

保水シート耕方式の養液栽培における根域の気相/液相部比率が トマトの生育・収量に及ぼす影響

坂本有加¹・渡邊慎一¹・岡野邦夫^{1*}・巽 二郎²

¹ 野菜茶業研究所果菜研究部 470-2351 愛知県知多郡武豊町

² 名古屋大学大学院生命農学研究科 464-8601 名古屋市千種区不老町

The Influences of Gas/Liquid Phase Ratios in the Root-zone on Vegetative Growth and Fruit Yield of Tomato Grown in Wet-sheet Culture

Yuka Sakamoto¹, Shin-ichi Watanabe¹, Kunio Okano^{1*} and Jiro Tatsumi²

¹ Department of Fruit Vegetables, National Institute of Vegetable and Tea Science, Taketoyo, Aichi 470-2351

² Faculty of Agriculture, Nagoya University, Nagoya, Aichi 464-8601

Summary

Effects of gas/liquid phase ratios in the root-zone on vegetative growth and fruit yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) were investigated. The plants were grown in a wet-sheet culture, in which a part of the root system is directly exposed to the atmosphere. Ratios of the gas/liquid phase in the root-zone were: 0 % (whole roots were submerged in the nutrient solution), 25 %, 50 %, 75 %, and 100 % (the entire root system is developed on the wet sheet and exposed to the atmosphere). The oxygen concentration in the nutrient solution ranged from 1.9 to 3.0 ppm during the growth period.

Enlarging the gas phase area in the root-zone up to 50 % increased the dry weight of shoots and roots. Leaf expansion was suppressed both at 0 and 100 % gas phase. Fruit yield and weight were heavier when the gas phase exceeded 50 %, whereas the percentage of dry matter and soluble solids decreased. Photosynthetic rate of leaves was significantly lower at the 0 % gas phase, while total root respiration increased as the gas phase was increased to 75 %.

These results indicate that partial exposure of roots to atmosphere promoted physiological activity of whole root system in hydroponics. Tomato roots in the non-aerated nutrient solution were injured by oxygen deficiency, whereas roots maintained only on the wet sheet suffered from water stress. Hence, for stable growth of tomato plants, their roots need exposure to both the liquid and gas phases.

Key Words: gas phase, hydroponics, root respiration, tomato, wet-sheet culture.

緒 言

野菜の養液栽培には、湛液水耕、NFT耕、ロックウール耕等の方式がある。わが国では、近年ロックウール耕が増加しているが、湛液水耕の占める割合は38%と依然として大きい(農林水産省野菜振興課, 2000)。湛液水耕は固形培地耕に比べて培養液量が多いため、EC、pH、液温などの根部環境が安定するという利点がある反面、設備費やランニングコストが高く、病害の蔓延や、培養液の溶存酸素濃度の低下による生育不良が問題となりやすい(佐々木, 1996)。溶存酸素濃度の低下に伴い、トマトやキュウリでは生長が抑制され(郭・橋, 1997)、レタス

では根の呼吸速度が低下する(Chun・Takakura, 1994)等の報告がある。

根系への酸素供給量を増加させる手段としては、ベッド内の液深を変化させ、根を空气中に露出させる方法がある(佐々木, 1996)。山崎(1986)は、気相中に形成される“湿気中根”は液相中に発達する“水中根”に比べて根毛の発生量が多く、環境適応幅が広いことを、また位田(1953)は、根への酸素の取り込みは水中より空气中で多く、根への効率的な酸素供給のためには根を空気にさらすことが効果的であることを指摘している。

このような観点から、我々は湿気中根を発達させる手段として“保水シート耕(WSC: Wet-Sheet Culture)”方式を開発した(坂本ら, 1998; 岡野ら, 1999)。この方式の特徴は、株元の根が培養液で湿った吸水性シートの上を伸長するため、根系の一部が絶えず空气中に露出して

2000年7月24日 受付。2001年2月13日 受理。

本報告の一部は園芸学会平成11年度秋季大会において発表した。

*現在:花き研究所企画調整室

いることにある。そのために、湿気中根と水中根の併存が可能となり、湛液水耕で問題となる培養液中の酸素不足による生育不良が緩和される。類似の方式として、愛知型折衷方式(山下・林, 1995), NK毛管水耕(丸山ら, 1997)などのいわゆる毛管水耕方式があるが、これらも湿気中根の役割を重視した栽培様式といえる。このように、養液栽培における湿気中根の重要性について一定の評価があるが、その生理的役割についての詳細な検討はほとんどなされていない。そこで本研究では、保水シート耕方式のトマト一段採り栽培における湿気中根の役割を明らかにするために、根系中の湿気中根と水中根の比率を変えることによって、植物体の生育、収量や根の呼吸活性がどのように変化するかを調査した。そして、得られた結果に基づき、湿気中根の植物の生育に果たす役割について考察した。

