

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

郭 世榮・橘 昌司

三重大学生物資源学部 514 津市上浜町1515

Effect of Dissolved O₂ Levels in a Nutrient Solution on the Growth and Mineral Nutrition of
Tomato and Cucumber Seedlings

Guo Shi Rong and Shoji Tachibana

Faculty of Bioresources, Mie University, Tsu, Mie 514

Summary

The root systems of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill., cv. Hausu-Momotaro) and cucumber (*Cucumis sativus* L., cv. Sharp I) seedlings were subjected to four different dissolved O₂ (DO) levels in nutrient solution for 8 days under artificial light conditions. The DO levels were kept constant at 1, 2, 4 and 8 ppm, and the solution temperature was controlled at 22 and 30°C for tomato and at 25 and 33°C for cucumber.

1. Growth of tomato plants at 1 and 2 ppm DO was inferior to that at higher DO levels, irrespective of solution temperatures.

2. Growth of cucumber plants was slightly retarded even at 1 ppm when the solution was held at 25°C. At 33°C, the growth was significantly inhibited at 1 and 2 ppm DO levels, similar to tomato.

These results suggest that to control the vegetative growth of young plants in DFT by means of the DO level, lowering the DO level to about 2 ppm is appropriate for tomato. For cucumber, however, it seems necessary to lower the DO level well below 1 ppm to control effectively its vegetative growth. Possible causes of the difference in the tolerance to low DO levels between tomato and cucumber are discussed as to the morphological changes and iron-induced oxygen radical formation in the roots.

緒 言

野菜の養液栽培では各種の方式が開発されている。わが国では湛液水耕 (DFT) がトマトや葉菜類の栽培を中心に最も広く用いられている (高島, 1993)。DFT は、他の方式に比べて1株当たりの培養液量が多く、そのために養分濃度、pH、温度などの培養液の理化学性の変動が小さくて安定しているという長所がある。しかしその反面、根の大半が培養液に漬かっているために、果菜類では栽培期間が長くなると根系が大きくなって根が酸素不足に陥りやすいことや、栄養生長と生殖生長のバランスを適切に保つことが難しく、しばしば栄養生長に傾いて過繁茂になりやすいなどの難点も有する (板木, 1987)。

後者の問題については、薄膜水耕 (NFT) やロックウール耕では培養液の供給回数を変えることにより容易に生長調節を行うことができるが、DFT にはこの方法を適用することはできない。DFT での生長調節手段としては、溶存酸素濃度 (以下、DO という) の調節が最も実用的であると考えられるが (大河内ら, 1979; 板木ら, 1996)、現在のところ実用的な技術は開発されていない。実用的技術を開発するためには、一定レベルの DO と植物の生育や養分吸収・植物ホルモン代謝などの生理機能との関係を定量的に把握する必要があると思われる。

DFT における培養液の DO と生育や生理機能との関係についてはこれまでに多くの研究が行われている (山崎ら, 1976)。しかし、これらの多くは通気頻度を変えたり酸素分圧の異なる空気を通気することで DO

を調節しており、従って、DO はある幅で常に変動している。また、溶存酸素によって生長調節を行うためには、DO と植物ホルモン代謝との関係を明らかにすることが重要であると思われるが、この点についても、これまでの研究はほとんどが無酸素に対するホルモン代謝の反応をみたものである (Reid・Crozier, 1969; Jackson ら, 1978; Wample・Reid, 1979)。このように、根を一定レベルの低い DO に比較的長期間さらした場合の植物の生長や生理的反應を定量的に調べた研究は少ない。

そこで筆者らは、DFT で栽培される果菜類の生長調節を DO によって行うための基礎資料を得ることを目的として、培養液の DO を $\pm 0.5\text{ppm}$ 以内の精度で調節できる装置を製作し、低濃度領域の DO に対する野菜類の生育と生理的反應を定量的に明らかにするための研究を開始した。本報では、低レベルの DO に対するトマトとキュウリ幼植物の生長反応について調べた実験の結果を報告する。

材料および方法

トマト (*Lycopersicon esculentum* Mill.) は‘ハウス桃太郎’、キュウリ (*Cucumis sativus* L.) は‘シャープ I’をそれぞれ供試した。催芽種子をパーミキュライトに播種し、子葉展開時に礫を詰めた 10cm 素焼鉢に鉢上げして、ホーグランド液 (第 1 液, 1/2 倍) を用いてガラス室で湛液礫育苗した。トマトでは第 4 葉齡時、キュウリでは第 1 葉齡時に人工気象室内の 4 台の栽培槽 (長さ 115×幅 45×深さ 27cm, 120 l 容, 植物を支持する蓋と培養液面との間に約 3cm の隙間を設けた) に 8 株ずつ定植した。人工気象室の昼夜気温は 28/22℃, 相対湿度は 70/85% に設定した。光条件は、陽光ランプと BOC ランプをワット比で 3:1 の割合とした光源を用い、栽培槽面で $480\mu\text{M}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の光強度で 15 時間日長とした。培養液はホーグランド液 (第 1 液, 1/2 倍) を用い、循環ポンプで常時液流を与えた。培養液温度 (以下、液温という) はトマトでは 22℃ と 30℃, キュウリでは 25℃ と 33℃ とし、それぞれ 2 回に分けて栽培実験を行った。

