

養液栽培トマトの湿気中根および 水中根の養水分吸収に及ぼす高根域温度の影響

中野有加*・中野明正・渡辺慎一・高市益行

野菜茶業研究所果菜研究部

巽 二郎

名古屋大学大学院生命農学研究科

要 旨：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、17℃、27℃、33℃および 45℃の短期間の根域温度処理がトマト幼植物根の養水分吸収に与える影響を比較した。材料とした植物体は、全乾物重は等しかったが、WSC 区で DFT 区よりも根乾物重が大きかった。根系当たりの吸水速度は、いずれの温度処理においても両方式間に有意な差異はみられなかった。一方、根系当たりの硝酸吸収速度は 17℃~33℃までの処理においては両方式間に有意な差異はみられなかったが、45℃処理では WSC 区で DFT 区よりも大きかった。DFT 区の根の酸素吸収速度は根域温度 33℃までは温度が高いほど大きかったが、45℃処理では低下した。これらの結果から、湿気中根は、根の生理活性の維持により、水中根よりも高温に対する耐性が大きいと考えられた。

キーワード：呼吸、根域温度、トマト、養液栽培、養水分吸収

The Influences of high root-zone temperature on absorption of water and nitrate by tomato roots hydroponically grown in atmosphere or in solution : Yuka NAKANO, Akimasa NAKANO, Shin-ichi WATANABE, Masuyuki TAKAICHI (*Department of Fruit Vegetables, National Institute of Vegetable and Tea Science*) and Jiro TATSUMI (*Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya University*)

Abstract: Tomato seedlings were grown in a Wet-sheet culture (WSC), where roots developed in the wet atmosphere, or in a Deep flow technique (DFT), where roots were submerged in the solution.

Differences in water and nitrate absorption between tomato roots in the WSC and DFT were compared at four root temperatures: 17, 27, 33 and 45°C. Root dry weight in the WSC was larger than in the DFT, whereas whole plant weights in the both systems were equal. Water absorption rates on whole root were almost equal in the both systems at all temperature. On the other hand, nitrate absorption was greater in the WSC than the DFT at 45°C, but no significant differences were observed at other temperatures. Root respiration in the DFT showed an increase as the root temperature increased from 17°C to 33°C, but decreased at 45°C. We suggested that roots in the wet atmosphere would be more tolerant to supraoptimal temperature than those in the solution, in part because of keeping with its activity.

Keywords: hydroponics, nutrient absorption, root respiration, root-zone temperature, tomato

緒 言

湛液水耕などの養液栽培においては、土耕栽培に比べて根が緩衝能の小さい養液におかれていたため、夏季の高温や冬季の低温が根の活性低下や老化促進をもたらし、生育が不安定となりやすい。実際の栽培においては、栽培ベッドの断熱をはじめ培養液の加温や冷却などが行われているが、とくに高温対策は経済性の面で問題がある。

根域温度は、水の粘度や酸素の溶存量を通じ、直接的に養水分吸収 (Ali et al., 1994) および

呼吸 (Klock et al., 1997) に影響を及ぼす。さらに、根の生長 (Haarmann et al., 1999; 門田, 1972)、光合成産物の転流・代謝 (Hurewitz and Janes, 1983; Du and Tachibana, 1994b) および植物ホルモンの合成 (Ali et al., 1996) など、根におけるあらゆる作用に影響する。トマトの根の生育適温は 26℃であり、吸水適温は 22~26℃であるといわれている (門田, 1972)。しかし、培地資材によって生育に対する根域温度の影響が異なることが指摘されており (松井ら, 1971)、その詳細についてはよく調べられてい

ない。

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。この仮説を確かめるため、前報 (中野ら, 2002) では湿気中根あるいは水中根をもつトマト個体を様々な温度条件下で栽培し、その生育や根の生理活性を調べた。その結果、湿気中根をもつ個体は、ある程度長期間の不適温度条件下においても根を伸長させ、根系としての機能を維持できるため、地上部生長の抑制程度が水中根をもつ個体と比較して小さいことが明らかになった。不適温度による植物体全体の成長不良は、根の成長の阻害と単位重量当たりの機能減退の結果である。しかし、根の成長、吸水量、養分吸収量などはそれぞれ適する根域温度が異なる (宇田川, 1991)。したがって、著者らの得た結果は、不適温度の遭遇に対する湿気中根の機能の耐性が大きいことを直接的に示すものではない。

