Japanese Society for Horticultural Science (JSHS)

園学雑. (J. Japan. Soc. Hort. Sci.) 71 (5) : 683-690. 2002.

養液栽培トマトの湿気中根および水中根の生理活性と形態に及ぼす生育温度の影響

中野有加[1]*・渡邉慎一[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 Influence of Growing Temperatures on Activity and Structure of Tomato Roots Hydroponically Grown in Wet Atomosphere or in Solution

Yuka Nakano[1]*, Shin-ichi Watanabe[1], Kunio Okano[1]** and Jiro Tatsumi[2]

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

[2] *Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya University, Nagoya, Aichi 464-8601*

Summary

Tomato seedlings were grown in a Wet-sheet culture (WSC), where roots developed in the wet atomosphere, or in a Deep flow technique (DFT), where roots were submerged in the solution. They were grown in growth chambers kept at a constant 15,25, and 35 ℃. The adaptability of the root systems in the WSC and DFT to high or low temperature was evaluated by comparing the root activity and structure of the systems. Dissolved oxygen in the nutrient solution of DFT was above that normally required for the plants. At all temperatures, tomato plants in WSC grew larger than did those in DFT. The bleeding rate of xylem sap on cut stem was higher in WSC than in DFT at 15 ℃ and 35 ℃, the root respiration rate per dry weight was higher in DFT than in WSC at all temperatures. The root systems in WSC had more first order laterals and higher projected areas than had in DFT at 15 ℃ and 35 ℃; root growth in both systems were similar at 25 ℃. The fractal dimensions of root systems, known as an index for describing root system morphology, were higher in WSC than in DFT at 15 ℃. These results indicate that roots in the wet atomosphere would adapt more readily to high or low temperatures than did those in the solution.

Key Words: hydroponics, root structure, temperature, tomato, wet-sheet culture.

緒　言

近年，トマト等の果菜類ではガラス室やハウスを利用した周年栽培化が進んでいる．しかし，季節を問わず作付けされるため，生育期間中の温度変化が大きく，生育好適域を外れることも多い．特に，根域が土から隔離されている養液栽培では，土耕栽培に比べて根域温度が気温の影響を受けやすい．作物の生育に対する根域温度の影響は大きく，高温あるいは低温による発芽不良，結実不良，生育遅延，品質不良などが指摘されている (深澤, 1995)．生育改善を目的として，夏季の冷却および冬季の加温等による根域温度の制御が推奨されている (佐々木・板木, 1989; Hicklenton・Wolynetz, 1987)．しかし，加温や冷却に要するコストやエネルギー消費面から，これらの措置は最小限に抑えることが望ましい．

2001年10月1日　受付．2002年2月5日　受理．

*Corresponding author.

**現在：花き研究所企画調整室

これまでの根域温度制御に関する試験は，土中あるいは水中の根について実施された例が多い (王・橘, 1996; 大河内ら, 1978)．一方，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，温度やpHなどの根域環境変化に対する適応幅が広いと述べている．しかし，それを裏付ける実験的データはほとんど見当たらない．我々は前報 (坂本ら, 2001)において，湿気中根と水中根の両方が存在するトマト根系では，根の養水分吸収能や地上部の光合成機能が高く維持され，果実収量の増加につながることを示した．しかし，湿気中根と水中根の生長や生理活性に対する根域の温度環境の影響は未検討である．

植物の生長と根系の発達には密接な関わりがあるため，多様な根系形態を定量化する試みが盛んに行われている．近年，根系像をコンピューターに画像として取り込み，画像解析により根の長さや直径などの高精度計測が可能となった (山内, 1998)．さらに，フラクタルおよびマルチフラクタル解析によって，根系形態の全体像や複雑さを

NII-Electronic Library Service

Japanese Society for Horticultural Science (JSHS)

表現できることが示されている(巽, 1999; Ketipearachchi・Tatsumi, 2000). 従来の報告では, 環境条件の不均一な土壌中における作物の根系分布を定量化するために, フラクタル解析が用いられてきた. 一方, 養液栽培においては, 根域内における環境条件のバラツキは少ないため, 根系分布について調査する意義は小さい. しかし, フラクタル解析は, ひとつの根系を構成する側根の出現パターンを反映するため, 根系の構造を表現し得ると考えられている(巽, 1999). 従って, 養液栽培における根系にフラクタル解析を導入することによって, どのような形態の根系が機能的に優れているか, という観点からの考察が可能と思われる.

そこで本研究では, 湿気中根を形成する保水シート耕と水中根を形成する湛液水耕において, 生育温度条件を変えてトマト幼植物を栽培し, 根の生理活性を比較することにより湿気中根と水中根の温度適応性の違いを検討した. また, 根系形態の特徴を定量的に把握し, 理想的なトマト根系像について考察した.

