

多孔質フィルム製ダクトを使用した冷却チューブによるハウレンソウの根域冷却

安場健一郎*・屋代幹雄・松尾健太郎

東北農業研究センター野菜花き部 020-0123 盛岡市下厨川字鍋屋敷

Effect of Cooling the Root Zone with a Duct of Microporous Film on the Cultivation of Spinach

Ken-ichiro Yasuba*, Mikio Yashiro and Kentaro Matsuo

National Agricultural Research Center for Tohoku Region, Morioka 020-0123, Japan

To investigate the growth of spinach by root-zone cooling, we made a cooling tube consisting of a duct of microporous film and a polyethylene tube. Gas is able to permeate the microporous film, but the film is impervious to water. A duct made from a nylon mesh tube (3 cm diam.) that was covered with a cylindrical microporous film was passed through a polyethylene tube 18 cm in circumference. The cooling tube was 5 m long and bent up 50 cm from both ends; the space between the duct and the polyethylene tube was filled with 6 L of water. The relationship between the cooling tube temperature and air flow rate through the duct above the foam polystyrene boards was investigated. Air flows of 1, 4 and 8 m·s⁻¹ decreased the cooling tube temperature at 1 m from the air intake, whereas treatments above 4 m·s⁻¹ decreased the temperatures at 2.5 and 4 m from the air intake. The cooling tube, which was placed in the center of the row, decreased the soil temperature just under it. The shoot fresh weights of spinach growing near the cooling tube were higher than those grown in the absence of the tube from August 20 to October 5, 2004. These results indicate that the use of the cooling tube with a duct of microporous film improved spinach growth compared with those exposed to a higher root-zone temperature.

Key Words: air flow, cooling, microporous film, root-zone, spinach.

緒言

地温は植物体の生育に密接に関与しており、根域の高温によってしばしば植物体の生育が抑制される (Du・Tachibana, 1994a; He・Lee, 1998; Martin ら, 1989). 高地温下では, Rubisco 活性の低下や (Xu ら, 2002), クロロフィル含量の減少 (Du・Tachibana, 1994b; Ruter・Ingram, 1992; Xu ら, 2002), また, 光合成による炭酸固定が抑制されることが報告されている (Du・Tachibana, 1994b; He ら, 2001). ハウレンソウの生育は根域の温度に影響を受け, 高地温でポット栽培すると生育が抑制され (野口ら, 1993), 高温期に養液栽培を行う場合には, 培養液温を冷却することで生育が促進されることが報告されている (Lee・Takakura, 1995; 上田ら, 1998). これらのことは, 高温下でのハウレンソウの栽培において, 根域を冷却することによって生育抑制を緩和できることを示している.

地床栽培において, 根域を冷却するためには, チラーや地下水などを利用して得た冷水を, 土中に設置したパイプを通して循環させる方法が一般的である (松阪, 1997; 橘, 2001). しかし, 地下水は利用可能な場所が限定され, また, チラーはアルストロメリアのような高単価の品目では収量が増加し (土井ら, 1999), 実用的であるが, 初期投資と多大な電力消費が伴うため利用できる作物が限定される. 一方, 廉価であるためハウス内の冷房に利用される潜熱による冷却も (林, 2001; 松阪, 1997), 最近では, 根域の冷却法としてイチゴの高設栽培 (高市ら, 2000) などの隔離栽培に関しては報告がある. 今後, 地床栽培においても潜熱を利用した低コストな冷却法が確立されれば, より多くの作物で根域冷却が利用できる可能性がある.

筆者らは, 通気性と防水性を合わせもつ多孔質フィルムを水耕槽の構成資材として用い, 水耕槽の多孔質フィルム面へ通風処理を行うことで水耕液温を低下できることを報告した (安場ら, 2004a). この多孔質フィルムは水蒸気を透過するが, 水を溜めることが可能で, 水を溜めた多孔質フィルム表面に通風処理を行った場合には潜熱が奪われ水が冷却される. また, 多孔質フィルムをダクト状に加工し, 水耕液中に設置して通風処理すること

2005 年 2 月 14 日受付. 2005 年 6 月 29 日受理.

本報告の一部は園芸学会平成 17 年度春季大会で発表した.

* Corresponding author.