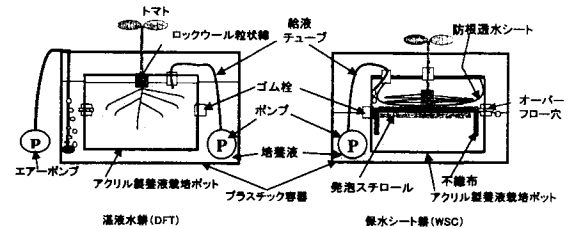
そこで本研究では、根の成長に影響しない程度の短時間の高温処理が、湿気中根と水中根の養水分吸収に及ぼす影響を比較することにより、湿気中根と水中根の高温耐性の違いを検討した。

材料と方法

1. 植物材料

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、種子を一穴おきに千鳥状に播種した。発芽後、植物体は、気温 35.0°C (昼) / 22.5°C (夜)、湿度 70 %RH、光強度 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (メタルハライドランプ)、12 時間日長 (7:00~19:00) に設定した人工気象室において栽培した。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 EC 0.45 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ の大塚 A 処方培養液を底面給液法により 1 日 2 回与えた。本葉第 3 葉展開期の幼苗を湛液水耕方式 (Deep flow technique: 以下 DFT, 液量 1900ml) および保水シート耕方式 (Wet-sheet culture: 以下 WSC, 液量 750ml) (岡野ら, 1999) のアクリル製栽培ポット (9.8×9.8×19.8cm) に 1 個体ずつ定植し、同人工気象室内で栽培した (第 1 図)。DFT では培養液中に全根系が浸漬するため、エアープンプ ($N\alpha 4000$, ニッソー; $4\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$) による通気で培養液中の溶存酸素濃度を高く維持した。WSC では、全根系が湿った不織布上に伸長し空气中に曝される。これらの栽培容器を、育苗時と同じ組成の培養液を入れたプラスチックタ

ンク (30L) に入れ、水中ポンプ (NP-90, 仲佐; $30\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$) を 15 分あたり 2 分間運転し栽培容器内部へ培養液を供給し、循環させた。生育期間中の気温および各区の根域温度の測定は、T 型熱電対を用いて行った。室内気温は 22.5~35.0°C, DFT 根域温度は 24.2~30.7°C, WSC 根域温度は 22.5~32.2°C で推移し、根域温度の平均日較差は WSC が DFT よりも約 3°C 大きかった。7 葉展開期の定植後 9~11 日目に、以下のような装置を用いて 4 段階の根域温度処理を行った。

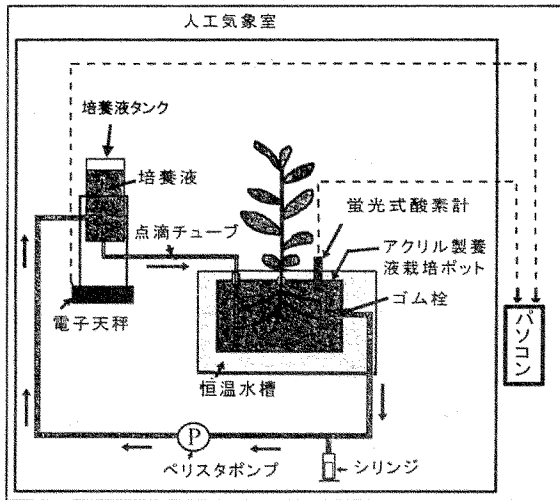


第 1 図 トマト幼植物体の栽培に用いた 2 種類の養液栽培ポットの模式図。左: 湛液水耕 (Deep flow technique; 以下 DFT 区と略す), 右: 保水シート耕 (Wet-sheet culture; 以下 WSC 区と略す)。トマトの 3 葉期苗を各栽培ポットに 1 個体ずつ定植し、7 葉期まで栽培した。DFT 区ではエアープンプにより通気を行った。EC0.45 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ の大塚 A 処方培養液を 15 分あたり 2 分間循環させた。