培養液の DO は、人工気象室に内蔵した DO 調節器の信号にもとづいて、DO が設定値以上になったときには窒素ガスを通気し、設定値以上になったときには酸素ガスまたは空気を通気する方法で調節した。DO は、定植当初は各栽培槽とも $8\text{mgO}_2/\text{l}$ (以下, ppm とする) に設定し、定植後 2 日目に 1, 2, 4, 8ppm に設定して処理を開始した。硬質塩ビ板で作成した栽

培槽の蓋と栽培槽の間の隙間をビニールテープで封じ、DO がほぼ $\pm 0.5\text{ppm}$ に維持されるようにした。処理後 8 日目の終わりに葉身、茎+葉柄、根に分けて植物体を採取した。葉身は生体重を測定したのち凍結乾燥した。根は、フリースペース中の無機養分を洗い出すために約 10℃ の脱イオン水に 10 分間浸漬したのち、凍結乾燥した。茎+葉柄は 60℃ で 2 日間以上通風乾燥した。乾物重の測定後、葉身と根の無機成分濃度を常法によって測定した。

結 果

1. 生長に及ぼす溶存酸素濃度の影響

トマトの生育は両液温区とも DO が高いほど優れ、2ppm 以下で有意に抑制された (第 1 図)。処理期間中 2 日ごとに行った草丈の調査結果によると、1, 2ppm では 2 日目に生長の遅延が観察された。処理終了時における 1ppm 区の 1 株当たり全乾物重は、液温 22℃ と 30℃ の場合で 8ppm 区のそれぞれ 59%, 60% に過ぎず、2ppm 区ではそれぞれ 78%, 84% であった。器官別にみると、茎葉より根の生長抑制が著しく、1ppm 区の根の乾物重は 22℃, 30℃ のいずれも 8ppm 区の約 30% に過ぎなかった。その結果、乾物重の T/R 比は 2~8ppm 区の 10 前後に対して、1ppm では 16~17 と著しく大きくなった。葉の色には区による違いはなかったが、1ppm では、根域に酸素が少ないときにしばしば観察される上偏生長が上~中位葉に生じた。葉の含水率は、2~8ppm の間では大きな違いはなかったが、1ppm では明らかに低かった。

キュウリでは、液温 25℃ の場合は、生長は 4ppm で最もよかったが、生長に対する DO の影響は概して小さかった (第 2 図)。1ppm では 4ppm に比べて根の生長は劣ったが、1 株当たりの全乾物重は 4ppm 区と大差なかった。1ppm 区の根はやや灰色がかり、2ppm 以上の区の根に比べて根長が短く、培養液面と植物を支持する蓋との間の気相に露出している下胚軸から不定根が多く発生した。また、1ppm 区の根は根の表面が凹凸状を呈し、表皮組織に亀裂が生じていた。葉には特別な異常は発生せず、葉身の含水率も区間による違いはなかったが、1ppm 区の葉身はやや凸状に湾曲した。また、8ppm 区的全乾物重は、4ppm 区のそれよりわずかに小さい程度であったが、草丈と茎+葉柄の乾物重は有意に小さかった。乾物の T/R 比は 1ppm 区がその他の区よりやや大きかった (データ省略)。