材料および方法

1. 養液栽培装置および温度条件

材料としてトマト (*Lycopersicon esculentum* Mill.) '桃太郎' を用いた. 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与え, 子葉展開後は大塚A処方培養液 (NO_3-N 240 mg・liter^{-1}(以下同じ), NH_4-N 25, P 52, K 298, Ca 164, Mg 45, Fe 2.7, Mn 1.2, B 0.5) の1/4濃度養液 (EC 0.6 dS・m^{-1}) を底面給液法により1日1回与えた. 本葉第3葉展開期の若苗を保水シート耕方式 (Wet-sheet culture: WSC) および湛液水耕方式 (Deep flow technique: DFT) の養液栽培装置 (70 × 50 × 20 cm; 60 liter) に16個体ずつ定植した. 播種後実験終了時までの栽培は, 温度設定の異なる人工気象室内で行った. 温度設定は低温区として15℃, 適温区として25℃, 高温区として35℃の3段階とし, 相対湿度は70%, 光源は高圧ナトリウムランプ (520 μmol・m^{-2}・sec^{-1} PPFD) で12時間照明とした. 以後, これらの処理区を15℃WSC区あるいは25℃DFT区などと称する. WSC区では, 培養液に浮かべた発泡スチロール上に不織布, エバフロー, 防根透水シートの順に重ね, その上にトマトの全根系を形成させて湿気中に曝した(岡野ら, 1999). さらに, 遮光・保湿のために発泡スチロールで覆い, 根域の湿度をほぼ100%に保った. 一方, DFT区では全根系が水中に形成された. 定植後の培養液管理は, 1/2濃度の大塚A処方液を用いて行い, 両区ともに水中ポンプ (NP-90, 仲佐) を15分当たり2分間運転してベッド内の培養液を循環させた. 湛液水耕における培養液中の溶存酸素濃度の測定は, 携帯用DOメーター (A-801, 飯島電子工業) を用いて行った. 生育期間中のDFT区における液中溶存酸素濃度は, 15℃区では9.2~10.4 ppm (飽和濃度の94~100%), 25℃区では7.3~7.8 ppm (同90~96%), 35℃区では6.5~6.7 ppm (同92~95%) の範囲であった. 気温および各区の根域温度の測定は, 熱電対を用いて行った. 25℃に設定した人工気象室内では, 育苗時から実験終了時までの気温は22.2~27.6℃, 育苗時の培地温度は23.4~26.6℃, 定植後のWSC区の根域温度(根表面)は23.0~26.0℃, DFT区の根域温度は23.3~25.3℃で推移し, 根域温度の平均日較差はWSC区がDFT区よりも大きかった. 15℃および35℃設定区においても同様の傾向がみられ, 平均日較差はWSC区では3.7℃(15℃)および4.4℃(35℃)と大きかったのに対し, DFT区では3.3℃(15℃)および1.5℃(35℃)と小さかった.

本葉5葉展開期に以下の測定を行ったが, このステージまでの生育日数は設定温度により異なり, 15, 25, 35℃区でそれぞれ定植後12, 6, 8日目であった. なお, WSC区とDFT区で植物体の葉の展開速度に差は認められなかった(データ省略).

2. 出液速度の測定

出液速度の測定は森田・豊田(2000)の方法で行った. 午前7時30分に各6個体について茎葉部を根元から約3 cmの高さで茎を切断した. あらかじめ重量を測定しておいた脱脂綿を切り口にあててビニール袋で覆い, 輪ゴムで固定した. 4時間30分後の正午に脱脂綿を回収し, 測定前後の重量変化から出液量を求め, 出液速度を算出した.

3. 根の呼吸活性の測定

各6個体を地上部と根に切り離したのち, 切断根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 (100F型, TAITEC) を用いた(岡野・大前, 1996). 測定時の温度条件は生育温度(15, 25および35℃)と同一とし, 反応容器の内部はそれぞれ生育環境を模して湿気中あるいは水中とした. なお, 測定容器に入れる根量は新鮮重で1.0 gずつに揃えた.

4. 根系画像の取り込み

出液速度の測定を行った各6個体の根系をFAA溶液(60%エタノール:酢酸:ホルマリン=90:5:5)に浸漬・固定した後, 0.25% Coomassie Brilliant Blue R(和光純薬)水溶液で1~2時間染色し, その後水洗して過剰の色素を除去した. このように前処理した根系を, イメージスキャナ (CanoScan600, Canon) のガラス面上に置いたアクリルバットに水を入れて広げ, 300DPIの解像度, 256グレイ階調でスキャンしてパソコンに画像を取り込んだ. さらに, 種子根軸から一次側根を切り分け, それぞれの画像を取り込んだ.