で水耕液温の低下が可能であることも報告している（安場ら, 2004b）。

本報では、多孔質フィルム製のダクトを利用することにより、地床栽培に適応可能な根域の冷却法を開発することを目的とした。また、開発した冷却装置による根域冷却がハウレンソウの地上部新鮮重に及ぼす影響に関して調査を行った。

材料および方法

1. 装置の概要

長さ 5 m, 直径 20 mm のナイロン繊維製のメッシュチューブ（前田工織, モノドレイン裸チューブ）の外側を、円筒状に加工した多孔質フィルム（住友 3M, プロポア TM ファブリック）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 18 cm 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た（第 1 図）。多孔質フィルムおよびポリエチレンフィルムはシーラーを用いて熱溶着させることで円筒状に加工した。メッシュチューブ内は通風処理を行う場合の通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間の空間には水道水を満たして使用した。

液体を通さず、水蒸気を透過する多孔質フィルムの性質により、ダクトに通風処理を行うと、多孔質フィルムとポリエチレンフィルム間の水が多孔質フィルムを通して蒸発し、潜熱により冷却チューブが冷却される。冷却チューブには 6 L の水を入れ、両端各 50 cm を上方に折り曲げて使用した（第 2 図）。

2. ダクトへの通風処理が冷却チューブの温度低下に及ぼす影響（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のガラス温室にて行った。高さ 50 cm のコンクリート製の台の上に厚さ 20 mm の発泡スチロール板を敷き詰め、その上に冷却チューブを 10 cm 間隔で平行になるように配置し、通風処理を行う前日に冷却チューブに注水した。

通風処理はダクトの片端をブローアに接続し、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。吸引する方向にブローアに接続したのは、特に高風量の場合に、空気がブローアを通過する際に加熱されることを避けるためである。風速はダクトの空気取り入れ口（吸気口）付近において測定し、 $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ （無風）、 $1\sim 1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ （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 反復で試験を行った。通風処理には、 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ では静圧が低い（最大風量 $0.52\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$, 最大静圧 115 Pa ）タイプのプロアー（日本サーボ, FBDC12B4）、 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ および $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ では静圧が高い（最大風量 $1.0\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$, 最大静圧 8.82 kPa ）タイプのプロアー（昭和電工, U2V-30S）をそれぞれ利用し、入力電圧を調節

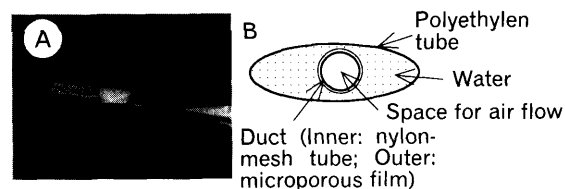


Fig. 1. Cooling tube with a duct of microporous film for root-zone cooling. A, Cooling tube; B, Cross section through the cooling tube.

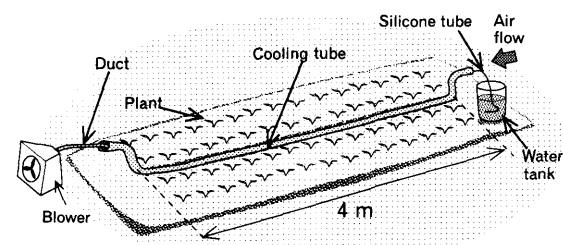


Fig. 2. Device for root-zone cooling with a duct of microporous film. Plants, a silicone tube and water tank were not used in Experiment 1 and 2. The device was placed above foam polystyrene boards instead of above the row in Experiment 1. See cooling tube (Fig. 1).

して使用した。

通風処理中には、30 分ごとの冷却チューブ表面の温度をデータロガーを用いて測定した。測定位置は発泡スチロールと冷却チューブとの接触面、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 時間通風処理を行った。また、冷却チューブ間の誤差を排除するため、2 回の実験で、各チューブに異なる風速を処理した。

3. 冷却チューブを設置した圃場でのダクトへの通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、当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、試験を実施した。冷却チューブは畝の中心線に深さ 5 cm の溝を掘って埋め込んだ（第 2 図）。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、2004 年 10 月 27 日に冷却チューブに注水した。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実験 1 で使用したブローア（昭和電工, U2V-30S）に接続し、通風処理を行った（通風区）。冷却チューブとブローアとの接続部に穴をあけたプラスチック板を入れて風速を $8\sim 9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ に調節し、10 月 29 日 14 時から通風処理を実施した。また、冷却チューブを設置し通風処理を行わない処理区（無風区）、および、冷却チューブを設置しない処理区（未設