材料および方法

1. トマトの栽培方法

トマト (*Lycopersicon esculentum* Mill.) ‘桃太郎’の種子を、1999年3月16日にロックウール細粒綿を詰めた128穴セルトレイに一穴おきに千鳥状に播種した。かん水は子葉展開時までは水道水を適宜、子葉展開後は1/4濃度の太塚A処方培養液($EC\ 0.6\ dS \cdot m^{-1}$)を底面給液法により1日1回与えた。播種後22日目の4月7日に、本葉4葉展開期の若苗を、ガラス温室内に設置した保水シート耕方式(岡野ら, 1999)のコンテナ養液栽培装置($64 \times 39 \times 13\ cm$)に定植した。

定植後の培養液管理は、1/2濃度の太塚A処方を用いて行った。地上部は1株ずつ振り分け誘引し、5月7日に第1果房上に2葉残して主枝を摘心し、腋芽はすべて除去して一段採り栽培とした。5月1日~7日に第1花房上の第3花が開花した時点で、着果促進剤(トマトーン100倍液)を散布した。

2. 養液栽培装置および処理区

本研究で用いた保水シート耕方式の養液栽培装置の基本構造を第1図に示す。プラスチックコンテナの中央部

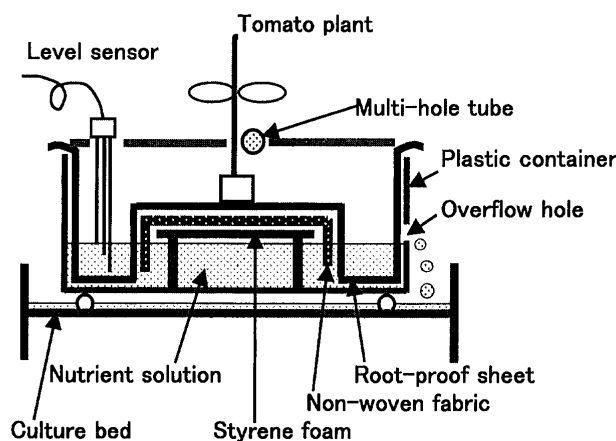


Fig. 1. Wet-sheet culture (WSC) system for the cultivation of single-truss tomato.

に定植台を設け、その上に厚さ2mmの不織布(ジャムガード7210S, 東洋紡)と防根透水シート(BKS0812, 東洋紡)を敷いた。給液方法は、定植から活着までの数日間手かん水で、以後はコンテナ内に設置した水位センサー(61F型, オムロン)でコンテナ内の水位が一定範囲内に保たれるよう、かん水チューブ(エバーフロー散水用A, 三井石油化学)で上部から行った。余剰液はコンテナ側面のオーバーフロー穴より排出した。コンテナは30mm厚の発泡スチロール板でふたをし、培養液の水温上昇と蒸発を防いだ。

試験区として、コンテナ底面積に対する定植台の面積比率(気相部比率)を、定植台の幅を変えることによってそれぞれ0%, 25%, 50%, 75%, 100%とし、湿気中根と水中根の比率を変えた5区を設けた(第2図)。以後、これらの区を0%区, 25%区, 50%区, 75%区, 100%区と呼ぶ。なお、0%区は発泡スチロール板を水面に浮かべる形で設置し、根の全てが培養液中に伸長した。25~75%区では株元付近の根が保水シート上に、根系の先端部が培養液中に伸長した。また、100%区の根は全て保水シート上に伸長した。以後、保水シート上に伸長した根を湿気中根、培養液中に伸長した根を水中根とみなす。根の乾物総重に占める湿気中根の重量比率は、開花期には25, 50, 75%区でそれぞれ67, 87, 87%, また収穫期にはそれぞれ87, 85, 91%となった。生育期間中の気温は $11.6^{\circ}C \sim 37.2^{\circ}C$, 培養液温は $14.4^{\circ}C \sim 28.4^{\circ}C$, 保水シート部温度は $14.2^{\circ}C \sim 26.2^{\circ}C$ で推移した。また、培養液中の溶存酸素濃度は1.9~3.3 ppmの範囲であった。

