

蔬菜水耕栽培の実用化に関する研究 IX

培養液溶存酸素濃度とトマト根の通気間隙との関係

並木隆和・西 新也・小田雅行・高嶋四郎

TAKAKAZU NAMIKI, SHIN-YA NISHI, MASAYUKI ODA
and SHIRO TAKASHIMA

Studies on production of vegetable crops in water culture IX
Root porosity of tomato roots as affected by oxygen
concentration in nutrient solution

要旨：そ菜の水耕栽培における溶存酸素濃度管理のための基礎的データを得るために、莖葉より根に酸素を拡散させる根の通気間隙の量を測定した。

培養液中の溶存酸素濃度を5段階に保ったベッドでトマト品種大型福寿を栽培して、各区の根の通気間隙量を比重法により測定したところ、栽培中の培養液溶存酸素濃度が低い区ほど根の通気間隙量は大きくなる傾向がみとめられた。栽培時期および生育段階が異なる場合には通気間隙量はやや異なる値を示したが、いずれの場合にも上記の傾向に変わりなかった。

I 緒 言

根内各部位のガス交換にとって重要である細胞間通気間隙の存在することは古くから知られていたが、これを通して地上部より根に酸素が供給されることに関心が集まったのは、Zimmerman et al. (1930) がトマトなどの通気間隙をエチレンガスが通ることをみとめてからである (Russel : 1952)。以来、主として草本植物について種々の実験が行われ、莖葉から通気間隙を通して根に酸素が拡散することが明らかにされた。すなわち、Luxmoore et al. (1969), Luxmoore et al. (1970), Varade et al. (1970), Yu et al. (1969), Luxmoore, Sojka and Stolzy (1972) は根の比重による通気間隙量測定により、有門 (1955, 1956) は通気圧測定により、Evans et al. (1960), Barber et al. (1962), Jensen et al. (1967) は放射性酸素測定により、有門 (1960), Armstrong (1964) は通気間隙中の酸素濃度測定により、相見 (1960) は培養液中の溶存酸素濃度測定により、通気

間隙中の酸素の拡散を証明した。

多くの作物の根の切片を顕微鏡観察することにより山崎 (1952) は湿害に強い種では弱い種より通気間隙がよく発達していると結論した。Grable (1966) はその総説の中で、気体の植物体内部移動の違いは、沼沢から砂漠にいたる、種の生態的な遷移を決定する主要な要因のひとつであると述べている。

Hackett (1969) は種々の面で水耕と土耕のイネ科植物の根の構造が類似していることを報告している。Luxmoore et al. (1969) は土耕のイネとトウモロコシにつき、Varade et al. (1971) は水耕のイネにつき実験を行って酸素供給の多少は根の通気間隙の量に直接影響しないことを報告した。これに対して、長期にわたる湛水はイネの根の通気間隙量を著しく増加したという報告 (Yu et al. : 1969, Varade et al. : 1970), 同じコムギでも水耕と土耕、もしくは栽培環境の違いにより通気間隙量が異なるという報告 (Luxmoore, Sojka and Stolzy : 1972, Luxmoore and Stolzy : 1972) がある。

京都府立大学農学部蔬菜園芸学研究室

Laboratory of Olericulture, Faculty of Agriculture, Kyoto Prefectural University, Kyoto, Japan.

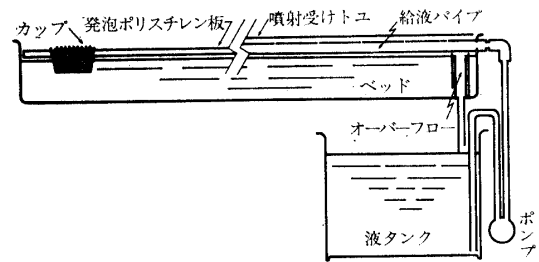
昭和49年7月26日受理

トマトを用いた著者らの比較的短期間の実験（並木ら：1974）では生育や栄養吸収におよぼす培養液溶存酸素濃度の影響は大であるのに、長期間の栽培結果（並木ら：1973）ではその影響があまり大きくなかったことから、長い栽培期間中に、異なる溶存酸素環境にトマト植物がある程度適応することが考えられる。

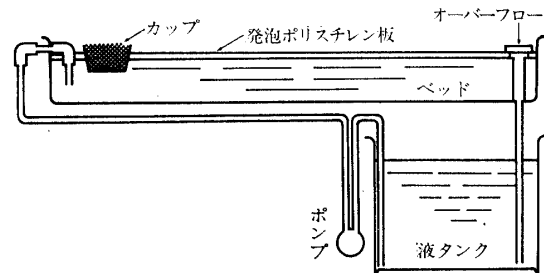
本実験では、培養液溶存酸素濃度の違いにトマトの根がどのように反応するかを明らかにし、根が地上部より送られてくる酸素に依存する度合いを検討するために、水耕栽培方式または通気時間を変えて培養液中の溶存酸素濃度を5段階としてトマトを栽培し、各区の根の通気間隙量を測定した。