置区)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, 未設置区についても畝の中心線で同様に測定を行った。実験は, 未設置区 4 反復, 無風区 2 反復および通風区 2 反復で実施した。

4. 冷却チューブによる地温低下がハウレンソウの生育に及ぼす影響(実験 3)

実験は, 当センターの雨よけハウスで実施した。施肥は 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用し, 70 cm 幅の畝を作成した。処理区は, 冷却チューブによる冷却を行う区(通風区)および冷却チューブを設置しない区(未設置区)の 2 処理区を設け, 4 反復で試験を行った。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(第 2 図)。

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’, ‘ソーベル’, ‘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 株となるように間引きを行った。

冷却チューブへの通風処理(風速 8~9 m·s⁻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, 通風区の 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)の畝中心線直下および中心線から 15 cm 離れた地点で 30 分間隔で測定した。未設置区においても同様に測定した。8 月 27 日から 9 月 9 日までは, 吸気口より 2.5 m 地点以外に 1 m および 4 m の地点の地温を同様に測定した。なお, ハウレンソウの根の分布から考えると比較的浅い地点である深さ 5 cm の地点を測定した理由は, 冷却チューブと畝との接する部分でもあり, 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ためである。

収穫は, ‘次郎丸’ ‘豊葉’ ‘アクティブ’を 10 月 1 日に, ‘ソーベル’ ‘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 株ずつ地上部新鮮重を調査した。

実験は冷却装置の使用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。

結 果

1. ダクトへの通風処理が冷却チューブの温度低下に及ぼす影響(実験 1)

通風期間中の温室の平均気温および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(第 1 表)。

ダクト内に風速 1, 4 および 8 m·s⁻¹ で通風処理を行うと, 無風区より, 各測定位置において, 冷却チューブの温度が低くなった(第 1 表)。風速が 1 m·s⁻¹ と 4 m·s⁻¹ では, 吸気口からの距離が長いと冷却効果が低下し, 4 m の地点では風速 1 m·s⁻¹ では, 0 m·s⁻¹ との温度差が 1°C 以下となった。8 m·s⁻¹ では吸気口から 1 m 地点よりも 2.5 m または 4 m 地点の方が温度が低くなった。また, 相対湿度の平均値が低く, 気温が高かった 2 回目の試験の方がそれぞれの風速において 0 m·s⁻¹ との温度差が大きかった(第 1 表)。温度の低下が最も大きかった 8 m·s⁻¹ における 2.5 m 地点の温度は 0 m·s⁻¹ に比べて, 1 回目の試験では最大で 5.5°C, 2 回目では 10.9°C 低かった(データ省略)。

2. 冷却チューブを設置した圃場でのダクトへの通風処理が地温低下に及ぼす影響(実験 2)

測定期間の平均地温が通風区では 14.3°C となり, 無風区(15.7°C)や未設置区(15.6°C)に比べて低くなった(F 検定, 危険率 5%)。また, 10 月 30 日の正午前後には気温が地温に比べて 10°C 近く上回ったが, そのような気温が地温を上回る条件下においても通風区の地温が他区よりも低くなった(第 3 図)。また, 通風区と他の 2 処理区との日中の温度差は, 相対湿度が低くかった 10 月 30 日で大きい傾向が見られた。

3. 冷却チューブによる地温低下がハウレンソウの生育に及ぼす影響(実験 3)

測定地点を多く設定した期間(8 月 27 日~9 月 9 日)の平均地温は, 通風区の冷却チューブ直下で 21.5~21.9°C となり, その他の地点(冷却チューブから 15 cm 離れた地点, 未設置区の畝の中心線直下および 15 cm 離れた地点)の 23.6~23.9°C より低くなった。

Table 1. Effect of air flow through the duct of microporous film on the temperature of the cooling tube.

Wind velocity (m·s ⁻¹)	Mean temperature (°C) on each length from air intake		
	1 m	2.5 m	4 m
<i>Replication 1 (21.2°C 58%)^z</i>			
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
<i>Replication 2 (23.7°C 46%)</i>			
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 Mean air temperature and mean relative humidity in greenhouse.