3. 生育および生理活性の調査

生育調査は、定植後7日毎に茎長および葉数について行った。培養液中の溶存酸素濃度の測定は、0%区について4月12日と5月1日に携帯用DOメーター(A-801, 飯島電子工業)を用いて行った。

開花初期の4月27~28日(定植後19~20日目)に各区8個体採取し、地上部と根に切りはなしたのち、葉面積を面積計(AAC-400, 林電工)を用いて測定した。また、切断根について部位別の呼吸活性と乾物重を測定した。根の呼吸活性の測定は O_2 アップテスター(5B型, タイテック)を用いた(岡野・大前, 1996)。測定する根は、水中根と湿気中根に分離し、両者とも茎に近い根の基部寄りから約6cm毎に切断し、末端の余剰部は先端部位に加えた。

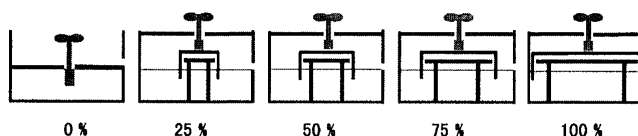


Fig. 2. Schematic diagrams showing the ratio of gas/liquid phase in root-zone. 0%plot: whole roots are submerged in the nutrient solution, 100%plot: whole roots developed on the wet sheet and exposed to the atmosphere.

果実肥大期の5月31日に、携帯用光合成・蒸散測定装置(LI-6400, LI-COR)を用いて最上位葉の圃場光合成速度を測定した。測定条件は、葉温 25℃, 通気速度 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{sec}^{-1}$, 光合成有効放射束密度 (PPFD) 1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$, 相対湿度約 48%, CO_2 濃度約 370 ppm とした。

4. 果実調査

6月8日から14日にかけて表面全体が赤色に着色した果実を収穫し、全果実について新鮮重と障害果の発生状況を調査した。また、大きさの揃った果実15個体について、おろし金ですりおろした後にガーゼでろ過し、屈折計(N-1, アタゴ)により糖度(Brix値)を、滴定法(西条, 1997)によりクエン酸含量を測定した。果実中の無機成分含量は、縮分した果実片をビーカーに入れ、80℃で48時間乾燥、硝酸分解後(小山, 1997), プラズマ発光分光分析装置(SPS7700, セイコーインスツルメンツ)により測定した(Spiers, 1983)。

結 果

1. 植物体の生長

草丈は、定植後20日目までは0%区で他区よりやや大きかったが、以降は全区ともほぼ等しくなった。葉の展開速度および第1花房の開花時期について、処理区間差は認められなかった(データ省略)。一方、開花期以降、0%区において葉の上偏生長がみられた。

開花期の葉面積は25%~75%区で大きく、0%区と100%区では有意に小さかった(第1表)。また、収穫期の葉面積は、75%区までは気相部比率の増大に伴って増加したが、100%区では25%~50%区と同等に小さかった。

地上部乾物重は開花期では処理区間で大差なかったが、収穫期では湿気中根を発生させたすべての区で0%区より大きかった。しかし、湿気中根のみの100%区では、葉及び茎の乾物重が75%区より小さくなる傾向がみられた。根の乾物重は開花期、収穫期ともに気相部比率の大きい区で増加する傾向であった。地上部と根の乾物重比(S/R比)は、気相部比率が大きいほど小さく、その傾向は開花期で顕著であった。

2. 果実収量および品質

果房当りの着果数は、100%区で4.4個と0~75%区の約4個に比べてやや多かった(データ省略)。収量は、50%区までは気相部比率の増大に伴って増加したが、50%以上の処理区間では明確な差は認められなかった(第3図)。また、一果重も収量と同様の傾向であった。

果実の乾物率は、気相部比率の小さい0%区や25%区で高く、50%区以上の区では低かった。同様に、糖度は

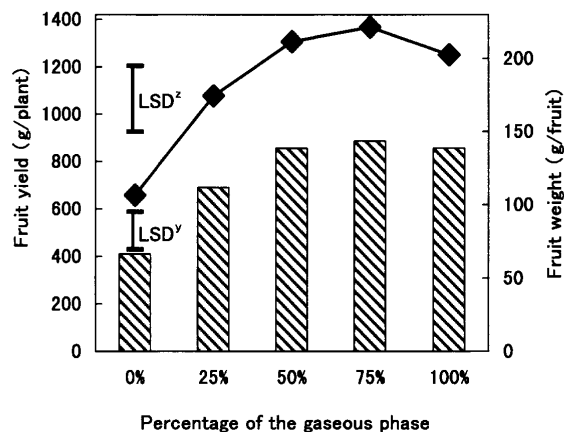


Fig. 3. Effects of gas/liquid phase ratios in the root-zone on fruit yield and single-truss tomato. ▨, fruit yield; ◆, fruit weight. Vertical bars LSD at $P=0.05$. ^zLSD on fruit weight. ^yLSD on fruit yield.