液温を 33℃ に高めた場合には、1 株当たり全乾物重は 8ppm で最大になったが、4ppm と 8ppm の区間に

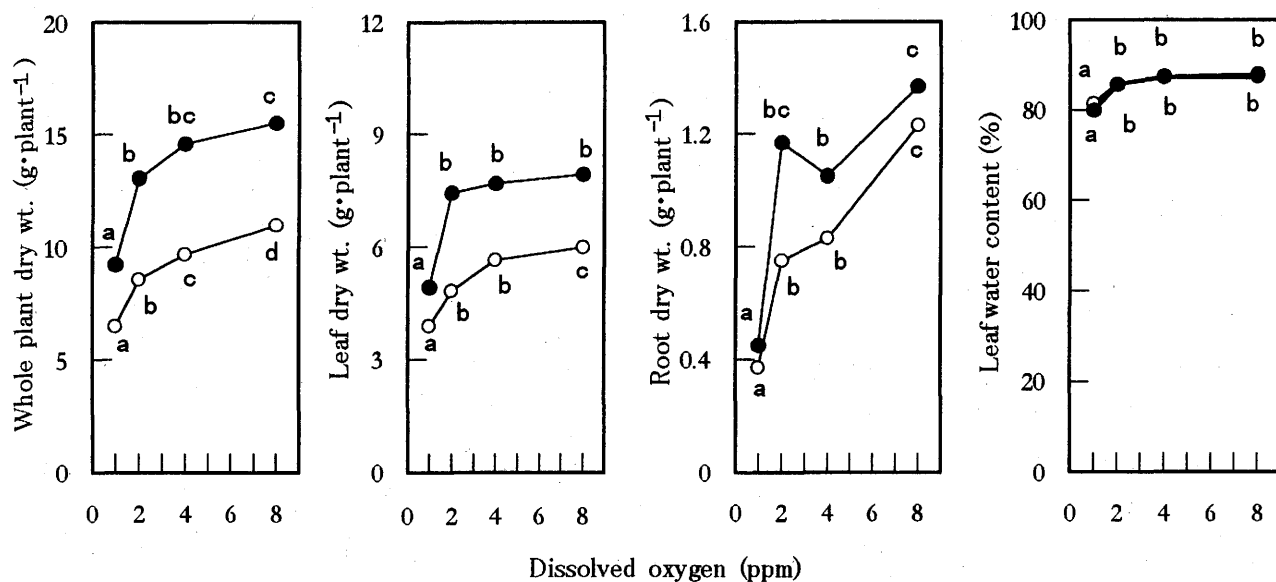


Fig. 1. Effect of the DO levels in nutrient solution on the growth and leaf water content in tomato seedlings grown at 22°C (○) and 30°C (●). Values with the same letter on a graph are not significantly different at $P=0.05$.

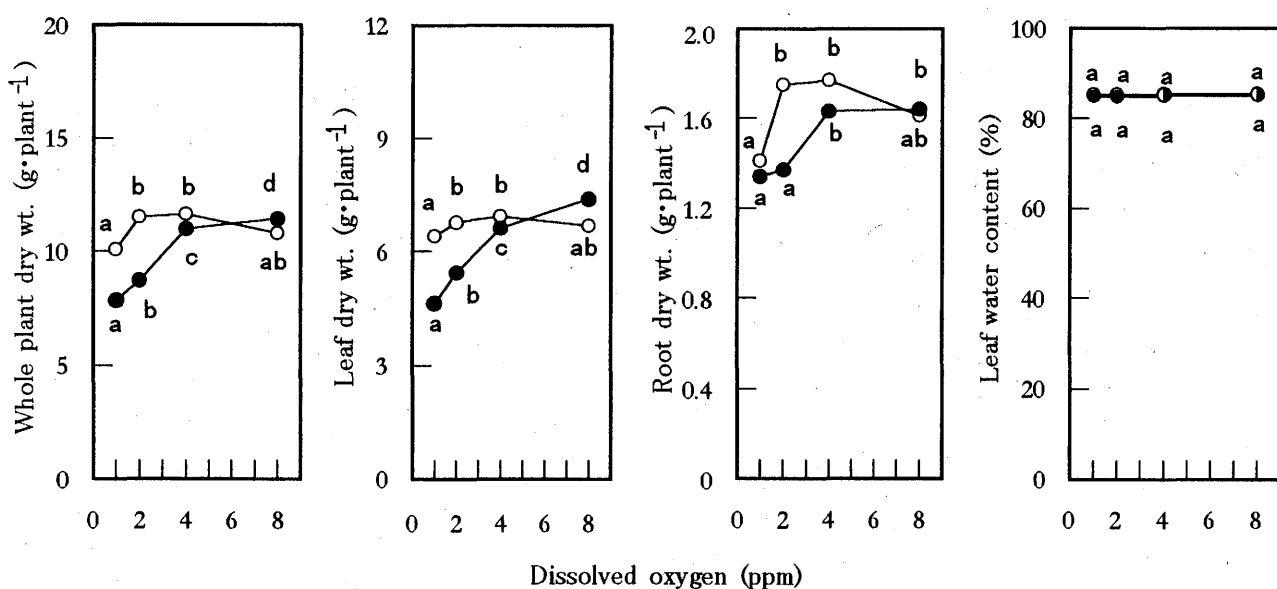


Fig. 2. Effect of the DO levels in nutrient solution on the growth and leaf water content in cucumber seedlings grown at 25°C (○) and 33°C (●). Values with the same letter on a graph are not significantly different at $P=0.05$.