^y Mean values of two cooling tube temperature for 24 h from noon at November 18 (Replication 1) and November 22 (Replication 2).

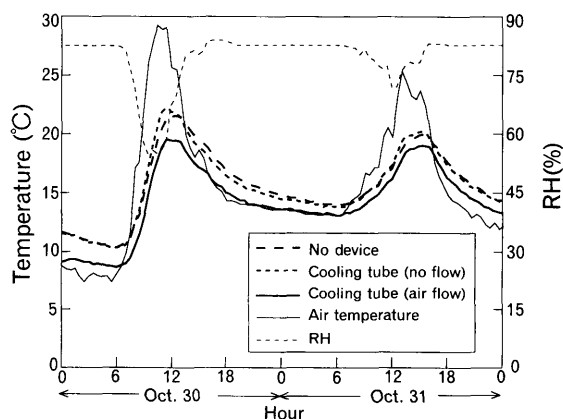


Fig. 3. Effect of air flow treatment in the duct of microporous film on root-zone temperature in Experiment 2. Bold lines indicate root-zone temperatures. Narrow lines indicate air temperature (solid line) and relative humidity (RH, dotted line).

また、通風処理期間中の通風区の冷却チューブ直下および畝の中心線から 15 cm 離れた地点の平均地温は 19.2°C および 20.8°C となった(第 2 表)。一方、未設置区の畝中心線直下および中心線から 15 cm 離れた地点での地温はそれぞれ 21.0°C および 21.5°C となり、通風区では冷却チューブ直下の地温が低くなった。

栽培期間中、比較的气温が高く推移した 9 月 1 日から 4 日間の処理区中央での地温の変化を第 4 図に示した。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) の方が冷却チューブによる地温の低下が大きかった。また、夜間に比べて日中の方が冷却チューブによる冷却効果が大きくなった(第 4 図)。

10 月 1 日から 5 日にかけて植物体の地上部新鮮重を調査し、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、地上部新鮮重は通風区では未設置区に比べて平均すると 25% 程度高くなった(第 3 表)。また、品種と冷却効果の交互作用は地上部新鮮重に対して有意な効果がなかった(第 4 表)。

通風区では畝の中心線側が通路側の植物体よりも新鮮重がやや大きくなる傾向が認められたが、未設置区では畝内の位置による明らかな生育差は認められなかった(第 3 表)。

考 察

発泡スチロール上で行った試験では、吸気口から 1 m の地点では通風処理によって冷却チューブの温度が低下したが、2.5 m 以上の地点では、風速 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ の場合には冷却効果が低かった(第 1 表)。このことから、5 m の冷却チューブを利用する場合には風速が弱いと、空気がダクトを通過する内に湿度が上昇し、潜熱が奪われにくくなるものと推察される。風速 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ の場合には、冷却チューブ全体が冷却されたが、吸気口から 1 m の地点で

Table 2. Effect of the cooling tube on root-zone temperature in cultivation of spinach.

Treatment	Distance from row center	Temperature (°C) on each period					Mean temperature (°C)
		8/27~9/3	9/3~9/10	9/10~9/17	9/17~9/24	9/24~10/1	
No device	0 cm	23.2 ^z	23.9	20.7	21.4	18.8	21.0
	15 cm	23.3	24.2	21.3	21.9	19.5	21.5
Cooling tube (air flow)	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

^z Mean temperature from noon in former date to noon in later date.