Table 1. Effects of gas/liquid phase ratios in the root-zone on the growth of single-truss tomato in wet-sheet culture.

Growth atage	Percentage of gaseous phase	Leaf area (cm^2/plant)	Dry weight (g/plant)			S/R ^z
			Leaf	Stem	Root	
Flowering ^x	0%	917b ^y	3.7a	1.7a	0.7c	8.0
	25%	1373a	4.4a	2.0a	1.4b	4.5
	50%	1188a	4.2a	1.7a	1.3b	4.6
	75%	1207a	4.3a	1.7a	1.8a	3.4
	100%	912b	3.7a	1.4a	1.8a	2.9
Harvest ^w	0%	1658c	10.0c	7.9b	7.3c	2.5
	25%	2928b	14.8b	9.7a	10.8b	2.3
	50%	3183ab	18.7a	9.5a	12.2b	2.3
	75%	3674a	20.7a	10.3a	12.9a	2.4
	100%	3128b	18.9a	8.9ab	14.3a	1.9

^zShoot dry weight/root dry weight.

^yValues followed by the same letter within same measurements are not significantly different at $P=0.05$.

^xMesurements were carried out on 27 April. Values are the mean of 8 repetitions.

^wMesurements were carried out on 15 June. Values are the mean of 16 repetitions.

0%区で6.8と高く、25%区で5.9、50%区以上の区では5.1~5.4と低かった(第2表)。クエン酸含量は50%区が他の区に比べてやや低い傾向であった。

果実の新鮮重100g当たりのカリウム、リン、カルシウム含有量は、いずれも処理区間で差が認められなかった(第4図)。一方、1果当たりの含有量は75%区までは気相部比率が高まるにつれて増加したが、100%区では減少した。

障害果割合は、50%区、75%区および100%区などの比較的気相部比率の高い区では3~11%と低かったが、0%区、25%区では15~17%と若干高かった(データ省略)。障害果の種類として、窓あき果、チャック果、尻腐れ果がみられたが、気相部比率と各障害果発生との関係は明らかではなかった。

3. 葉の光合成速度と根の呼吸活性

果実肥大期の最上位葉の光合成速度は、気相部比率25%以上の区でいずれも $25\sim30\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ と大差なかった(第3表)。しかし、0%区の光合成速度は、他の区の6割程度と低かった。

Table 2. Effects of gas/liquid phase ratios in the root-zone on fruit quality of single-truss tomato in wet-sheet culture.

Percentage of gaseous phase	Dry matter percent (%)	Soluble solids content (Brix %)	Citrate content ($\text{mg}\cdot100\text{ml}^{-1}$)
0%	7.1 ^z a ^y	6.8 ^x a	574 ^x a
25%	6.0b	5.9b	587a
50%	5.1c	5.1d	481b
75%	5.1c	5.4c	528ab
100%	5.3c	5.4c	528ab

^zValues are the mean of 15 to 19 fruits.

^yValues followed by the same letter within same measurements are not significantly different at $P=0.05$.

^xValues are the mean of 5 to 8 fruits.

Table 3. Effects of gas/liquid phase ratios in the root-zone on photosynthesis. ^z

Percentage of gaseous phase	Photosynthesis ($\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$)
0%	19.3 ^y b ^x
25%	27.4a
50%	29.1a
75%	27.7a
100%	28.6a

^zMeasurements were conducted on the uppermost leaves during fruit development.

^yValues are the mean of 12 leaves.

^xValues followed by the same letter within same measurements are not significantly different at $P=0.05$.