5. 根系形態の計測

根系形態の計測は, 画像解析ソフト (NIH image 1.6) を用いて行った. 根長は, まず, 一次側根毎に取り込んだ画像に2値化処理を行って, 根系像を背景から切り取った

NII-Electronic Library Service

Japanese Society for Horticultural Science (JSHS)

後，細線化処理を行い，ランダムな配置と仮定して求めた．根投影面積は，同じく2値化画像の全画素面積から計算した．根系の平均直径は，上記の根長と根投影面積から算出した．

根系全体のフラクタル次元の計測は，Box-counting法により行った(巽，1999)．すなわち，根系の2値化画像の画素サイズを0.085 mm(原画像)から21.67 mmまで変化させ，粗視化程度を異にする11段階の画像フレームを作成し，それぞれのフレームにおける根系像を構成する画素数(N)を計数した．本測定では，画素サイズrと各画素サイズにおける計測数Nとの間に$N=K\cdot r^{-D}$の関係が成り立っており，このことから指数Dを根系全体のフラクタル次元(D_{box})として求めた．一般に画像が2次元平面の場合，Dは1から2の間をとり，Dの値が大きいほど画像の形態が複雑であることを示す．

さらに，自然界に存在するものの形の多くは，非一様なフラクタル構造をもち，無限個の局所次元(D_{local})の集合により特徴付けられるというマルチフラクタルの性質をもつ．根系の形もマルチフラクタルであり，異なる根系形態をもちながら等しい全体D_{box}の値を示す場合がある(巽，1999)．従って根系全体の形態を定量化するもうひとつのフラクタル次元としてD_{local}の平均値を求めた．D_{local}の測定は，Ketipearachchi・Tatsumi (2000)の方法により根系上を中心とした小さなサイズのフレーム(65×65ピクセル)に含まれる根系構成画素を対象として，画像上でランダムに500回計測して求めた．

6. 葉面積および乾物重の測定

出液速度および根の呼吸活性の測定を行った各12個体について，葉色を葉緑素計(SPAD-502型，ミノルタカメラ)で，葉面積を面積計(AAC-400型，林電工)を用いて測定した．その後，地上部および根を80℃で48時間乾燥し，重量を測った．

結　果

1. 植物体の生長

地上部および根の乾物重は，すべての温度処理条件下においてWSC区でDFT区より大きかった(第1表)．WSC/DFT比は，地上部乾物重では1.2~1.4倍と小さかった．一方，根乾物重のWSC/DFT比は，25℃区の1.3倍と比べて15℃区および35℃区ではそれぞれ1.9倍，1.6倍とその差が拡大していた．その結果，地上部と根の乾物重比(S/R比)は，すべての温度処理区でDFT区が

Table 1. Effects of growing temperature on the growth of tomato seedlings in the two types of hydroponic systems[z].

Hydroponic systems[y]	Dry weight (g・plant^{-1})									S/R[x]			Leaf area (cm^2・plant^{-1})			SPAD[w]		
	Total			Shoot			Root											
	15℃	25℃	35℃	15℃	25℃	35℃	15℃	25℃	35℃	15℃	25℃	35℃	15℃	25℃	35℃	15℃	25℃	35℃
WSC	1.56	1.13	0.81	1.31	1.00	0.72	0.25	0.13	0.09	5.4	6.6	9.2	273	268	139	31.5	34.0	46.7
DFT	1.03	0.86	0.66	0.91	0.76	0.61	0.13	0.10	0.05	7.3	6.8	10.4	140	210	125	31.9	34.5	45.7
Significance[v]	***	*	*	***	*	*	***	**	**	*	NS	NS	***	**	*	NS	NS	NS

[z]Data are shown as the mean of 12 samples.
[y]WSC, Wet-sheet culture; DFT, Deep flow technique.
[x]Shoot dry weight/root dry weight.
[w]Values were measured with a chlorophyll meter (SPAD-502, Minolta).
[v]NS, *, ** and *** indicate nonsignificance, significance at 5%, 1%, and 0.1% level, respectively with Fisher's PLSD test.

Table 2. Effects of growing temperature on the bleeding rate of xylem sap and root respiration of young tomato seedlings in the two types of hydroponic systems[z].

Hydroponic systems	Bleeding rate[y]						Root respiration rate					
	mg・plant^{-1}・hr^{-1}			mg・root length (m)$^{-1}$・hr^{-1}			μmol O_2・root^{-1}・hr^{-1}			μmol O_2・mgDW^{-1}・hr^{-1}		
	15℃	25℃	35℃	15℃	25℃	35℃	15℃	25℃	35℃	15℃	25℃	35℃
WSC	460	414	140	15.3	12.9	7.3	22.9	13.5	14.4	0.093	0.102	0.164
DFT	191	339	69	12.8	9.6	5.2	19.8	26.2	12.4	0.156	0.266	0.221
Significance	***	NS	***	NS	*	NS	NS	**	NS	***	***	*

[z]Data are shown as the mean of 5 or 6 samples.
[y]Average of the bleeding rate measured during the period from 7:30 to 12:00.
Other symbols are the same as in Table 1.