2. 根域温度制御下における培養液供給装置

根域温度制御下における吸水および酸素吸収速度のオンライン計測のために用いた培養液供給装置を第 2 図に示す。植物体を、測定前日の 17:00 に前述のアクリル製栽培ポットに植栽したまま人工気象室内に設定した恒温水槽内に移動した。本実験では、恒温水槽の温度設定を 17°C, 27°C, 33°C, 45°C の 4 段階とした。低温区および中温区では移動直後からそれぞれの根域温度処理を開始し、高温区では夜間は 27°C, 翌日の 7:00 から 33°C あるいは 45°C の処理を開始した。以後、これらの処理区をそれぞれ WSC-17°C 区, DFT-27°C 区等と称する。アクリル製栽培ポットは、ゴム栓およびワセリンを用いて根域と外気とを遮断した。ポット内の根域には、大塚 A 処方培養液 (EC 0.25 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) を、医療用点滴チューブ (TS-A400LK, テルモ; 流量 $32\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$) を通じて培養液タンク (500ml) から常時供給した。余剰の培養液はペリスタポンプ (505S, イソワテック) により常時吸引し、培養液タンクに戻した。すなわち培養液は、培養液タンク、アクリル製栽培ポット、ペリスタポンプによってひとつの閉鎖系の

中で循環する。したがって、培養液タンク内の液量の減少分は、トマト根の吸水量とみなせる。



第2図 根域温度処理に用いた装置の模式図。矢印は、培養液の流れる方向を示す。培養液は、点滴チューブにより養液栽培ポットに常時一定速度(32ml min⁻¹)で供給した。オーバーフロー液は、ペリスタポンプにより常時吸引し、培養液タンクに戻した。培養液タンク重量を電子天秤で計測し、その減少量を植物体による吸水量とした。

測定当日の8:30から14:30にかけて、根の養水分(水吸収については測定前日の17:00から当日14:30の間)および酸素吸収の計測を行った。根の吸水については、重量法によって計測し、みかけの吸水速度を算出した。すなわち、培養液タンクの液重量を電子天秤により計測し、コンピュータにオンラインで入力した。また、根の硝酸態窒素吸収速度は培養液中の硝酸態窒素濃度と液量から算出した。すなわち、流路途中に装着したシリンジで90分毎に4mlずつ培養液を採取し、イオンクロマトグラフ(LC-VP、島津製作所)によって硝酸態窒素濃度を測定した。一方、DFT区における根の酸素の吸収速度は、栽培ポット内の根域部分に蛍光式酸素計(FO-960、オートマチックシステムリサーチ)を挿入して酸素濃度および温度をオンライン計測し、培養液中の酸素濃度の変化と液量から算出した(吉田, 2000)。なお、WSC区における湿気中根の酸素吸収速度は、センサの空気中での測定精度が低いため計測できなかった。

測定終了後、茎長、葉数および茎の直径を計測し、葉面積を面積計(AAC-400型、林電工)で、葉色を葉緑素計(SPAD-502型、ミノルタカメラ)を用いて測定した。また、ルートスキャナー(Hawker社)により総根長を測定

した。最後に部位別の乾物重を測定した。

結果と考察

1. 湿気中根および水中根による

養水分吸収速度に及ぼす高根域温度の影響

根域温度実験に用いたトマト植物体の総乾物重は、DFT、WSC区いずれも約3gと同等であった(第1表)。根の乾物重はWSC区でDFT区に比べて有意に大きく、その結果、地上部乾物重/根乾物重比は、WSC区で3.52とDFT区の6.40に対して有意に小さかった。葉および茎乾物重、葉面積、茎長および葉色には両区に有意差はなかった。根長はWSC区でDFT区に比べて有意に大きかった。前報(中野ら, 2002)において、湿気中根では、水中根に比べてS/R比の低下、根毛発生の促進、根内部組織の肥大およびリグニン沈着などが生じることを確認した。これらの形態的特徴は、湿気中根における少ない養水分供給に対する適応の結果と推察された。