開花期の根の呼吸速度は、いずれの区も茎の基部に近い側の進んだ部位で小さく、根系の先端部の若い部位ほど大きい傾向であった(第5図)。呼吸速度を部位別に比較すると、最も基部側は処理区間に差はなかったが、根系中央から先端にかけての根の呼吸速度は、気相部比率

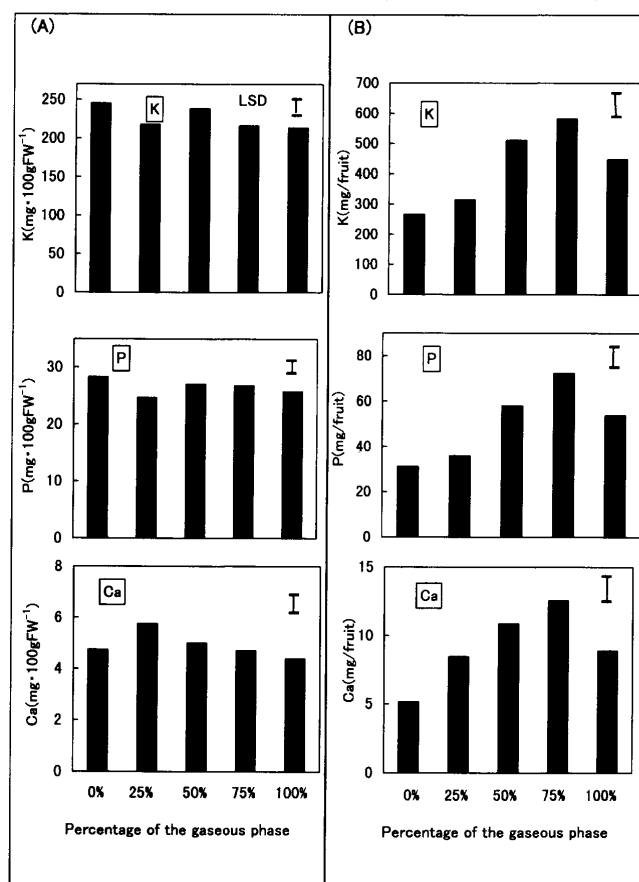


Fig. 4. Effects of gas/liquid phase ratios in the root-zone on mineral contents of tomato fruit. A, fresh weight basis; B, whole fruit basis. Vertical bars represent LSD at $P=0.05$ ($n=21$).

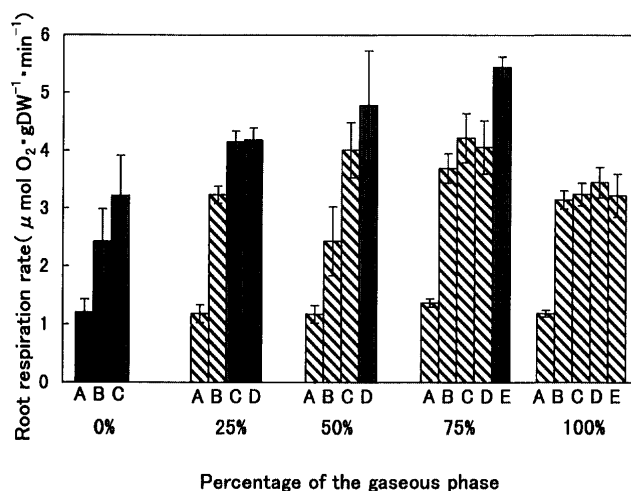


Fig. 5. Effects of gas/liquid phase ratios in the root-zone on respiratory rate of tomato root segments. ▨, roots in the gaseous phase; ■, roots in the liquid phase. Measurement was carried out flowering stage. Roots were divided in 6cm intervals from the basal part of stem. A, 0–6 cm; B, 6–12 cm; C, 12–18 cm; D, 18–24 cm; E, 24 cm. Values are the mean of 3 to 5 measurements $\pm$ SD.

