-138.
- 63) 佐々木皓二・板木利隆. (1989): 養液栽培における夏期の地下部冷却が果菜類の生育, 収量に及ぼす影響. 生環調, 27, 89-95.
- 64) 佐藤裕則・菅原 敬・伊藤政憲 (2004): 地下水を用いた地中冷却法とアルストロメリアの秋冬期増収効果. 山形県園芸研報, 16, 31-42.
- 65) 須藤憲一・安藤隆夫 (1975): ピーマン, トマトの蒸散及び体内水分状態に及ぼす空気湿度, 土壌水分及び土壌塩類濃度の影響. 野菜試報, A2, 49-63.
- 66) 鈴木克己 (2006): 高軒高施設を利用したトマト生産. 野菜茶業研究集報, 3, 73-77.
- 67) 鈴木克己・河崎 靖 (2008): 日本型トマト多収生産に向けた研究開発のマイルストーン[3] 夏季高温の克服と, 冬季の効率的な暖房による周年安定生産に向けた取組み. 農及園, 83, 417-424.
- 68) Suzuki, S. and T. Takano (2001): Diurnal changes in environmental factors, photosynthesis and transpiration in tomato plants grown in hydroponics. 名城大農学報, 37, 135-145.
- 69) 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.
- 70) 鈴木徹司・中村新一・戸田幹彦・小沢朗人 (1986): 温室メロンの温度・湿度管理に関する研究. 静岡農試研報, 31, 47-54.
- 71) 橘 昌司 (1986): 養液栽培における環境要因と根の機能. 農及園, 61, 223-228.
- 72) 高市益行 (2003): 空気湿度環境制御. 五訂施設園芸ハンドブック, 158-169. 施設園芸協会, 東京.
- 73) 高市益行・荒木陽一・中島規子・田中和夫 (2000): イチゴ高設栽培における気化式根圏冷却の効果. 日本農業気象学会・日本生物環境調節学会 2000 年度合同大会講演要旨, 372-373.
- 74) 高倉 直 (2008): オランダ施設園芸の長期戦略[3] 収量 100 kg / m² をめざして. 農及園, 83, 1253-1256.
- 75) 建部雅子・石原俊幸・石井かおる・米山忠克 (1995): 培地の窒素形態および Ca : K 比がホウレンソウとコマツナの硝酸, アスコルビン酸, シュウ酸含有率に与える影響. 土肥雑, 66, 535-543.
- 76) 巽 穰・堀 裕 (1970): そ菜の光合成に関する研究 2 温度および光の強さとそ菜幼植物の同化特性. 園試報, A9, 181-188.
- 77) Thompson, H. C., R. W. Langhans, A. J. Both and L. D. Albright (1998): Shoot and root temperature effects on lettuce growth in a floating hydroponic system. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 123, 361-364.
- 78) Tibbitts, T. W. and G. Bottenberg (1976): Growth of lettuce under controlled humidity levels. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 101, 70-73.
- 79) 鳥生誠二・高橋和彦・金 文秀 (1982): 果菜の光合成作用に及ぼす高温の影響. 愛媛農試研報, 22, 17-22.
- 80) 土屋恭一・田中富士雄・成松次郎・城所俊夫・林 英明 (1991): 移動式養液栽培装置の開発と実用化に関する研究 (第1報) 栽培装置の試作. 神奈川県農総研研報, 133, 19-26.
- 81) 辻 博美・山田貴義 (1978): 水耕によるホウレンソウの周年栽培技術の確立に関する研究 (1) 培養液組成・濃度・pH・溶存酸素量の違いが生育に及ぼす影響. 大阪農技セ研報, 15, 17-24.
- 82) 塚越 覚・丸尾 達・伊藤 正・扶蘇秀樹・岡部勝美 (1999): 収穫前の NO₃-N または全肥料成分の補給停止が水耕ホウレンソウの生育と可食部の硝酸濃度ならびに廃液の無機成分濃度に及ぼす影響. 園学雑, 68, 1022-1026.
- 83) 塚澤和憲 (2000). ホウレンソウの養液栽培の実用化に関する研究. 埼玉園試研報, 22, 21-30.
- 84) 上田政文 (1960): 強制対流による水の蒸発速度. 応用物理, 29, 443-451.
- 85) 上田悦範・池田英男・今堀義洋 (1998): 夏季および冬季に養液栽培したホウレンソウの品質と貯蔵性. 園学雑, 67, 446-452.
- 86) Wada, T., H. Ikeda, K. Matsusita, A. Kambara, H. Hirai and K. Abe (2006): Effects of shading in summer on yield and quality of tomatoes grown on a single-truss system. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.*, 75, 51-58.
- 87) 王 秀峰・伊東 正 (1997): 水耕ホウレンソウの生育, 収量および NO₃ 含量に及ぼす培養液の NO₃-N の影響. 園学雑, 66, 313-319.
- 88) 王 秀峰・伊東 正 (1998): 水耕ホウレンソウの生育, 収量, 葉中 NO₃ 含量に及ぼす培養液の硝酸態窒素制限とカリウム増与の影響. 園学雑, 67, 74-80.
- 89) 輪竹宏明 (1997): 総合制御システム. 日本施設園芸協会編, 最新施設園芸の環境制御技術, 137-143. 誠文堂新光社, 東京.
- 90) 渡邊聖文・志和地弘信・岩堀修一・高橋久光 (2006): 施設栽培におけるトマト果実裂果発生要因の解析. 東京農大農学集報, 50, 106-111.
- 91) 渡邊行夫・志和信一・嶋田典司 (1988): 水耕ホウレンソウのアスコルビン酸, 糖, 硝酸およびシュウ酸含量に及ぼす間断給液の影響. 土肥雑, 59, 563-567.
- 92) Went, F. W. (1944): Plant growth under controlled conditions. 2. Thermoperiodicity in growth and fruiting