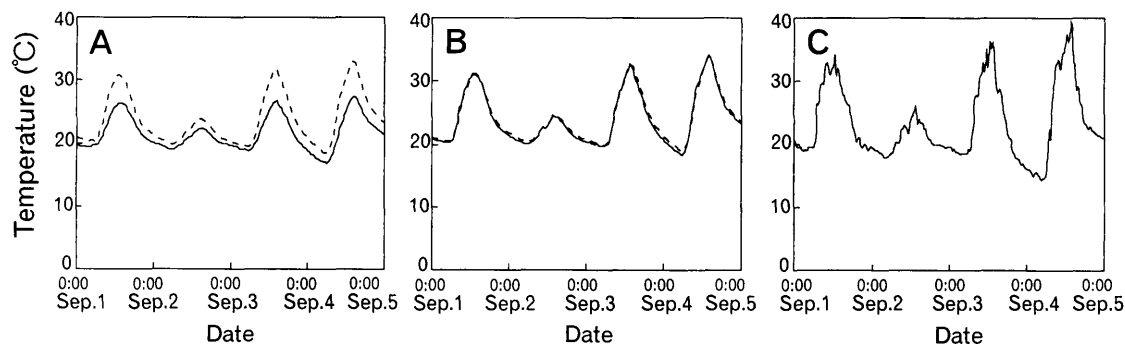


Fig. 4. Changes in root-zone temperature due to air flow treatment in the duct made of microporous film from September 1 to 4 in Experiment 3. The temperatures at the center of the row (solid line) and 15 cm from the center (dotted line) are indicated in Graph A (Cooling tube (air flow)) and Graph B (No device). Graph C shows the air temperature.

Table 3. Effect of the cooling tube on shoot fresh weight of spinach cultivars.

Treatment	Position in row	Shoot fresh weight (g) on each cultivar					
		‘Nobel’	‘Bantyu Paruku’	‘Active’	‘King of Denmark’	‘Hoyo’	‘Jiromaru’
No device	Inside	12.3 ± 2.1	16.4 ± 1.8	16.8 ± 1.5	10.1 ± 0.4	14.5 ± 2.8	15.1 ± 4.0
	Outside	14.9 ± 4.1	17.6 ± 3.5	19.3 ± 3.7	9.2 ± 0.4	14.0 ± 3.8	14.5 ± 5.7
Cooling tube (air flow)	Inside	17.4 ± 4.1	18.1 ± 3.8	19.8 ± 2.4	14.1 ± 1.0	17.2 ± 2.8	19.8 ± 2.6
	Outside	14.9 ± 3.6	17.0 ± 4.0	18.9 ± 4.8	14.0 ± 2.5	14.2 ± 3.4	16.0 ± 4.0

Data indicate mean values of each treatment at each position in row ± SE (n = 4) of the mean.

Table 4. Analysis of variance for the effects of the cooling tube on plant fresh weight of spinach cultivars.

Factor	df ²	Mean Square	F value
Cooling tube	1	148.5	6.67*
Error 1	6	22.3	
Cultivar	5	40.8	12.21**
Interaction	5	3.3	0.98NS
Error 2	30	4.3	

*, ** and NS indicate significant at $P < 0.05$, $P < 0.01$ and non-significant, respectively.

² Degree of freedom.

最も温度が低くなり、吸気口から 2.5 m 以上では冷却効果が低下するものと考えられる。逆に $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ の場合には吸気口から最も遠い 4 m の地点で冷却チューブの温度が最低もしくは最低値付近となったことから、ダクトをさらに長くした場合にも、冷却チューブの温度を低下させることができると推察される。ただ、冷却チューブの部位による温度の違いによって植物の生育差が生じる可能性があるが、実験 3 で測定地点を多く設定した時期（8 月 27 日～9 月 9 日）の冷却チューブ直下の地温のばらつきが 0.4°C であったのに対し、その他の地点では 0.3°C であったことから、圃場条件では著しい温度差はなかった。実験 3 のように圃場にチューブを埋め込む状態で使用すると、熱伝達によってチューブ間の温度差が生じにくくなる可能性が考えられる。以上より、5 m の冷却チューブ全体を冷却するためには $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度の風速では弱すぎ、 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上の風速で処理することが必要であると考えられる。

また、実験 1 においては施設内の空気の湿度が低かった 2 回目の試験で、すべての風速において冷却効果が大きかったことから、通風処理による冷却効果が湿度の影響を受けたと考えられる。このことと同様に、多孔質フィルムを水耕槽として利用し、通風処理を行った場合の水温も、低湿度で冷却効果が大きくなっている（安場ら、2004a）。

植物体の影響を排除するために栽培を行わずに、圃場に冷却チューブを設置した場合には（実験 2）、無風区と未設置区の地温の平均値にはほとんど差がなかった（第 3 図）。このことは、通風処理を行わずに冷却チューブを

設置しても、地温は低下しないことを示している。また、地温の測定を行った期間を通して、通風区で他区よりも地温が低くなったが、地温より気温が高い期間と低い期間では冷却の原理が異なると考えられる。