NII-Electronic Library Service

Japanese Society for Horticultural Science (JSHS)

WSC区より大きく，特に15℃区では有意な差であった．葉面積はいずれの温度条件下でもWSC区で有意に大きかった．また，葉色は生育温度が高いほど濃くなる傾向がみられたが，WSC区とDFT区に差異はみられなかった．

2. 出液速度と根の呼吸活性

個体当たりの出液速度は，15℃区および35℃区ではWSC区でDFT区より高い値を示したが，25℃区では両者に有意な差はみられなかった(第2表)．また，単位根量当たりの活性の指標とするため，単位根長当たりの出液速度を算出したところ，15℃区と35℃区ではWSC区とDFT区はほぼ等しかったが，25℃区ではWSC区でDFT区より有意に高い値であった．

根系全体の呼吸速度は，25℃区ではDFT区でWSC区より大きな値を示したが，15℃区および35℃区では両者に有意な差はみられなかった．一方，単位乾物重当たりの根の呼吸速度は，いずれの温度条件下でもDFT区でWSC区より大きかった．

3. 根系の形態

第1図に各温度処理条件下で形成されたトマト根系画

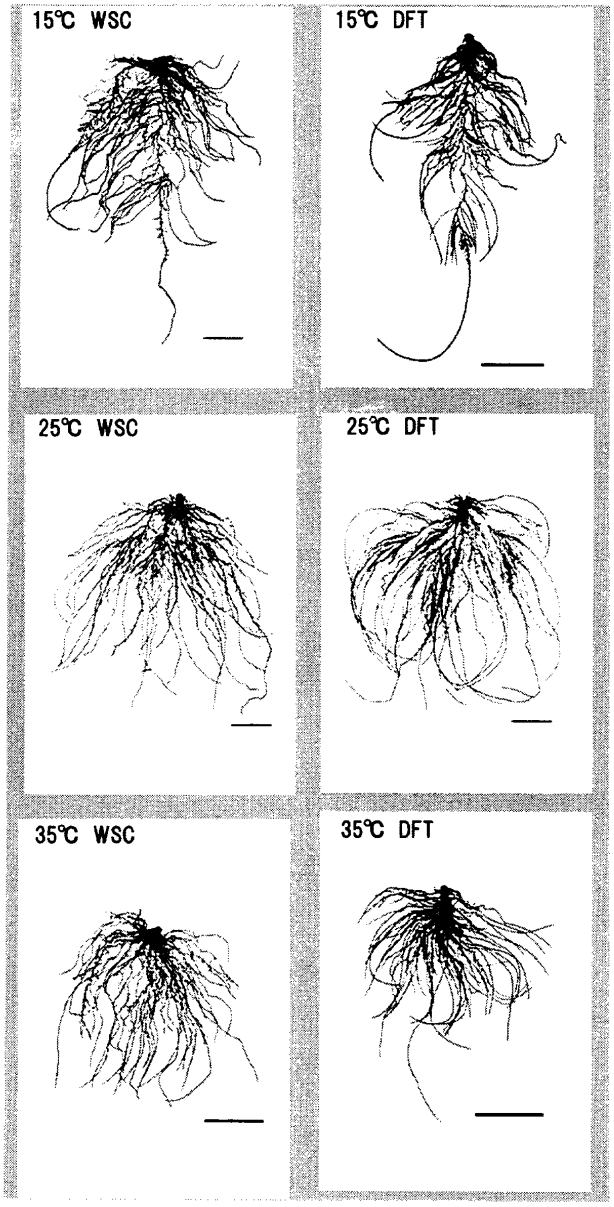

Fig. 1. Digitized images of tomato root systems grown at 15, 25 and 35 ℃ in the two types of hydroponic systems. WSC; Wet-sheet clture, DFT; Deep flow technique. Each bar in figures indicates 5 cm.