II 実験材料および実験方法

砂床に播種したトマト品種 大型福寿を水耕育苗の後、ビニールハウス内に設置した各処理区のベッドに定植して栽培した。5種の培養液溶存酸素レベルを得るために水耕栽培方式あるいは通気循環時間の異なる次の5区を設定した。1) 5/60分間欠給液（第1図）、2) エアーリフト（第2図）、3) 5/15分湛液循環（第3図）、4) 5/60分湛液循環（第3図）、5) 湛液無通気（5/60分、液の循環のみを行った）（第4図）。ベッドはいずれも46×107×13cm（水深約7cm）のプラスチック成型品で、30ℓの培養液を満たし、各区70ℓ容量の液タンクを附設した。1ベッドあたりトマト6本を定植し、培養液にはれき耕用園試処方第1例（堀：1966）の50%液を使用した。実験は1973年7月より1974年7月にかけて行い、トマト苗を各区のベッドで

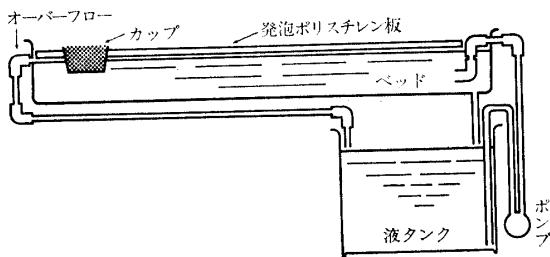


第3図 湛液循環方式水耕装置

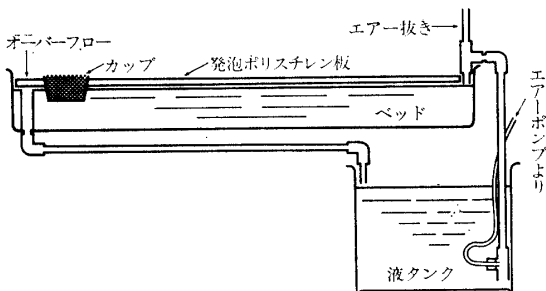


第4図 湛液無通気方式水耕装置

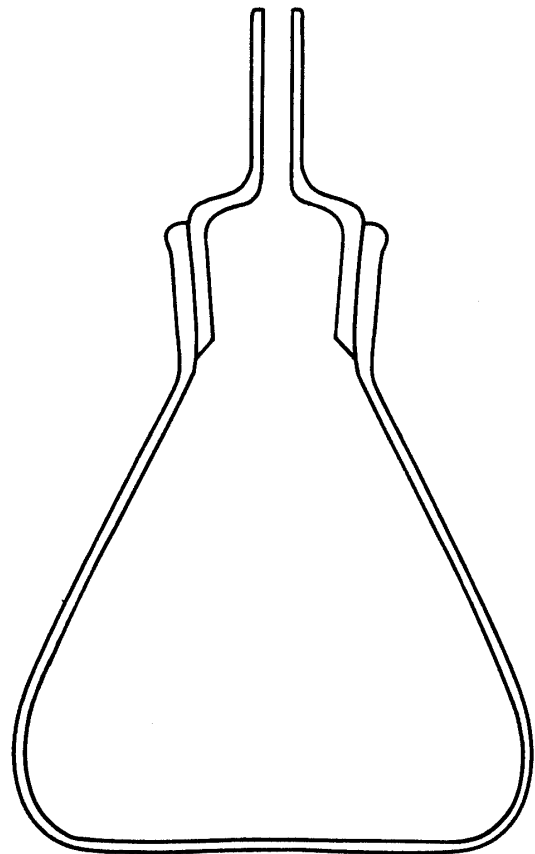
栽培の後、低温期の11月に開花結実期の植物より、高温期の5～7月に開花前、開花結実期、果実成熟期の植物より根を採取して通気間隙量を測定した。測定は根のみかけの比重を利用した Jensen et al. (1969)の方法により、容量100mlのピレックスガラス製エーレンマイヤーフラスコを加工した第5図のような比