第1表 実験に用いた2種類の養液栽培方式におけるトマト幼植物の成長

養液栽培方式 [*]	乾物重(g 個体 ⁻¹)				S/R [*]	葉面積(cm ²)	茎長(cm)	根長(m)	葉色 [*]
	全体	葉	茎	根					
DFT	3.06 ^{**}	2.13	0.51	0.42 ^{***}	6.40 [*]	583	21.1	74.2 ^{**}	50.8
WSC	3.26	1.93	0.60	0.73	3.52	406	25.0	114.6	51.5

^{*}DFT: 深流水耕(Deep flow technique), WSC: 保水シート耕(Wet-sheet culture).

^{*}地上部乾物重/根乾物重。

^{*}葉緑素計(SPAD-502, Minolta)で測定。

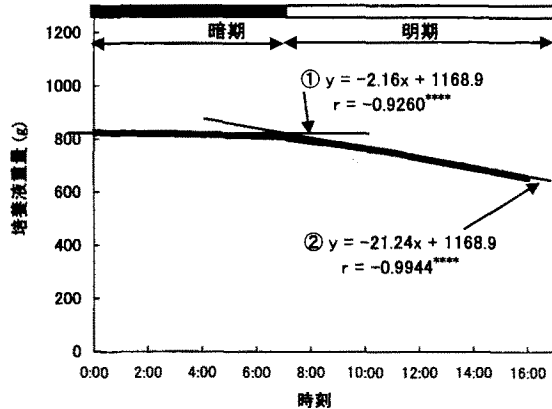
^{*}値は根域温度処理終了時における各15~18個体の平均値。*、**および***は、それぞれ5%、1%および0.1%で有意な差がみられることを示す。

いずれの処理区においても、栽培ポット内の培養液量は明期の開始によって急速に減少し始め、暗期と明期それぞれの範囲内ではその変化は直線的であった(第3図)。そこで、明期のうち10:00~15:00の間について、培養液量の減少速度である直線の傾きを根の吸水速度とし、比較した。

根系当たり吸水速度は、同じ温度で比較すると両方式の間に有意な差異はみられなかった(第4図)。一方、単位根乾物重当たりの吸水速度は、いずれの温度処理においてもDFT区でWSC区よりも大きかった。一方、温度による吸水速度の変化は、WSC区でDFT区よりも小さかった。

根系当たり窒素吸収速度は、17℃から33℃までの処理ではDFT区とWSC区の間に有意な差はなかったが、45℃処理ではWSC区でDFT区よりも有意に大きかった(第5図)。45℃処理の硝酸吸収速度を33℃処理と比べると、DFT区で約47%低下したのに対し、WSC区で

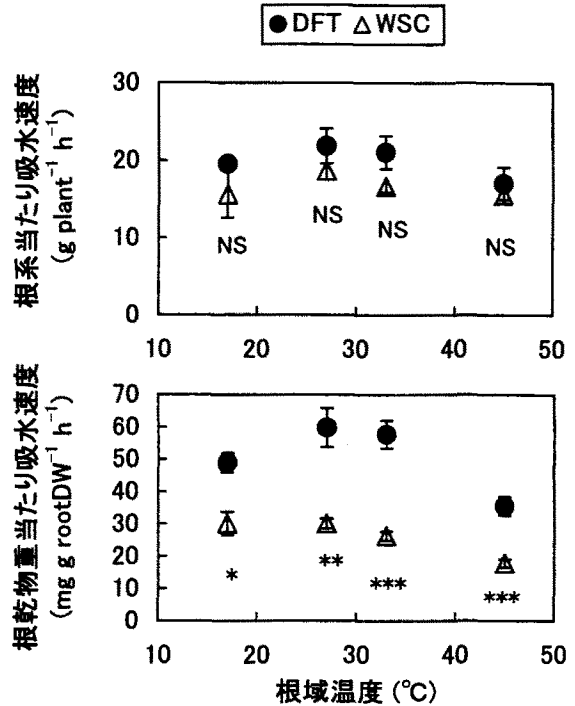
は約 16% のみの低下にとどまった。一方、根乾物重当たり硝酸吸収速度は、27°C 処理および 33°C 処理では DFT 区で WSC 区よりも有意に大きかったが、17°C 処理および 45°C 処理では両区に差異はなかった。33°C 処理の硝酸吸収速度に対する 45°C 処理の同速度の低下割合は、DFT 区で約 60% と大きかったのに対し、WSC 区では約 37% と小さかった。植物根の窒素吸収速度は、作物や生育ステージ等によって異なるが、ある程度までは根域温度が高いほど大きく、高温遭遇時間が長くなると減退する (Du and Tachibana, 1994a)。また、トマトの窒素吸収速度の最大値は 28°C (Moorby and Graves, 1980), 25~30°C (Nkansah and Ito, 1995), で得られており、本実験の DFT 区の結果と一致している。