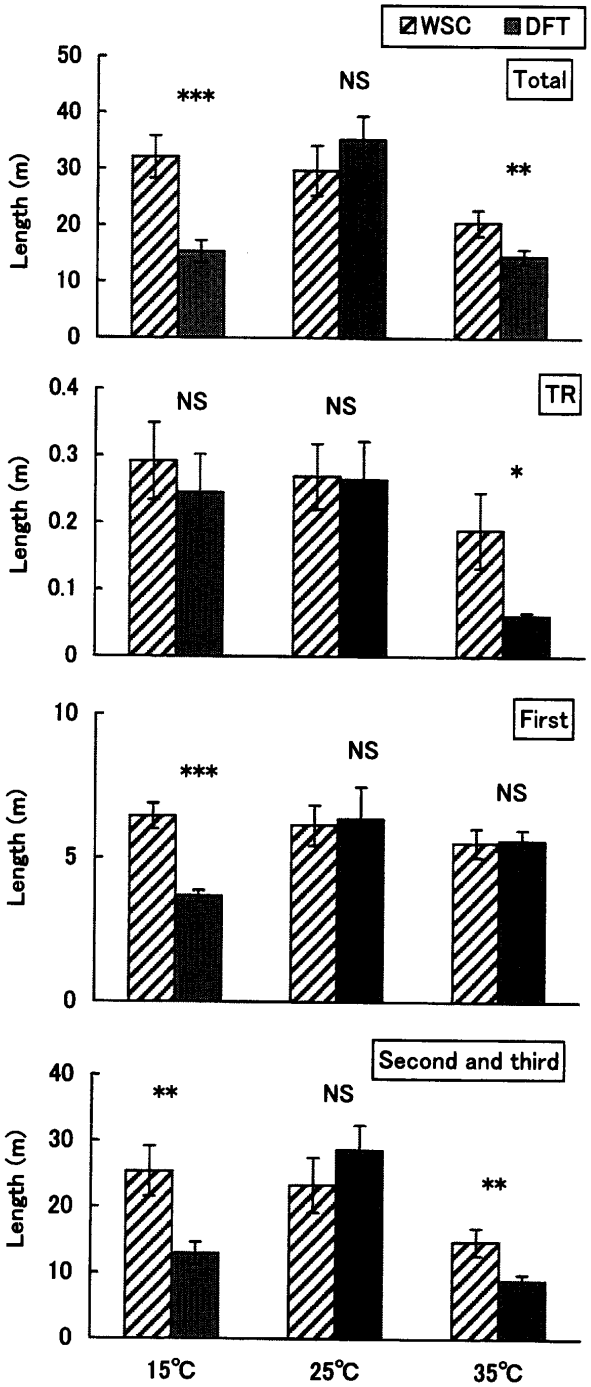

Fig. 2. The lengths of taproot and lateral roots of tomato seedlings exposed to 15, 25 and in the two types of hydroponic systems. "Total" indicates the sum of TR + First + Second + Third. "TR" indicates taproot. "First" and "Second and Third" indicate the 1st order lateral and the sum of 2nd and 3rd order laterals. Vertical bars indicate standard error of the mean. NS, *, ** and *** indicate nonsignificance, significance at 5%, 1% and 0.1% level, respectively with Fisher's PLSD test. Other symbols are the same as in Table 1.

NII-Electronic Library Service

Japanese Society for Horticultural Science (JSHS)

Table 3. Effects of growing temperature on the number of first order lateral roots, total projected root area and average root diameter of tomato in the two types of hydroponic systems[z].

Hydroponic systems	First order lateral roots									Average root diameter (mm)			Total projected root area (cm^2)		
	Number (No. · $plant^{-1}$)			Mean length (cm)			Density (No. · cm tap root $axis^{-1}$)								
	15 ℃	25 ℃	35 ℃	15 ℃	25 ℃	35 ℃	15 ℃	25 ℃	35 ℃	15 ℃	25 ℃	35 ℃	15 ℃	25 ℃	35 ℃
WSC	108	112	89	6.0	5.5	6.5	4.0	4.7	5.7	0.58	0.43	0.43	179.7	123.1	76.7
DFT	80	107	111	4.6	6.1	4.6	4.5	5.2	21.3	0.58	0.43	0.44	79.4	142.3	53.1
Significance	*	NS	*	*	NS	***	NS	NS	***	NS	NS	NS	***	NS	**

[z]Data are shown as the mean of 5 or 6 samples.
Other symbols are the same as in Table 1.

像の一例を示した．また，第2図に各処理区の主根および側根長を示した．25 ℃条件下では，総根長，主根長および側根長に両区で差異はみられなかった．総根長は15 ℃および35 ℃条件下ではWSC区でDFT区のそれぞれ1.9倍，1.4倍と大きかった．主根長は，35 ℃条件下でのみWSC区でDFT区よりも大きかった．一次側根長は15 ℃条件下でのみWSC区でDFT区よりも大きく，二次および三次側根長は，15 ℃および35 ℃条件下でWSC区でDFT区よりも大きかった．いずれの処理区においても，根長の98%以上が側根によって構成されていたが，側根の内訳は処理温度によって異なっていた．すなわち15 ℃，25 ℃のWSC区およびDFT区では，総根長に占める二次および三次側根の割合が76%~81%と大きかったのに対し，35 ℃ WSC区72%であり，35 ℃ DFT区では61%と最も小さく，分枝の発達が相対的に劣っていた．

また，一次側根の数は，15 ℃条件下ではWSC区で多く，35 ℃条件下では逆にDFT区で多かった(第3表)．一次側根の平均長は，15 ℃および35 ℃条件下においてWSC区でDFT区よりも有意に大きかった．さらに，一次側根の主根軸における密度は，35 ℃条件でのみDFT区でWSC区より約4倍の大きな値となった．根の平均直径は，いずれの温度でも養液栽培方式間の差異はなかった．また，根の総投影面積は，15 ℃と35 ℃条件下ではWSC区でDFT区より大きかった．