第1図 間欠給液方式水耕装置



第2図 エアーリフト方式水耕装置



第5図 比重計

重計を用いて行った。採取した根の生体重 (W_r)、比重計に根と水を満した時の重量 (W_{r+w})、同じ根を破碎して水とともに比重計を満した時の重量 (W_h)、比重計に水のみを満した時の重量 (W_w) をそれぞれ温度一定にした後に直示化学天秤で有効数字7桁まで求め、次の式により計算した。

$$\text{通気間隙量(\%)} = \frac{(W_h - W_{r+w})}{(W_w + W_r - W_{r+w})} \times 100$$

各区の通気間隙量を栽培中の溶存酸素濃度と比較検討するために、通気間隙量測定開始時あるいは測定中に各区の溶存酸素濃度を24時間にわたって測定した。各区、ポンプの稼動する直前に、各ベッドの酸素濃度最低の位置より約 100 ml の液を採取し、温度を同一に保ちながら隔膜ガルバーニ電極を用いて溶存酸素濃度を測定した。間欠給液区においてはポンプが稼動してベッド底面の排液口よりあふれ出る最初の液について測定した。

Ⅲ 実験結果

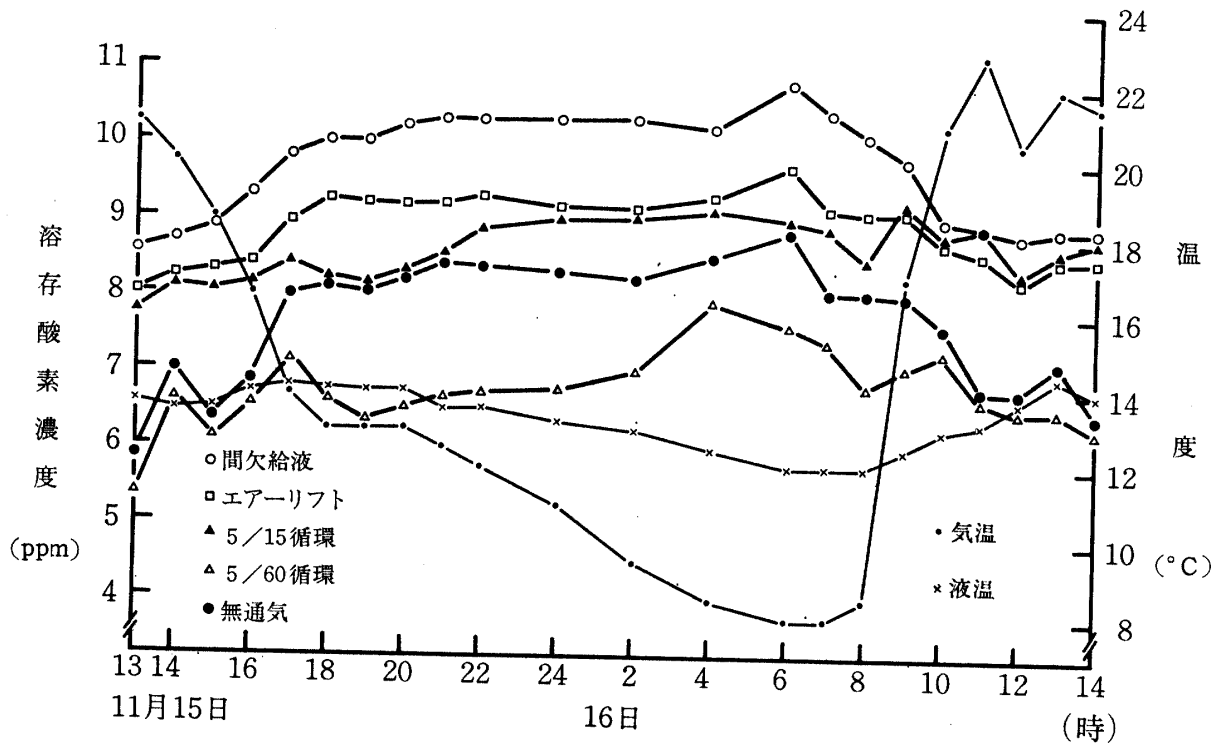
第6図は低温期11月15・16日の栽培ベッド周辺の気温、エアリフト区ベッド内液温、各区ベッド内培養液溶存酸素濃度の最低値を示す。各区とも、日中、気温、液温の高い時には溶存酸素濃度が比較的低く、夜間は高く保たれた。最も上下の差の大きいのは湛液無

通気区で、エアリフト区では差が最も小であった。溶存酸素濃度は、夜間を中心に24時間中約16時間の間は、間欠給液区、エアリフト区、5/15分湛液循環区、湛液無通気区、5/60分湛液循環区の順に保たれたが、日中の約8時間は、比較的高濃度の間欠給液区、エアリフト区、5/15分湛液循環区と、比較的低濃度の湛液無通気区、5/60分湛液循環区とにわかれた。