の高い区で大きかった。また、100%区における呼吸速度は0%区と同程度に低かった。

部位別の根の呼吸速度から、湿気中根と水中根の呼吸量を計算した結果を第6図に示した。根系全体の呼吸量は75%区で最も大きく、0%区で最も小さかった。

考 察

1. 水中根のみの根系における問題点

湛液水耕では根系全体が水中に存在するため、溶存酸素濃度の低下が生育阻害要因となる場合が多い。トマトでは溶存酸素濃度が2 ppm以下で葉の無機成分濃度が低下し、莖葉及び根の生長抑制が生じることが報告されている(郭・橘, 1997)。本実験では、生育期間中の培養液の溶存酸素濃度が1.9~3.3 ppmと飽和溶存酸素濃度(7.8~10.0 ppm)よりかなり低かった。根系全体が培養液中に浸漬され、水中根のみを持つ0%区では、各部位の呼吸速度が小さく(第5図)、その結果として、根系全体の呼吸量が小さかった(第6図)。酸素欠乏条件下で根の呼吸が抑制されると、根の細胞の膜透過性が低下し、通導抵抗が増大すると考えられる(Everard・Drew, 1987)。また、低溶存酸素濃度下で生育させたキュウリの根では、皮層組織におけるリグニン蓄積によって水の透過性が低下するため、養水分吸収が阻害されると考えられている(吉田ら, 1998)。本実験では根の内部形態を観察しなかったが、1.9~3.3 ppmという低溶存酸素濃度条件下に約2ヶ月間おかれていたことから、同様の根の形態変化による吸水の抑制が生じていた可能性がある。また、0%区で見られた果実の乾物率及び糖度の増加は、根に対する水ストレスの付与によって起こる現象(Ehret・Ho, 1986; Adams, 1991; Sakamotoら, 1999)と一致している。さらに、嫌氣的条件下では、サイトカイニン合成の減少お

よびエチレンやアブシジン酸の多量の生成などのホルモン信号により、葉の気孔の閉鎖や上偏生長が起こる(Bradford・Yang, 1981)。本実験の0%区においても光合成速度が低下し(第3表)、葉の上偏生長が認められた。以上のことから、酸素欠乏下におかれた0%区の根では、呼吸速度の低下に続いて水透過性が低下し、次いで吸水量の減少およびホルモン信号によって気孔が閉鎖し、光合成が阻害されたものと推察される。光合成速度の低下は、同化産物の根への分配量を減少させ、エネルギー状態の悪化によりさらなる呼吸速度の低下をもたらす(Osakiら, 1995)ものと考えられる。0%区における根の乾物重の減少程度は地上部乾物重のそれより大きく、S/R比が大きくなったことから、根への光合成産物の供給が相対的に減少していたことが分かる(第1表)。このように、根の生理活性の低下と、それに起因する養水分吸収能と光合成速度の低下の悪循環によって、結果として果実収量の低下(第3図)と果実の無機成分蓄積量の減少(第4図)に至ったものと考えられる。

2. 湿気中根のみの根系における問題点

湿気中根は、空気中の酸素を直接利用することができる。空気中には酸素が約21%含まれるが、水中の飽和溶存酸素濃度は20℃で8.84 ppmと非常に低い。さらに、空気中の酸素の拡散速度は水中の約8300倍である(牛木ら, 1993)ため、根表面までの拡散抵抗は水中と比較して非常に小さく、酸素不足による呼吸低下に陥る危険性はほとんどない。しかし、根系全体が湿気中におかれていた100%区においては、根量が最も大きかったにもかかわらず、根の呼吸量が75%区より小さかった(第1表, 第6図)。また、果実の無機成分蓄積量も50%区と75%区に比較して少なかった(第4図)。保水シート上の湿気中根は、1日数回の給液時以外は、不織布に保持される養水分のみに依存している。山下・林(1995)は、本実験と同じ不織布を培地としてトマトの養液栽培を行い、不織布を薄くすると保水力が低下し、トマトの地上部重が小さくなると報告している。また、葉の乾物重に有意差がなかったが、葉面積は50%区と75%区に比べて100%区で小さくなった。水ストレスを受けた植物体では、根の生長が促進される(Sponchiadoら, 1989)とともに、葉においては、乾物重よりも葉面積の増加が顕著に抑制される(Michelena・Boyer, 1982; 荒木・五島, 1985)ことが知られている。本実験においては、各区の水ストレス強度の計測は行わなかったが、100%区では培地の保水力が養水分供給に対する制限要因となり、ある程度の水ストレスがかかっていたと考えられる。

3. 湿気中根と水中根の適正比率とその生理的意義

本報告では、根全体に占める湿気中根の比率がトマトの生育に与える影響を明らかにしようとした。葉の乾物重と葉面積は、開花期では25~75%の処理区間に差はなかったが、収穫期には50%区と75%区で25%区に比べ

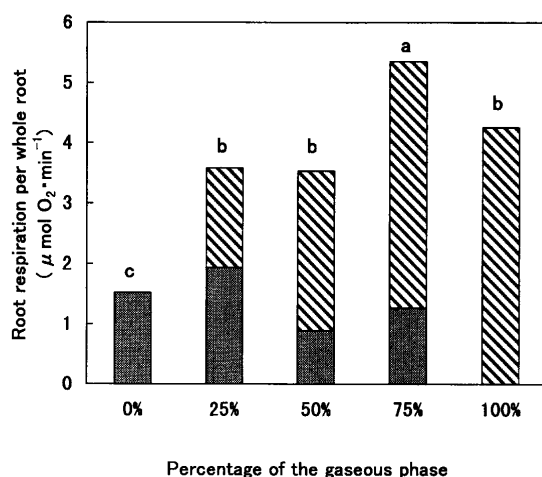


Fig. 6. Effects of gas/liquid phase ratios in the root-zone on respiration of whole root. ▨, in the gaseous phase; ■, roots in the liquid phase. Measurement was carried out at flowering stage. Values are the mean of 3 to 5 measurements. Different letters represent significant differences at $P=0.05$.