ボックス法で求めた全体次元(D_{box})は，35 ℃条件下ではDFT区の方が大きかった(第4表)．これは，局所的なフラクタル次元の平均値(D_{local})とはやや異なる値をとった．D_{local}は，15 ℃条件下ではWSC区で大きく，逆に35 ℃条件下ではDFT区で大きかった．なお，D_{box}およびD_{local}と総根長との相関係数(r)はそれぞれ0.649および0.757，同様に投影面積とのrはそれぞれ0.525および0.475であり，1%レベルで有意であった(データ省略)．

Table 4. Effects of growing temperature on the fractal dimension using the box-counting method (D_{box}) and the average of local fractal by the mass-radius method (D_{local}) in tomato roots in the two hydroponic systems[z].

Hydroponic systems	D_{box}			D_{local}		
	15	25	35	15	25	35
WSC	1.63	1.57	1.56	1.74	1.66	1.59
DFT	1.60	1.56	1.59	1.68	1.63	1.64
Significance	NS	NS	*	*	NS	*

[z]Data are shown as the mean of 5 or 6 samples.
Other symbols are the same as in Table 1.

考　察

1. 不適温度条件下における根量の拡大能力

トマト植物体の生長は，いずれの温度条件下においても，WSC区でDFT区より旺盛であった(第1表)．特に，生育には不適と考えられる15 ℃あるいは35 ℃条件下ではWSC区でDFT区より相対的に根の生長量が大きかった．土耕栽培したトマト幼苗では，根の伸長に適した根域温度は25 ℃~30 ℃であるとされている(Hurewitz・Janes, 1991)．適温と考えられる25 ℃区では，根長，投影面積，平均直径をはじめ，いずれの形質においてもWSC区とDFT区の間に差異はみられなかった．適温より低い15 ℃区では，湿気中根を有するWSC区において側根の数および長さがDFT区より大きく，総根長および投影面積の増加をもたらした．適温より高い35 ℃区では，WSC区において一次側根の数がDFT区より少なかったが，主根や一次側根が長く，総根長および投影面積が増加した．従って，湿気中根は15 ℃区および35 ℃区という不適温度条件においても分岐と伸長があまり抑制されないのに対し，水中根は生長抑制の程度が大きいとい

NII-Electronic Library Service

Japanese Society for Horticultural Science (JSHS)

える.

フラクタル次元(D)は，マメ科作物において根長や投影面積との間に高い相関関係を示すとされている(巽，1995)が，本実験での相関係数はやや低いものであった．Dは，拡大・縮小によってもその構図が相似的であるという性質をもつ図形について求められ，自己相似パターンの粗密の程度を示す．Dは，根長や根投影面積のみでは定量化できない根の根長密度(培地容積当たりの根長)や分枝密度(親根の長さ当たり分枝根の発生密度)，角度(分枝根の親根に対する伸長角度)などの情報を多く含む．例えば，35℃区においてWSC区よりもDFT区でD値が増大したのは，平均直径および分枝密度の増加を反映したものと考えられる．しかし，35℃DFT区では，Dの増大と同時に根長や投影面積が減少しているため，根系の拡大には結びついているとはいえない．一方，15℃においてDFT区よりWSC区でD値が増加したのは，一次側根の分枝密度はDFT区と同等であるため，側根の数および長さが増加したことを反映している．

以上のことから，湿気中根は，15℃や35℃などの不適温度条件下においては，養水分吸収の場となる根系を拡大する能力が水中根より高いといえる．

2. 不適温度条件下における根の生理活性

本実験では，根の生理活性の指標として，出液速度と呼吸速度を測定した．出液現象は根圧による能動的吸水に基づくと考えられているが，根圧の起源については未だ十分に解明されていない(加藤，1995)．Kramer(1983)は，根圧は単なる浸透現象で説明できるとしている．一方，森田・豊田(2000)は出液が呼吸阻害によって著しく低下することから，単なる浸透現象ではなく，蒸散が不活発な夜間や曇天日の吸水に役立っており，根の生理活性の指標となり得ると考えている．出液速度は，25℃区では有意ではなかったものの，すべての温度条件においてWSC区でDFT区より大きかった(第2表)．しかしその内容は温度によって異なっていた．すなわち，15℃および35℃区では，WSC区でDFT区よりも根長が大きかった(第2図)ので，両区の単位根長当たりの出液速度には差異がなかったといえる．一方，25℃区では，両区の根長には差異がなかったので，WSC区では単位根長当たりの出液速度が大きかったといえる．なお，一般に根域温度が高いほど出液速度は大きい(山口ら，1995)が，本実験では15℃区の方が25℃区よりも大きな出液速度であった．一方，出液速度は根量の大きさと高い正の相関があることが知られている(森田・豊田，2000)．そこで，両区の比根長(根長/根乾物重)を計算すると，例えば15℃WSC区で1.29 $m \cdot g^{-1}$，25℃区で2.25 $m \cdot g^{-1}$となり，15℃区の方が小さい(データ省略)．すなわち，同じ長さの根の乾物重は15℃WSC区の方が25℃WSC区よりも大きい．従って，両区における出液速度の差異は，根乾物重の差異によるものと推察される．