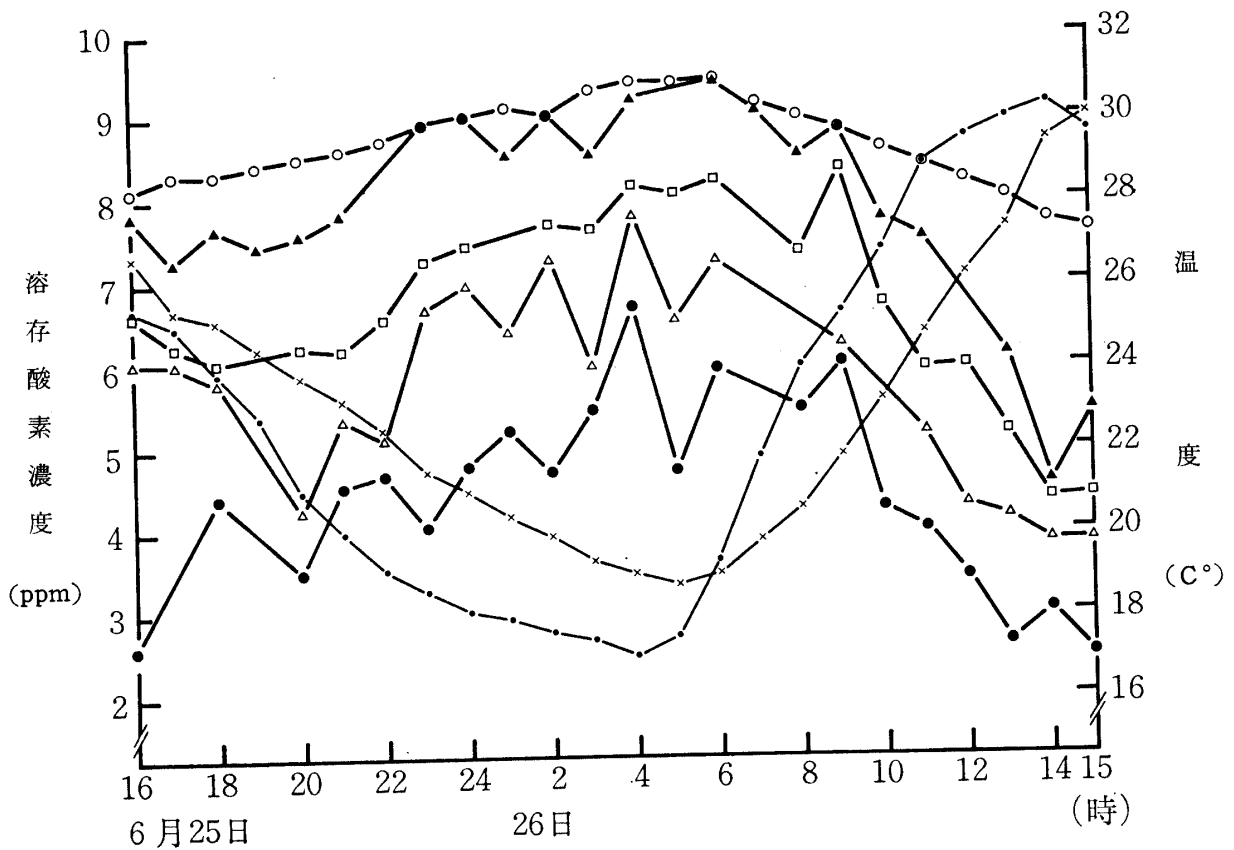
第7図は高温期6月25・26日の温度と各区溶存酸素濃度最低値の推移を示す。温度の昼夜較差が大きく、植物体も大きく生長が盛んなために、溶存酸素濃度最低値は比較的低く昼夜の較差が大となった。エアリフト区と5/15分湛液循環区の順が第6図の場合と逆になり、各区の濃度の差が比較的大きく保たれた。

第8図は高温期7月24・25日の温度と各区溶存酸素濃度最低値の推移を示す。曇天と植物体が小さかったために、溶存酸素濃度最低値は比較的高く保たれ、各区の差が大変小であった。