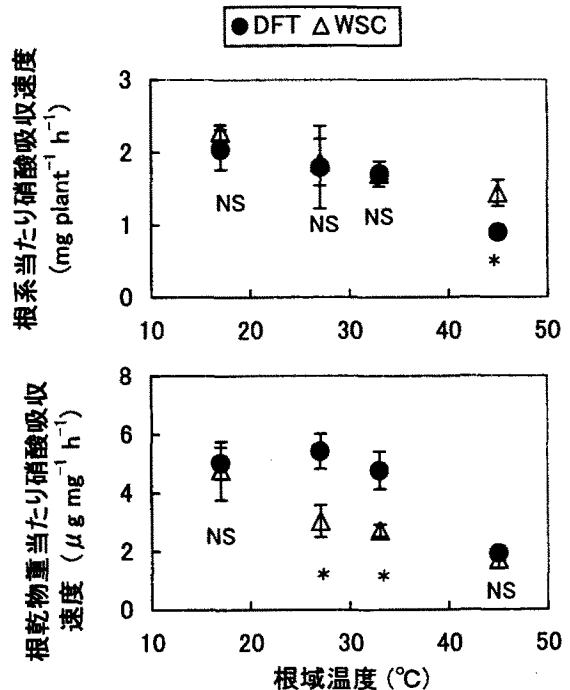
第 3 図 根域温度処理装置におけるトマトの吸水による培養液重の変化。グラフは、暗期 (①) および明期 (②) の 2 つの直線で近似できた。****は 0.001% レベルで直線が有意であることを示す。

2. 水中根の呼吸に及ぼす高根域温度の影響

DFT 区における培養液中溶存酸素濃度は、測定開始時の 8:30 には 17°C 処理で 7.2~9.1ppm, 27°C 処理で 6.5~7.5ppm, 33°C 処理で 5.7~7.0ppm, 45°C 処理で 5.3~6.6ppm であり、いずれも飽和濃度の 80~95% と高いレベルであった。液中の総酸素量の減少はほぼ直線的であり、その傾きから根の呼吸速度を求めた。その結果、DFT 区における水中根の呼吸速度は、33°C までは根域温度が高いほど大きい傾向がみられたが、45°C 処理では 27°C 処理と同程度に小さかった (第 6 図)。並木ら (1975) は、トマト根の呼吸速度は、培養液の溶存酸素濃度が 1ppm 前後までの間は濃度に関わらずほぼ一定であったと報告している。本実験における DFT 区培養液中の溶存酸素濃度は 3.8ppm 以上であったことから、溶存酸素濃度は根の呼吸を

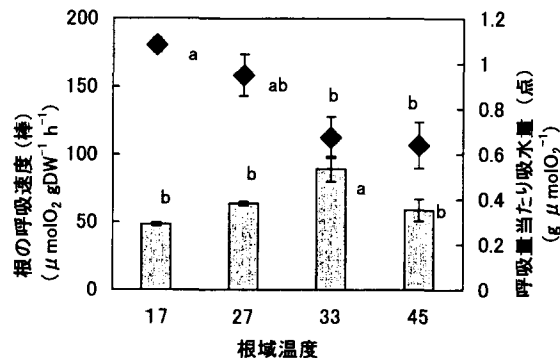


第 4 図 根域温度処理が湛液水耕 (DFT) および保水シート耕 (WSC) におけるトマト根の根系当たり吸水速度 (上) および単位根乾物当たり吸水速度 (下) に及ぼす影響。値は 3~7 個体の平均値±標準偏差。*、**および***は、DFT 区と WSC 区の間それぞれ 5%、1% および 0.1% で有意な差がみられることを示す。