一方，根系全体の呼吸速度は，15℃区および35℃区ではWSC区で大きかったものの有意な差異ではなく，25℃区では逆にDFT区で大きかった．根の乾物重はいずれの温度においてもWSC区でDFT区よりも大きかったため，DFT区では単位根乾物重当たりの呼吸速度が大きかったといえる．本実験では，栽培中の根域環境と等しい湿気中および水中で呼吸速度を測定した．津野・山口(1987)は，ポットで土耕栽培した水稲根の呼吸速度を，水中および湿気中で測定し，両者はほぼ等しいと報告している．従って，本実験においても，実際の根域環境における両方式の根の呼吸速度を評価できたものと推察される．しかし，ここで得られた呼吸速度の値は，生育や出液速度などと傾向を異にしており，生理活性の指標として用いるには今後の検討を要する．

なお，本実験においては養分吸収量の測定は行わなかった．しかし，葉面積はWSC区でDFT区より有意に大きく，葉色値はほぼ同等であった(第1表)．このことから，窒素吸収量はWSC区で多かったことが推察される．従って，根系当たりの養水分吸収速度は水中根より湿気中根の方が大きかったものと考えられる．

以上のことから，湿気中根は，15℃や35℃などの不適温度条件下においても，出液速度の大きさで示されるような高い生理活性を維持していることが分かった．従って，湿気中根は，不適温度条件下においても根量と生理活性を維持できたために，地上部生長の抑制が小さかったと考えられる．すなわち，山崎(1986)の述べた，湿気中根は水中根に比べて根域温度変化に対する適応幅が広いという観察を，実験的に確認することができた．これは栽培技術的にみて重要であり，湛液水耕において根域温度を一定に維持するにはエネルギーやコストがかかるが，保水シート耕ではそうした措置をしなくとも周年的に安定栽培をすることが可能なことを示唆している．

3. 根系形態の評価指標

第5表に，根の形態や機能に関する各種のパラメータと生長量との相関を，各処理区のデータを込みにして回帰直線で近似して得られた相関係数を示した．出液速度および根の形態に関するすべてのパラメータで，地上部乾物重および根乾物重との間において相関係数が高かった．なお，いずれもD_{box}よりD_{local}との相関係数の方が高く，局所次元を用いた方がより正確な根系形態の評価が可能と考えられた．これらは，根域温度条件が大きく異なる条件下で生育した根で得られた結果であるが，根の健全度を評価する上で参考になると考えられる．ただし，D値と根長および根投影面積との相関係数は，これまで土耕栽培の作物で報告されている値(巽，1995)よりも小さかった．これは，本実験では同じ生育段階の個体のデータのみを用いて解析しているのに対し，田中ら(1994)および巽(1995)は，生育段階の異なる個体のデータをまとめて解析していることによる違いと考えられる．また，後

NII-Electronic Library Service

Japanese Society for Horticultural Science (JSHS)

Table 5. Correlation coefficients among several parameters of roots characteristic vs growth parameters of tomato grown in the two types of hydroponic systems under various temperature[z].

Parameters		Shoot dry weight[y]	Root dry weight
Root activity			
	Bleeding rate	0.663	0.916
	Respiration rate	0.324NS	0.460
Root structure			
	Root dry weight	0.895	-
	Total root length	0.845	0.679
	Total projected root areas	0.614	0.880
	D_{box}	0.692	0.616
	D_{local}	0.785	0.658

[z]Fitted by linear regression lines calculated with the whole data for all the temperatures.
[y]Each value in the table is significant at 1% level (n=35), except the values with "NS" symbol.

藤ら(1996)はトマトの養液栽培において，養水分や酸素を十分に供給することにより，小さな根量でも健全な生育が可能であると述べている．このことは，根の機能発現が，根の形態だけでなく，根域への養水分の供給速度の影響を大きく受けることを示唆している．すなわち，養液栽培では，土耕栽培と比べて根圏環境の制御が容易なため，根系の拡大・発達程度が生長量に直接反映されないことが，D値と生長量との相関を弱めている可能性がある．