て大きくなった(第1表). また, 一果重と収量においても, 50%区と75%区で25%区に比べて大きかった(第3図). さらに, 果実の乾物率および無機元素の蓄積量についても, 同様の傾向であった(第2表, 第4図). 根系全体の呼吸量は75%区で最大となり, 25%区と50%区の間では差がみられなかった(第6図). また根系の最先端部分の呼吸速度は, 0%区や100%と比べて, 25~75%区で高かった(第5図). 一方, 光合成速度は気相部比率25%以上の区間に差はみられなかったが(第3表), S/R比は気相部比率が大きいほど小さかった(第1表). 以上の結果から, トマトの生育や生理活性からみた適正な気相部比率は50%~75%の間にあると推察される.

水中根と湿気中根から成る根系は, 根の呼吸速度が大きく, 養水分の吸収が促進されることにより, 地上部の生長が旺盛となり, 果実肥大と内容成分の蓄積がすすむと考えられる. 水中根のみの場合は, 低溶存酸素濃度による根の呼吸抑制と皮層細胞の水透過性の低下(吉田ら, 1998)のため, 酸素と養水分の吸収において不利である. 一方, 湿気中根のみの場合は, 酸素吸収においては有利であるが, 水ストレスのため養水分吸収が制限される場合がある.

このような根の特性から, ひとつの根系中に水中根と湿気中根をバランスよく配置することで, 特別な根域環境の制御を行わなくとも, 酸素欠乏や水ストレスの問題を回避できるものと考えられる. 生産性の高い養液栽培方式の確立のためには, 湿気中根と水中根の生理的性質の違いをより詳細に明らかにしていく必要がある.

摘 要

根系の一部を湿気中に露出させる保水シート耕において, 根域の気相/液相部比率を5段階(気相部比率0%, 25%, 50%, 75%, 100%)に変えて湿気中根と水中根の割合を変化させ, トマト根の活性や生育・収量に及ぼす影響を調べた. 水中根の存在する培養液中の溶存酸素濃度は1.9~3.0 ppmの範囲であった. 気相部比率25%以上の処理区で地上部の乾物重が大きく, 気相部比率が大きいほど地下部の乾物重が増大した. 葉面積は, 気相部比率75%までは気相部比率の増大に伴って大きくなり, 100%区では25%区と同等に小さかった. 果実収量は気相部比率50%以上の区で大きかった. 糖度, 乾物率は気相部比率の小さい区でやや高く, 50%以上の区では低かった. 果実肥大期の葉の光合成速度は0%区で有意に低かった. 根系全体の呼吸量は75%区で最も大きく, 0%区で最も低かった. これらの結果から, 1)水中根のみの根系をもつ植物体は, 酸素欠乏により根の活性低下と伸長阻害が生じ, 光合成や生長が抑制されること, 2)湿気中根のみの根系をもつ場合は, 果実収量・品質に有意な影響はないものの, 水ストレスにより根の呼吸活性が低下し, 無機成分の吸収が低下し, 葉面積が減少すること, 3)

湿気中根と水中根が併存する根系をもつ場合は, 根の呼吸活性が高く維持され, 水ストレスも軽減されるため, 根の養水分吸収や光合成機能が強く維持され, 果実収量の増加につながる事が明らかとなった. 従って, トマトの安定生育と培養液管理の簡略化のためには, 湿気中根と水中根の併存が有効であると考えられた.