第 5 図 根域温度処理が湛液水耕 (DFT) および保水シート耕 (WSC) におけるトマト根の根系当たり硝酸吸収速度 (上) および単位根乾物当たり硝酸吸収速度 (下) に及ぼす影響。値は 3~7 個体の平均値±標準偏差。*は、DFT 区と WSC 区の間 5% で有意な差がみられることを示す。

制限していなかったと考えられる. Janes et al. (1988) は, 10°Cから 50°Cの異なる温度の培養液中にトマト根を 30 分間入れ, 40~45°Cで根の呼吸速度が最大となることを示した. しかし, Klock et al. (1997) は, トマト根の呼吸速度は, 36°Cの温度処理後 0~8 日目まで増大するが, 以後急激に減少することを示した. すなわち, 高温遭遇の長期化に伴い, 根の呼吸速度は低下すると考えられる.



第6図 湛液水耕における根域温度処理が根の呼吸速度および呼吸量当たり吸水量に及ぼす影響. 値は3~4個体の平均値. 異なるアルファベットは, 処理温度の間に5%レベルで有意な差があることを示す.

一方, 根の呼吸量当たりの吸水量は, 高温ほど低下する傾向がみられた (第6図). 根の吸水は植物体の水ポテンシャルによって調節されるが, エネルギーを消費する能動的な吸収機構も存在する (Hirasawa et al., 1992). Shishido and Kumakura (1994) は, 高根域温度におけるトマトの吸水量の増大が呼吸速度の増加と比較して相対的に小さいことを報告している. キュウリの根において高温により増大するのはATP生産を伴わないシアン耐性呼吸であり, チトクロム呼吸は全呼吸に占める割合が低下すること (Du and Tachibana, 1994a) が報告されている. したがって, ある一定温度以上の高根域温度遭遇により, エネルギーに依存した根の吸水は抑制され, 総物質生産量は低下すると考えられる.

また, 本実験では湿気中根の呼吸速度を測定しなかったが, 著者ら (坂本ら, 1999) は保水シート耕および湛液水耕で生育させたトマトの切断根について, 根域温度 45°Cで短期間 (120分間) 処理後の呼吸速度は, 湿気中根で水中根よりも大きいことを認めた. さらに, 長期間 (8日間) 35°Cに遭遇した湿気中根の呼吸速度は, 乾物重当たりでは水中根よりも小さいが, 根系当たりでは水中根と同程度であったことを報告している (中野ら, 2002).

以上の結果より, 17~33°Cの範囲における根域温度の違いは, 少なくとも半日程度の比較的短期間の処理では, 湿気中根および水中根の養水分吸収速度には有意な差異を及ぼさないことが明らかとなった. しかし, 45°Cの高根域温度により, 水中根は湿気中根よりも養水分吸収速度の低下が大きかった. これは, 水中根の呼吸速度が高温により大きく抑制され, エネルギー供給が減少したためと考えられる.

本実験では, 根系の大きさやその成長を通じた根の機能の変化ではなく, 生理活性に対する短期的な影響を調べるため, 比較的短時間の温度処理を行った. その結果, 湿気中根の高温耐性が大きく, これは長期間の処理を行った前報 (中野ら, 2002) の結果と一致する. すなわち, 高温時, 湿気中根は水中根に比べて生理活性を維持でき, 根系を拡大・発達できる. そのため, 不適温度条件が長期化した場合, 湿気中根の根系の機能 [生理活性×根系の大きさで示される] が, 水中根よりも大きくなると考えられる.