以上のことより，実際に根の状態の評価を行う場合，1)根の重量，長さ，表面積等に代表される養水分吸収の場の大きさ，2)フラクタル次元等で推測しうる根系の発達程度，3)出液速度など根の吸水能力を示す活性の高さなどの指標を総合的に利用すべきであろう．これらの指標のすべてが高い根系は，好適な環境下にあると判断できるものと推察される．ただし，これらの指標は生育中の植物体がそれまで経験した根域環境の履歴を示すものであるため，その時間的な推移を調べることも必要と思われる．

今後は，湿気中根と水中根について，本実験で推察された温度適応性の差異をもたらす原因や，温度以外の環境要因に対する適応性などを検証する予定である．

摘　要

湿気中根を形成する保水シート耕(WSC区)と水中根を形成する湛液水耕(DFT区)において，人工気象室内で生育温度条件を15℃，25℃および35℃の3段階に変えてトマトを栽培し，根の生理活性や根系形態を比較することにより湿気中根と水中根の温度適応性の違いを検討した．DFT区における液中溶存酸素濃度は飽和量の93%以上で推移した．トマト植物体の生長は，全ての温度条件下において，WSC区でDFT区より旺盛であった．根系当たりの出液速度は15℃区と35℃区ではWSC区でDFT区より大きかったが，根乾物重当たりの呼吸速度は常にDFT区でWSC区より大きかった．根系形態は25℃区では両方式で差異はなかったが，15℃および35℃区ではWSC区でDFT区より側根長および根投影面積が大きかった．また，フラクタル次元は15℃ではWSC区でDFT区より大きく，根系がより複雑に発達したことを示した．これらの結果から，湿気中根は水中根に比べて温度適応性に優れ，不適温度条件下においても根系の拡大・発達と生理活性を維持できるため，地上部生長の抑制が水中根と比較して小さかったものと考えられる．

引 用 文 献

深澤郁男．1995．野菜栽培における高温障害の発生機構．農及園．70: 239-246.

後藤丹十郎・杉浦俊紀・景山詳弘・小西国義．1996．連続給液水耕装置で栽培されたトマトの初期生育に及ぼす根域容量の影響．園学中四国支部会要旨．35: 33.

Hicklenton, P. and M. Wolynetz. 1987. Influence of light- and dark-period air temperatures and root temperature on growth of lettuce in nutrient flow systems. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 112: 932-935.

Hurewitz, J. and H. Janes. 1991.Effect of altering the root-zone temperature on growth, translocation, carbon exchange rate, and leaf starch accumulation in the tomato. Plant Physiol. 73: 46-50.

加藤　潔．1995．植物の根に関する諸問題．21．根による水の吸収．農および園．70: 124-131.

Ketipearachchi, K. and J. Tatsumi. 2000. Local fractal dimensions and multifractal analysis of root system of legumes. Plant Prod. Sci. 3: 289-295.

Kramer, P. 1983. The absorption of water and root and stem pressures. Characteristics of root pressure exudation. p. 173-176. In: P. Kramer and J. Boyer (eds.). Water Relations of Plants and Soils.Academic Press, San Diego.

森田茂紀・豊田正範．2000．メキシコ合衆国バハ・カルフォルニア州の砂漠地域で点滴灌漑栽培したトウガラシとメロンの収穫期における出液の速度と成分．日作紀．69: 217-223.

大河内信夫・桝田正治・浅平　端．1978．トマト水耕密植低段栽培の育苗時における培養液温と培養液に対する酸素供給が苗の生育と果実生産に及ぼす影響．生物環境調節 16: 119-128.

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.

NII-Electronic Library Service

Japanese Society for Horticultural Science (JSHS)

岡野邦夫・坂本有加・渡邉慎一・中島武彦. 1999. 廃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.

坂本有加・渡邉慎一・岡野邦夫・巽 二郎. 2001. 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. 園学雑. 70: 622-628.

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. 生物環境調節 27: 89-95.

田中典幸・清水康弘・有馬 進・原田二郎. 1994. 根系構造のフラクタル解析に関する研究. 佐賀大農彙. 76: 81-85.

巽 二郎, 1995. フラクタル解析による根系分布パターンの定量的評価. 日作紀. 64: 50-57.

巽 二郎, 1999. 根系構造のとらえ方:フラクタル次元, 空隙性およびマルチフラクタル. 土壌の物理性 82: 11-19.

津野幸人・山口武視. 1987. 水稲光合成の高温低下現象と根の呼吸速度との関係ならびに根の呼吸速度に関与する要因の解析. 日作紀. 56: 536-546.

王 玉海・橘 昌司. 1996. キュウリの初期生長と無機栄養に及ぼす高気温と高地温の影響. 園学雑. 64: 845-852.

山口武視・津野幸人・中野淳一・真野玲子. 1995. 水稲の茎基部からの出液速度に関与する要因の解析. 日作紀. 64: 703-708.

山内 章. 1998. 根の研究方法. 根の測定形質と形態指標. p. 374-375. 根の事典編集委員会編. 朝倉書店. 東京.

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

NII-Electronic Library Service