- of the tomato. *Amer. J. Bot.*, **31**, 135-150.
- 93) Xu, Q., B. Huang and Z. Wang (2002) : Photosynthesis responses of creeping bentgrass to reduced root-zone temperatures at supraoptimal air temperature. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **127**, 754-758.
- 94) 矢吹万寿・宮川秀夫 (1970) : 風速と光合成に関する研究 (第2報) 風速と光合成との関係. *農業気象*, **26**, 137-141.
- 95) 矢吹万寿・宮川秀夫・石橋 惇 (1970) : 風速と光合成に関する研究 (第1報) 風速と葉面境界層の厚さとの関係. *農業気象*, **26**, 65-70.
- 96) 山本元至郎 (1986) : 養液栽培装置. 特許公開 昭 61-265029.
- 97) 山崎肯哉 (1982) : 養液栽培全編. 博友社, 東京.
- 98) 山下文秋・林 悟朗 (1994) : 水耕トマトの低段密植栽培による周年生産 (第2報) 高温期における裂果防止対策. *愛知県農総試研報*, **26**, 157-162.
- 99) Yeager, T. H., R. H. Harrision and D. L. Ingram (1991) : 'Rotundifolia' holly growth and nitrogen accumulation influenced by supraoptimal root-zone temperatures. *Hortscience*, **26**, 1387-1388.
- 100) 吉田 敦・原田和夫・菅原彰敏・但野利明 (1998) : 水耕ホウレンソウの糖, アスコルビン酸, 硝酸, シュウ酸含有率に及ぼす養分中断処理の効果と問題点. *土肥雑*, **69**, 178-184.
- 101) 吉田祐一・大井美知男・藤本幸平 (1987) : NFTにおける培養液冷却の効果. *農及園*, **62**, 650-652.
- 102) 吉村昭信・角山正吉・山本英雄 (1996) : 促成ミニトマト栽培におけるCO₂施用の効果. *奈良農試研報*, **28**, 7-14.
- 103) 張 春蘭・渡邊幸夫・嶋田典司 (1990) : 水耕ホウレンソウの生育ならびに含有成分に及ぼす培養液の窒素濃度の影響. *千葉大園学報*, **43**, 1-5.

Improving Environmental Conditions in a Greenhouse by Cooling the Air and the Root Area Using Latent Heat

Ken-ichiro Yasuba

Summary

In Japan, air temperatures in greenhouses may become too high during summer for cultivating some plants, so the greenhouses are often cooled by taking advantage of latent heat. The latent heat approach relies on the principle that when water is vaporized it draws heat out of the surrounding environment, producing a cooling effect. This approach to cooling is also useful for humidity control in greenhouses. However, an easy method of cooling the root area by means of latent heat has not yet been developed, and the threshold level of cooling that is required to promote crop growth is not clear. Misting is a useful method for cooling the air by taking advantage of latent heat, but it is difficult to control the cooling effect because the ventilation rate of the greenhouse affects the resulting cooling efficiency. To solve these problems, a method for controlling the degree of cooling of the root area and air in greenhouses was developed.