文 献

- Ali, L., U. Kafkafi, Y. Sugimoto, S. Inanaga. 1994. Response of sand-grown tomato supplied with varying ratios of nitrate/ammonia to constant and variable root temperature. *J. Plant Nutri.* 17 : 2001-2024.
- Ali, L., Kafkafi, U. Yamaguchi, I. Sugimoto, Y. Inanaga, S. 1996. Effects of low root temperature on sap flow rate, soluble carbohydrates, nitrate contents and on cytokinin and gibberellin levels in root xylem exudate of sand-grown tomato. *J. Plant Nutri.* 19 : 619-634.
- Du, Y., Tachibana, S. 1994a. Effect of supraoptimal root temperature on the growth, root respiration and sugar content of cucumber plants. *Sci. Hort.* 58 : 289-301.
- Du, Y., Tachibana, S. 1994b. Photosynthesis, photosynthate translocation and metabolism in cucumber roots held at supraoptimal temperature. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 63: 401-408.
- Haarmann, L. J. H., Mago, F., Marchese, J. L., Rizzo, J. R., Yuskovic, M. A., Murnock, W. J., Luteran, J. M. 1999. A study of root elongation using tomato and radish seeds : evaluation of growth, temperature and pH, and toxicity for cacodylic acid and glutaraldehyde. *Fresenius Environ. Bull.* 8 : 37-44.
- Hirasawa, T., Tsuchida, M., Ishihara, K. 1992. Relationship between resistance to water transport and exudation rate and the effect of the resistance on the midday depression of stomatal aperture in rice plants. *Jpn. J. Crop Sci.* 61: 145-152.

- Hurewitz, J., Janes, H. W. 1983. Effect of altering the root-zone temperature on growth, translocation, carbon exchange rate, and leaf starch accumulation in tomato. *Plant Physiol.* 73 : 46-50.
- Janes, H. W., Chin, C.K., Bachmanky, J. 1988. Growth and metabolism of tomato roots grown in tissue cultures held at various temperatures. *Hort Sci.* 23:773.
- 門田寅太郎 1972. 野菜の生育に及ぼす土壌温度の影響. *高知大農紀要* 21 : 1-138.
- Klock, K., Taber, H., Graves, W. 1997. Root respiration and phosphorus nutrition of tomato plants grown at a 36°C root-zone temperature. *Amer. Soc. Hort. Sci.* 122 : 175-178.
- 松井 健・草薙得一・江口弘美 1971. 植物生育に対する温度効果に干渉する環境要因について. (I) 根部支持体. *生物環境調節* 8 : 106-110.
- Moorby, J., Graves, C. J. 1980. Root and air temperature effects on growth and yield of tomatoes and lettuce. *Acta. Hort.* 98 : 29-43.
- 中野有加・渡邊慎一・岡野邦夫・巽 二郎 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. *園学雑* 71 : 683-690.
- 並木隆和・西 新也・羽根田明子・高嶋四郎 1975. 蔬菜水耕栽培の実用化に関する研究 X 環境条件がトマト根の溶存酸素吸収量に及ぼす影響. *京都府大学報* 27 : 19-24.
- Nkansah, G. O., Ito, T. 1995. Comparison of mineral absorption and nutrient composition of heat-tolerant and non heat-tolerant tomato plants at different root-zone temperatures. *Hort. Sci.* 70: 453-460.
- 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.
- 坂本有加・渡邊慎一・岡野邦夫 1999. 異なる養液栽培方式で生育したトマトの根系形態と呼吸特性. *園学雑* 68 (別1) : 222.
- Shishido, Y., Kumakura, H. 1994. Effects of root temperature on photosynthesis, transpiration, translocation and distribution of ¹⁴C-photoassimilates and root respiration in tomato. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 63: 81-89.
- 宇田川雄二 1991. 根温を異にした養液栽培イチゴの生理生態学的研究. *千葉農試特別報告* 19 : 1-60.
- 山崎肯哉 1986. 養液栽培技術の発展経過と今後の方向. *農園* 61: 107-114.
- 吉田 敏 2000. 蛍光式酸素計を用いた根呼吸の評価. *日本生物環境調節学会 2000 年大会要旨*: 440-441.