引用文献

- Adams, P. 1991. Effects of increasing the salinity of the nutrient solution with major nutrients or sodium chloride on the yield, quality and composition of tomatoes grown in rockwool. *J. Hort. Sci.* 66: 201-207.
- 荒木陽一・五島 康. 1985. 水分ストレスがトマトの生育と養水分吸収に及ぼす影響. *野菜試験場報告 A.13*: 71-84.
- Bradford, J. and F. Yang. 1981. Physiological responses of plants to waterlogging. *HortScience* 16: 25-30.
- Chun, C. and T. Takakura. 1994. Rate of root respiration of lettuce under various dissolved oxygen concentrations in hydroponics. *Environ. Control in Biol.* 32: 125-135.
- Ehret, D. and L. C. Ho. 1986. The effects of salinity on dry matter partitioning and fruit growth in tomatoes grown in nutrient film culture. *J. Hort. Sci.* 61: 361-367.
- Everard, J. D. and M. C. Drew. 1987. Mechanisms of inhibition of water movement in anaerobically treated roots of *Zea mays* L. *J. Exp. Bot.* 38: 1154-1165.
- 位田藤久太郎. 1953. 蔬菜の根の生理に関する研究. 第1報. 蔬菜の根の酸素要求について. *園学雑.* 21: 202-207.
- 小山雄生. 1997. 無機成分分析法. プラズマ発光分光法. p.142-147. 植物栄養実験法編集委員会編. 植物栄養実験法. 博友社. 東京.
- 丸山 進・山口秀和・木下義明. 1997. 毛管水耕栽培の改良に関する研究. 第2報. 底流循環型毛管水耕によるメロンとイチゴの年間作付け体系. *園学雑* 66(別2): 368-369.
- Michelena, V. A. and J. S. Boyer. 1982. Complete turgor maintenance at low water potentials in the elongation region of maize leaves. *Plant Physiol.* 69: 1145-1149.
- 農林水産省農産園芸局野菜振興課. 2000. 園芸用ガラス室・ハウス等の設置状況. 平成11年度.
- 岡野邦夫・大前 英. 1996. チャの根系を構成する様々な直径の根の生理機能の定量的評価. *日作紀.* 65: 605-611.
- 岡野邦夫・坂本有加・渡邊慎一・中島武彦. 1999. 排液の再利用による一段トマトの閉鎖型養液栽培システムの確立. *生物環境調節.* 37: 63-71.
- Osaki, M., M. Iyoda, S. Yamada and T. Tadano. 1995. Effect of mutual shading on carbon distribution in rice plant.

Soil Sci. Plant Nutr. 41: 235-244.

郭 世栄・橘 昌司. 1997. トマトおよびキュウリ幼植物の生長と無機栄養に及ぼす培養液の溶存酸素濃度の影響. 園学雑. 66: 331-337.

西条了康. 1997. 農産物収穫後の生理と品質. 野菜の品質・貯蔵性. トマトの品質・貯蔵性. p.458-461. 植物栄養実験法編集委員会編. 植物栄養実験法. 博友社. 東京.

坂本有加・中島武彦・岡野邦夫. 1998. 異なる養液栽培システムにおけるキクの生長及び切り花品質. 生物環境調節. 36: 59-66.

Sakamoto, Y., S. Watanabe, T. Nakashima and K. Okano. 1999. Effects of salinity at two ripening stages on the fruit quality of single-truss tomato grown in hydroponics. J. Hort. Sci. Biotech. 74: 690-693.

佐々木皓二. 1996. 養液栽培の主要方式と利用法. 湛液型循環式水耕. p.51-83. 日本施設園芸協会編. 最新養液栽培の手引き. 誠文堂新光社. 東京.

Spiers, G. A., M. J. Dudas and L. W. Hodgins. 1983. Instrumental conditions and procedure for multielement analysis of soils and plant tissue by ICP-AES (inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy).

Communications in Soil Science and Plant Analysis 14: 629-644.

Sponchiado, B. N., J. W. White, J. A. Castillo and P. G. Jones. 1989. Root growth of four common bean cultivars in relation to drought tolerance in environments with contrasting soil types. Expt. Agr. 25: 249-257.

牛木秀治・岡田 勲・高橋洋一・田中和子・橋谷卓成. 1993. 輸送現象. 拡散. p.58-65. 日本化学会編. 化学便覧. 基礎編Ⅱ. 丸善. 東京.

山下文秋・林 悟朗. 1995. 水耕トマトの低段密植栽培による周年生産. 第3報. 定植床の培地の違いが生育, 収量及び果実品質に及ぼす影響. 愛知農総試研報. 27: 193-198.

山崎肯哉. 1986. 養液栽培技術の発展経過と今後の方向. 農及園. 61: 107-114.

吉田 敏・北野雅治・江口弘美. 1996. 水耕における溶存 O_2 濃度制御下のキュウリ植物の吸水. 生物環境調節. 34: 53-58.

吉田 敏・北野雅治・江口弘美. 1998. O_2 欠乏条件下のキュウリ根におけるリグニンの生成. 生物環境調節. 36: 53-55.