地温より気温が高い期間（主として日中）に通風処理を行うと、顕熱による熱伝達により冷却チューブ温および地温が上昇する方向に作用する。しかし、日中は温室内の相対湿度が気温の上昇に伴って低下する場合が多く（第 3 図）、潜熱による冷却効果が顕熱の効果を上回るために通風区で地温が低くなると考えられる。

一方、地温より気温が低くなる期間は、特に夜間が相当するが、日中に比べて気温が低下し相対湿度が高くなるため飽差が小さくなり、通風処理を行った場合の潜熱による冷却効果は小さくなると考えられる。10 月 30 日～31 日の夜間の施設内での環境（気温 $10\sim15^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $80\sim90\%$ ）では、通風乾湿計の乾球と湿球の温度差は $1\sim2^\circ\text{C}$ 程度である。しかし、多孔質フィルムを介した場合には水の蒸発量が減少すると考えられ、冷却チューブ温は湿球温度まで低下しないと考えられる。この期間のほとんどで、通風区の地温は未設置区や無風区の地温と気温との間の値で推移していることから、顕熱による熱伝達で冷却チューブ温が低下すると考えられる。

ハウレンソウを栽培した場合には、播種からの日数が経過した 9 月 24 日以降には、冷却チューブ直下とその他の地点との地温の差が小さくなる傾向が認められた（第 2 表）。気温が低い日の方が通風区と無風区および未設置区との地温の差が小さくなる傾向があり（第 3 図、第 4 図）、9 月下旬の気温の低下によって通風区と未設置区との地温差が小さくなった可能性がある。また、植物体の生長が冷却チューブによる冷却に抑制的に作用した可能性も考えられる。通風区の地温は全天日射量が小さい日（9 月 2 日）は未設置区との温度差が小さくなることから（第 4 図）、植物体の遮光によって冷却効果が低下した可能性が考えられる。また、植物体からの蒸散によって湿度が上昇し、冷却チューブから潜熱が奪われにくくなる可能性が考えられる。もし、植物の生長が通風区の冷却に影響を及ぼすと仮定すれば、冷却チューブによる冷却は特に栽培前期の地温低下に有効であると考えられる。

実際に栽培したハウレンソウ 6 品種の地上部新鮮重

は、通風区の冷却チューブ近くの株で大きくなった（第3表, 第4表）。ポット栽培の場合には地温 32.5°C で（野口ら, 1993）、水耕栽培の場合には培養液温が 28°C 以上で、地上部新鮮重が低下することが報告されている（Lee・Takakura, 1995）。本研究で、9月上旬には未設置区や通風区の畝中心線から離れた部分では地温が 30°C を越える場合があったが（第4図）、通風区の冷却チューブ直下では最高でも 28.5°C に地温の上昇が抑えられた。このことから、地温が高温で推移する条件では、冷却チューブによる冷却により、ホウレンソウの生育が促進されると考えられる。今回実験に使用した品種は、東洋種と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）。このような6品種を用いたにもかかわらず、冷却チューブと品種の交互作用が新鮮重に影響を及ぼさないことから（第4表）、冷却チューブの利用による新鮮重の増加は、特定の品種群にあらわれるものではないと考えられる。

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認められず、通風区の通路側の植物体では畝中心線側の植物体よりもほとんどの品種で地上部新鮮重が小さくなる傾向が認められた（第3表）。実験3では、畝表面に設置した冷却チューブが植物体の新鮮重に及ぼす範囲を調査するために冷却チューブを1畝に1本とした。畝全体でホウレンソウの生育促進を図るためには冷却チューブをより密に配置することが必要であると考えられる。ただ、‘キングオブデンマーク’に関しては、通路側の植物体でも未設置区より新鮮重が大きくなる傾向があり（第3表）、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も考えられる。

また本実験では、圃場での通風処理には出力 300 W の最大静圧が高く (8.82 kPa)、最大風量の小さい ($1.0\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$) ブロアーを使用し、5 m（埋設した長さは 4 m）の冷却チューブ4本に対して通風処理を行った。通風ダクトの径が小さく、長さが長い場合には、通風時の抵抗が大きくなるため最大静圧の高いブロアー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、チューブ長を長くした場合にはダクト内の湿度が上昇し冷却効率が低下することによる、温度差が生じることも考えられる。