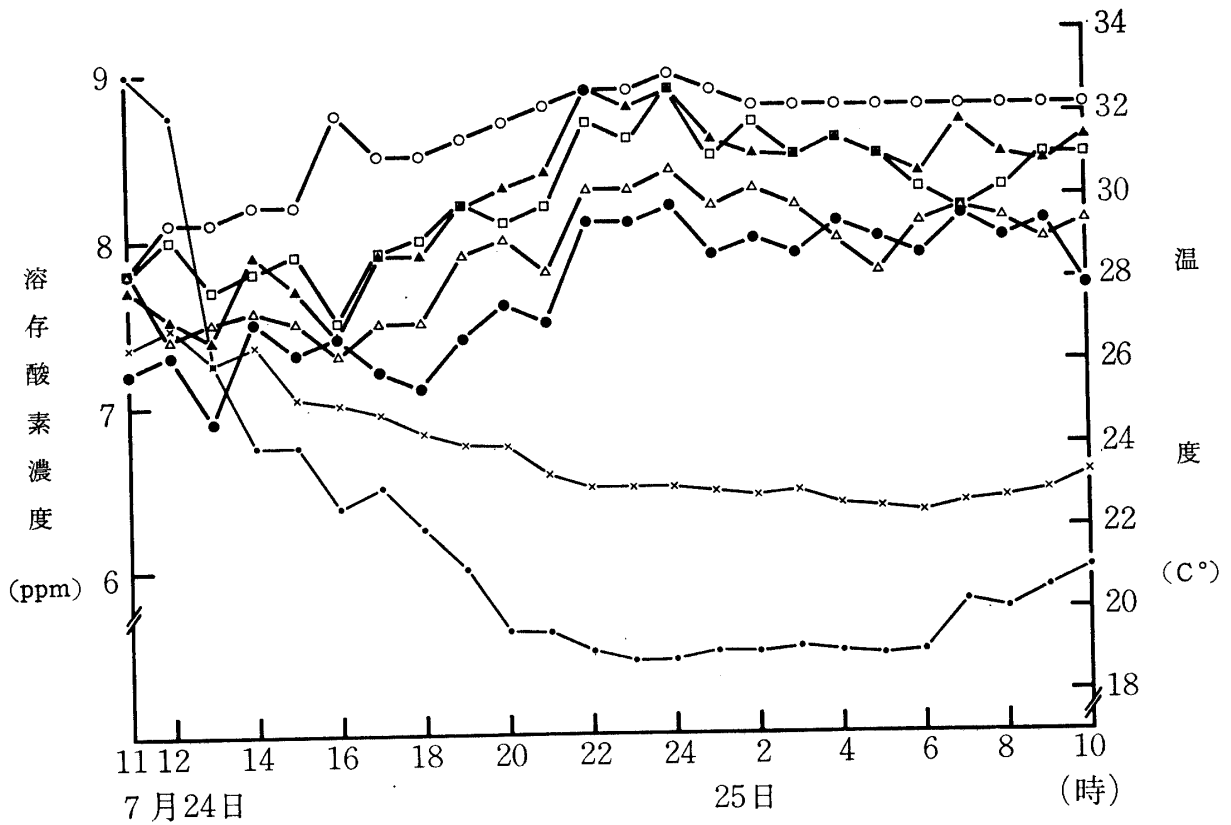
各区の根の外観をみると、第9図に示すように間欠給液区では主根が太くて分枝、細根が少く、湛液無通気区ではむしろそれに似た傾向があり、分枝が少かった。エアリフト区、5/15分湛液循環区、5/60分湛液循環区では主根が細くて分枝が多く、長く発達していた。いずれの場合にも土耕の場合にみられるような根毛はみられなかった。



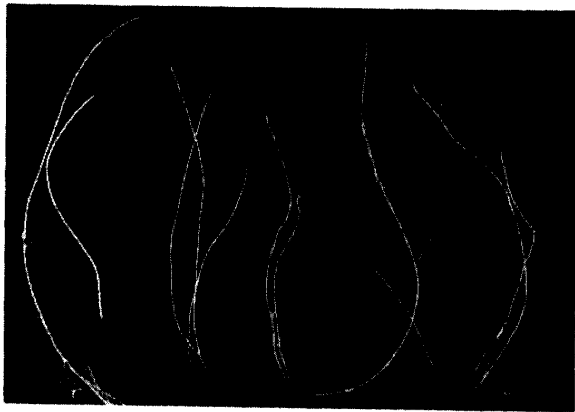
第6図 低温期栽培ベッド周辺の気温、ベッド内液温、各区ベッド内溶存酸素濃度最低値の24時間の推移



第7図 高温期栽培ベッド周辺の気温、ベッド内液温、各区ベッド内容存酸素濃度最低値の24時間の推移 (符号は第6図と同じ)