Microporous film was used to cool the root area. Gas and water vapor can penetrate the microporous film, but liquid water cannot. When the hydroponic bed was created from microporous film, water in this bed was able to evaporate through the film, and oxygen from the ambient air passed through the film in the opposite direction and was dissolved in the root water. The relationship between water temperature and airflow velocity at the surface of the microporous film was investigated by connecting a duct to the bottom of the bed made of microporous film. A low airflow velocity (1.2 to 1.5 m s⁻¹) was more effective than other rates (0, 10, and 20 m s⁻¹). The cooling efficiency with microporous film was about 60% of the theoretical cooling effect predicted by latent heat calculations. The rate of oxygen supply through the microporous film was about 0.22 μmol m⁻² sec⁻¹.

Accepted; November 5, 2009

Advanced Greenhouse Production Research Team

40-1 Minaminakane, Taketoyo, Aichi, 470-2351 Japan

The use of a hydroponic bed made of microporous film decreased temperatures in the root area and suppressed the decrease in the concentration of dissolved oxygen in the nutrient solution that occurs at higher temperatures, making it possible to grow spinach plants to commercial size even at high air temperatures. To confirm this result, spinach was grown in a polystyrene bed, a bed of microporous film, or a bed of microporous film combined with the abovementioned airflow treatment; the bed of microporous film consisted of a polystyrene side wall and a bottom created from microporous film. The airflow treatment decreased the nutrient solution temperature and diminished the growth inhibition that occurs at high root temperature. To investigate the growth of spinach under a root-zone cooling treatment, a cooling tube that consisted of a duct made from microporous film and a polyethylene tube was developed. The duct was created from a nylon mesh tube covered with microporous film; the mesh tube passed through a polyethylene tube 18 cm in circumference. The cooling tube was placed in the center of the row of plants. The space between the duct and the polyethylene tube was filled with water, and the duct was connected to a blower to promote evaporation. Use of the cooling tube decreased soil temperatures just under it; growth rates of the spinach plants grown with this system were about 25 % greater than in plants exposed to a high root-zone temperature.

A real-time calculation node for transmitting ventilation and evaporation rates was created by using a ubiquitous environmental controlling system, as these parameters are used to control mist cooling in greenhouses. In this system, information about the status of the environmental control devices (e.g., the amount by which the shade curtain is open) and sensor readings (e.g., for air temperature) are broadcast over a local area network. The node receives data on air temperatures inside and outside the greenhouse, on relative humidity inside and outside the greenhouse, on solar radiation outside the greenhouse, and on the degree of opening of the shade curtain. It then calculates the ventilation and evaporation rates by using the heat-balance method. In addition, it calculates the weight of misting water required to increase the relative humidity in the greenhouse to 100% and forecasts the air temperature at 100% relative humidity. It also calculates the weight of misting water required to decrease the air temperature to a preset value and forecasts the relative humidity at that temperature. The user can then monitor the ventilation rate and other useful information about the effectiveness of the mist cooling in real-time.

A method of adjusting the roof window angle and misting to optimize air temperatures and relative humidity in a naturally ventilated greenhouse was also developed. The window angle was adjusted every 2 min to maintain the enthalpy in the greenhouse at 60 kJ kg^{-1} , which was equivalent to air-conditioning at $23 \text{ }^\circ\text{C}$ and 82% relative humidity. Mist was sprayed if the relative humidity decreased below the target relative humidity. This method maintained adequate air temperature and relative humidity during cool periods. In warm periods, an excessively high window angle decreased the cooling effect caused by misting, so it was necessary to adjust the window angle to avoid an unacceptable decrease in relative humidity in the greenhouse. Tomato was cultivated in a rockwool system in a greenhouse that used the abovementioned environmental control methods combined with CO_2 enrichment. This approach increased early yields for long-duration cultivation, so it appears that the approach improved environmental conditions for tomato cultivation.