今後、冷却チューブの配置とともに、ダクト径および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域冷却法が実用化に近づくものと考えられる。

摘 要

水蒸気は透過するが、液体は透過しない性質を持つ多

孔質フィルムを使用した冷却チューブを製作し、ホウレンソウの栽培における根域冷却を試みた。冷却チューブは、直径 3 cm のナイロンメッシュチューブを円筒状に加工した多孔質フィルムで覆ったダクトを、円周 18 cm のポリエチレンチューブに通して製作した。冷却チューブは 5 m とし両側を 50 cm ずつ上方に折り曲げ、ダクトとポリエチレンフィルムの間の空間に 6 L の水を満たして使用した。冷却チューブ内の風速 ($0, 1, 4$ および $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) と冷却チューブの温度との関係を発泡スチロール上で調査したところ、 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ の場合には吸気口から 1 m 地点まで、 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上の場合には少なくとも 4 m 地点まで温度が低下した。冷却チューブを畝中心線に設置し、 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ の送風処理を行った場合には冷却チューブ直下の地温が低下した。また、2004 年 8 月 20 日から 10 月 5 日まで栽培を行ったホウレンソウでは、冷却チューブ付近の植物体の地上部新鮮重が約 25% 高くなった。これらのことから、冷却チューブによる地温の低下が、高地温によるホウレンソウの生育抑制を回避するために有効であると考えられた。

引用文献

- 土井元章・陳 忠英・斉藤香里・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.
- Du, Y. C. and S. Tachibana. 1994a. Effect of supraoptimal root temperature on the growth, root respiration and sugar content of cucumber plants. *Sci. Hort.* 58: 289–301.
- Du, Y. C. and S. Tachibana. 1994b. Photosynthesis, photosynthate translocation and metabolism in cucumber roots held at supraoptimal temperature. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 63: 401–408.
- 林真紀夫. 2001. 冷房一地上部環境制御. P. 449–458. 農業技術体系花卉編 3. 環境要素とその制御. 農山漁村文化協会. 東京.
- He, J. and S. K. Lee. 1998. Growth of 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.
- 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.* 359: 1323–1330.
- 香川 彰. 2004. 品種の特性. p. 53–60. 野菜園芸大百科 第15巻. ホウレンソウ・シュンギク・セロリ. 農山漁村文化協会. 東京.
- Lee, Y. D. and T. Takakura. 1995. Root cooling for spinach in deep hydroponic culture under high air temperature

- conditions. *Acta Hort.* 399: 121–126.
- Martin, C. A., D. L. Ingram and T. A. Nell. 1989. Supraoptimal root-zone temperature alters growth and photosynthesis of holly and elm. *J. Arboriculture* 15: 272–276.
- 松阪元夫. 1997. 冷房装置. p. 66–82. 日本施設園芸協会編. 最新施設園芸の環境制御技術. 誠文堂新光社. 東京.
- 野口正樹・岩波 壽・井上昭司. 1993. 高温環境がホウレンソウの生育及び生理的特性に及ぼす影響. 園学雑. 62 (別 2) : 294–295.
- Ruter, J. M. and D. L. Ingram. 1992. High root-zone temperatures influence RuBisCO activity and pigment accumulation in leaves of ‘Rotundifolia’ holly. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 117: 154–157.
- 橘 昌司. 2001. 根域温度管理 地温とその調節. P. 459–472. 農業技術体系花卉編 3. 環境要素とその制御. 農山漁村文化協会. 東京.
- 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.
- 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.
- Xu, Q., B. Huang and Z. Wang. 2002. Photosynthetic response of creeping bentgrass to reduced root-zone temperatures at supra optimal air temperature. *J. Amer. Hort. Sci.* 127: 754–758.
- 安場健一郎・屋代幹雄・松尾健太郎. 2004a. 多孔質フィルムを用いた水耕槽表面の風速制御が水温に及ぼす影響. 生物環境調節. 42: 123–130.
- 安場健一郎・屋代幹雄・松尾健太郎. 2004b. 多孔質フィルム製ダクトを利用した地下部冷却法の開発. 園学東北支部要旨. 平 16: 37–38.