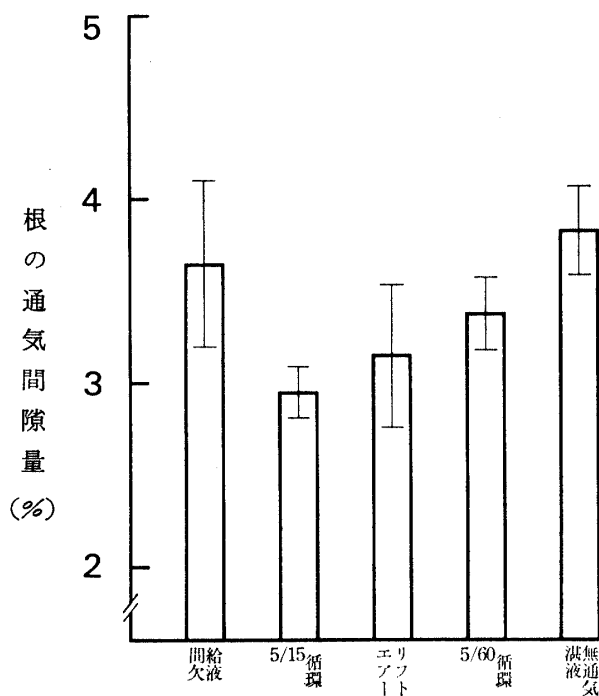
第8図 高温期栽培ベッド周辺の気温、ベッド内液温、各区ベッド内容存酸素濃度最低値の24時間の推移 (符号は第6図と同じ)



第9図 培養液溶存酸素レベルが開花結実期のトマト根の形態におよぼす影響（左より：間欠給液，湛液無通気，5/60湛液循環，5/15湛液循環，エアリフト各区，11月20日撮影）

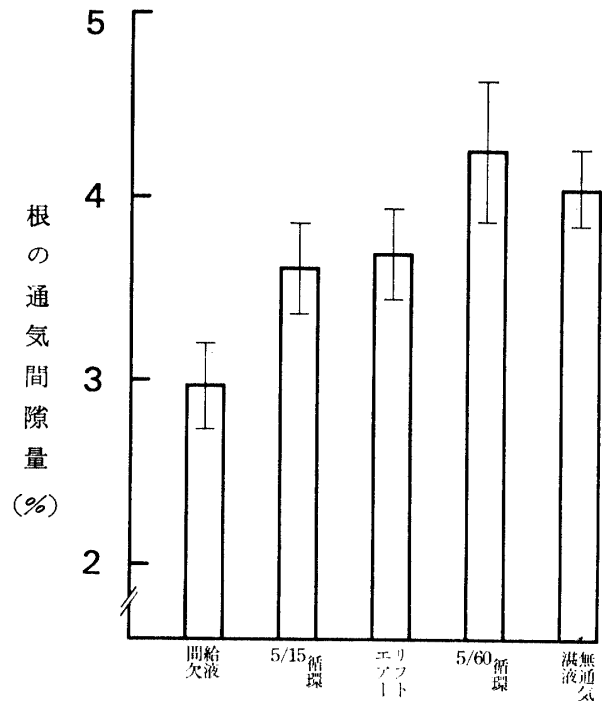
6月10日播種，6月19日定植の植物より，開花前の7月23日—27日に根を採取して通気間隙量を測定した結果を，6回測定の平均値と標準偏差で第10図に示す。グラフは第8図にみられる各区ベッド内容存酸素レベルが低くなる順に配列したが，通気間隙量は間欠給液区で高い値を示し，他の4区ではこの順に大となった。

1月25日播種，3月27日定植の植物より，開花結実期の5月8日—14日に根を採取して通気間隙量を測定



第10図 培養液溶存酸素レベルが開花前のトマト根の通気間隙量におよぼす影響（6月10日播種，6月19日定植，7月23—27日測定）

した結果を，10回測定の前平均値と標準偏差で第11図に示す。湛液無通気区でやゝ低くなった他は，第7図にみられる各区ベッド内容存酸素レベルが低くなる順に，根の通気間隙量は大きくなった。

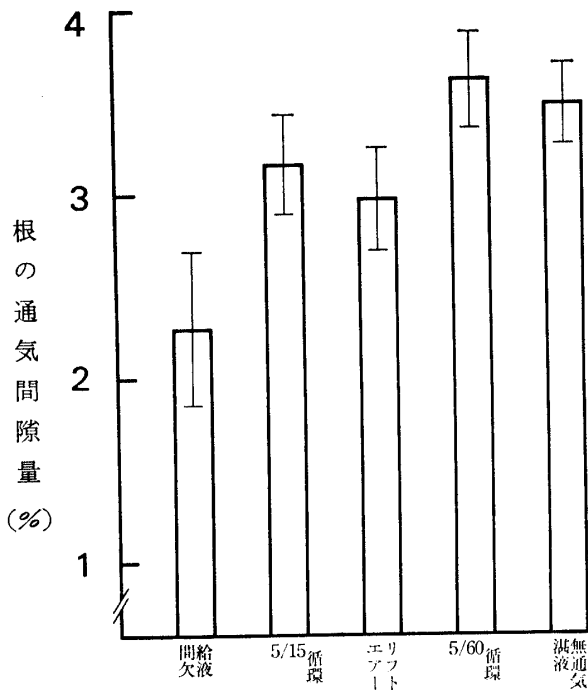


第11図 培養液溶存酸素レベルが開花結実期のトマト根の通気間隙量におよぼす影響（1月25日播種，3月27日定植，5月8—14日測定）

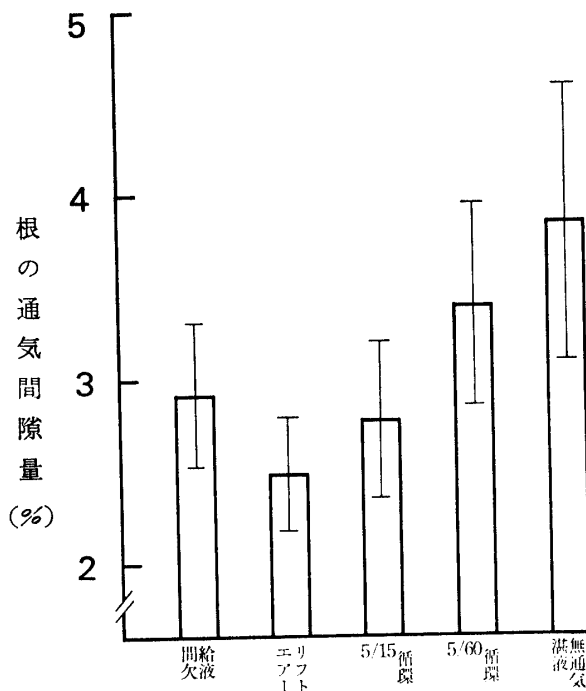
上記の植物と同時に栽培した材料より，果実成熟期の6月20日—7月1日に根を採取して通気間隙量を測定した結果を，10回測定の前平均値と標準偏差で第12図に示す。グラフは第7図にみられる各区ベッド内容存酸素レベルが低くなる順に配列したが，エアリフト区と湛液無通気区でやゝ低い値を示した以外は，根の通気間隙量はこの順に大となった。

9月1日播種，10月3日定植の植物より，開花結実期の11月28日—12月12日に根を採取して低温時の通気間隙量を測定した結果を12回測定の前平均値と標準偏差で第13図に示す。グラフは第6図にみられる各区ベッド内容存酸素レベルが低くなる順に配列したが，根の通気間隙量はこの順に大となった。間欠給液区の通気間隙量は高く，5/15湛液循環区と5/60湛液循環区の中間の値を示した。

異なる時期，異なる生育段階における測定に対して各区の通気間隙量はほぼ同じような値を示したが，一般に高温時，開花結実期の通気間隙量が他の場合より大であった。



第12図 培養液溶存酸素レベルが果実成熟期のトマト根の通気間隙量におよぼす影響（1月25日播種，3月27日定植，6月20—7月1日測定）



第13図 培養液溶存酸素レベルが開花結実期のトマト根の通気間隙量におよぼす影響（9月1日播種，10月3日定植，11月28日—12月10日測定）

IV 考 察

間欠給液区では60分の内，5分間液を満し，残りの55分間はベッドより液を抜き去って根の表面および根群の間に液が残っているだけであるから，空気中の酸素は根表面のうすい水膜を通して容易に根に到達すると思われる。しかし酸素の拡散速度は水中では空気中の1/10,000のオーダーに減少し（Grable: 1966），土壤中では土壤空気から根への酸素の拡散は根表面の水膜によって妨げられるという報告（Letey et al.: 1967）がある。間欠給液方式において実際に根に供給されている酸素の量を測定することができないので，本実験では便宜的に，給液時に最初にベッドからあふれ出る液の溶存酸素濃度を測定したわけであり，この値はその時の液温における飽和濃度に等しい場合が多く，当然第6，7，8区では各処理区の中で最高の値を示したが，根の通気間隙量は第10，13区にみられるように，溶存酸素濃度から想定されるよりも高い値を示す例があった。この方式の実際の酸素供給能力が割合低い所にあるのか，あるいは根の外観や栄養吸収のパターン（高嶋ら：1974）より推察されるように，この方式が湛液循環方式とは異なった面を持っているのかについて尚今後の研究が必要である。

湛液無通気区では5/60分間，液の循環は行すが，給液，排液にともなって酸素の混入が起らないような構造になっており，ベッド内液面には発泡ポリスチレン板を密着させてある（他の区では液面と発泡ポリスチレン板との間に空気の層がある）ので，培養液への酸素の供給は非常にわずかである。それにもかかわらず，この区において溶存酸素濃度が5/60湛液循環区よりも高い場合のあったことは，この区の植物では根の通気間隙がよく発達して，地上部からの酸素の供給が比較的多く，培養液溶存酸素に依存する度合いが低いために，溶存酸素の消費が少かったことを示しており，相見（1960）の観察したイネの場合と同様であると思われる。

本実験における栽培条件の範囲では，培養液より根に供給される溶存酸素の量が少くなるほど，根内部の通気間隙量が多く発達して根の活動に必要な酸素を地上部より供給できるよう適応していることがみとめられた。栽培の季節，植物の生育段階を変えて実験してみても，常にこの傾向は観察された。この現象を実際栽培に有効に利用することができれば，そ菜の水耕栽培における通気装置，通気時間を現在行われているよりも簡易化することが可能であると考えられる。

しかしこれによって，如何なる環境条件においても

培養液通気を考慮しなくても順調な生育が得られるというわけではなく、温度の高い場合、根の量の多い場合、生育の途中で溶存酸素濃度が急に低下した場合などには酸素供給が間に合わなくなって、根腐れや生育障害の起こることは実際栽培でしばしば観察されるところである。そ菜の種類により溶存酸素不足に対する反応に差があり（位田：1953）、また果樹では通気間隙による地上部よりの酸素供給は重要なものではないといわれ（Rowe et al. : 1973）、作物による違いにも注意する必要がある、他の環境条件の影響とともに実験を続行中である。

引用文献

- 1) Zimmerman, P. W., A. E. Hitchcock and W. Crocker (1930) : Contr. Boyce Thompson Inst. **3** : 313-320.
- 2) Russel, M. B. (1952) : In Shaw, B. T. ed. : Soil physical condition and plant growth. pp. 253-301, Academic Press.
- 3) Luxmoore, R. J. and L. H. Stolzy (1969) : Agron. J. **61** : 202-204.
- 4) ———, ——— and J. Letey (1970) : Agron. J. **62** : 322-324.
- 5) Varade, S. B., L. H. Stolzy and J. Letey (1970) : Agron. J. **62** : 505-507.
- 6) Yu, Peter T., L. H. Stolzy and J. Letey (1969) : Agron. J. **61** : 844-847.
- 7) Luxmoore, R. J., R. E. Sojka and L. H. Stolzy (1972) : Soil Sci. **113** : 354-357.
- 8) 有門博樹 (1955) : 日作紀 **23** : 285-286.
- 9) ——— (1956) : 日作紀 **24** : 289-295.
- 10) Evans, N. T. S. and M. Ebert (1960) : J. exp. Bot. **11** : 246-257.
- 11) Barber, D. A., M. Ebert and N. T. S. Evans (1962) : J. exp. Bot. **13** : 397-403.
- 12) Jensen, C. R., L. H. Stolzy and J. Letey (1967) : Soil Sci. **103** : 23-29.
- 13) 有門博樹 (1960) : 日作紀 **29** : 55-56.
- 14) Armstrong, W. (1964) : Nature **204** : 801-802.
- 15) 相見靈三 (1960) : 日作紀 **29** : 51-54.
- 16) 山崎 傳 (1952) : 農技研報告 **B-1** : 1-91.
- 17) Grable, A. R. (1966) : Advan. Agron. **18** : 57-106.
- 18) Hackett, C. (1969) : In Whittington, W. J. ed. : Root growth. pp. 134-145, Butterworths.
- 19) Varade, S. B., J. Letey and L. H. Stolzy (1971) : Plant Soil **34** : 415-420.
- 20) Luxmoore, R. J. and L. H. Stolzy (1972) : Agron. J. **64** : 720-725.
- 21) 並木隆和・高嶋四郎・西 新也・羽根田明子 (1974) : 京府大農・農場報告 **6** : 9-15.
- 22) 並木隆和・西 新也・羽根田明子・高嶋四郎 (1973) : 京府大学報, 農 **25** : 17-24.
- 23) Jensen, C. R., R. J. Luxmoore, S. D. Van Gundy and L. H. Stolzy (1969) : Agron. J. **61** : 474-475.
- 24) 堀 裕 (1966) : 蔬菜・花卉のれき耕栽培, 養賢堂.
- 25) Letey, J. and L. H. Stolzy (1967) : Soil Sci. **103** : 404-409.
- 26) 高嶋四郎・並木隆和・西 新也・黒田和夫 (1974) : 京府大農・農場報告 **6** : 1-8.
- 27) 位田藤久太郎 (1953) : 園学雑 **22** : 24-27.
- 28) Rowe, R. N. and D. V. Beardsell (1973) : Hort. Abst. **43** : 534-548.

Summary

Root porosity was measured by the pycnometer method, of the tomato variety "Ohgata-Fukujyu" which had been water-cultured in five levels of oxygen concn in the culture solution.

Root porosity which averaged from approximately 2.2 to 4.2 percent of the root volume,

was, in general, higher in roots which had been grown in lower dissolved oxygen concn. This tendency was valid for the measurements made on plants of different growth stages and in different seasons, although the value was affected by these factors.