は大きな違いはなかった。これに対して、1ppm と 2ppm では 1 株当たり全乾物重が 8ppm 区の 69%, 74%と明らかに生長が劣った。1, 2ppm 区では葉身の乾物重が特に小さくなり、その結果、乾物の T/R 比は 1ppm 区で最も小さくなった (データ省略)。葉が小さくなるとともに、中位葉の凸状の湾曲が 25°C の場合に比べて激しくなった。また、葉身の含水率は液温 25°C の場合より僅かに小さかったが、処理区間に違いはなく、葉色にも大きな違いはなかった。

1ppm 区の根の乾物重は 8ppm 区のその 82%であったが、根長は非常に短かった。根の表面の形態には処理区間に大きな違いはみられなかった。

2. 植物体の無機成分濃度に及ぼす溶存酸素濃度の影響

葉身の無機成分濃度は、ほぼ中間の節位で上位葉と下位葉に分けて調べた。

トマトについては、DO に対する生長反応に液温の影響がみられなかったため、22°C の場合についてのみ

分析を行った。葉の無機成分濃度はほとんどの養分で、上位葉、下位葉ともに DO の低下につれて低下する傾向が認められた (第 1 表)。無機成分濃度が DO の影響を受ける程度は養分の種類によって多少異なり、1ppm では N と Mg の濃度が最も顕著に低下し、K、Ca も有意に低下した。P 濃度は上位葉ではわずかに低下したのみであったが、下位葉では顕著に低下した。一方、根では濃度が低下した無機成分は少なく、P、Mg、Fe はむしろ増加する傾向を示し、特に Fe 濃度は 4ppm 以下の区で顕著に高まった。

液温 25℃ で生育したキュウリでは、葉、根ともに無機成分濃度に対する DO の影響は全般に小さかった (第 2 表)。しかし、葉の Ca 濃度は上位葉、下位葉ともに DO の低下につれて増大する傾向を示し、Mn 濃度は 1、2ppm 区の葉と根で増大した。低酸素区のトマトで観察された根の Fe 濃度の増大は、キュウリでも 2ppm では認められたが 1ppm では観察されなかった。一方、液温 33℃ の場合は、1、2ppm で葉の Zn と Mn の濃度が顕著に低下した (第 3 表)。Ca 濃度は、25℃ の場合と異なり、1、2ppm で逆に有意に低下し

Table 1. Effects of dissolved O₂ (DO) levels in nutrient solution on mineral concentrations in the leaves and roots of tomato plants grown at 22 °C.

| Organs ^z | DO level (ppm) | N | P | K | Ca | Mg | Fe | Mn | Zn |
|---------------------|----------------|----------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------------|---------------------|-------------------|
| | | (g·100 g ⁻¹ dw) | | | | | (μg·g ⁻¹ dw) | | |
| Upper leaves | 1 | 2.26 ^a | 0.70 ^a | 2.04 ^a | 3.15 ^a | 0.52 ^a | 186.4 ^a | 31.3 ^a | 10.9 ^b |
| | 2 | 4.43 ^b | 0.82 ^b | 2.50 ^b | 3.40 ^b | 0.72 ^b | 233.2 ^c | 41.2 ^b | 14.4 ^d |
| | 4 | 5.08 ^c | 0.92 ^d | 3.53 ^d | 4.94 ^d | 0.87 ^c | 302.0 ^d | 52.3 ^c | 13.0 ^c |
| | 8 | 5.05 ^c | 0.87 ^c | 3.01 ^c | 4.52 ^c | 0.92 ^d | 202.8 ^b | 92.3 ^d | 7.5 ^a |
| Lower leaves | 1 | 2.50 ^a | 0.29 ^a | 1.53 ^a | 5.74 ^a | 0.70 ^a | 144.0 ^a | 65.0 ^b | 8.0 ^a |
| | 2 | 3.53 ^b | 0.50 ^b | 2.24 ^b | 8.53 ^d | 1.14 ^b | 193.2 ^c | 86.4 ^c | 8.7 ^b |
| | 4 | 3.63 ^b | 0.63 ^d | 2.75 ^d | 7.83 ^b | 1.28 ^c | 214.1 ^d | 59.6 ^a | 13.4 ^c |
| | 8 | 3.86 ^b | 0.55 ^c | 2.43 ^c | 8.19 ^c | 1.31 ^c | 168.6 ^b | 93.7 ^d | 7.7 ^a |
| Roots | 1 | 4.46 ^a | 1.78 ^d | 4.78 ^a | 1.10 ^a | 1.15 ^c | 2602.3 ^c | 715.3 ^a | 44.7 ^b |
| | 2 | 5.13 ^c | 1.60 ^c | 6.00 ^c | 1.14 ^a | 0.97 ^b | 2857.5 ^d | 850.2 ^b | 49.8 ^b |
| | 4 | 4.98 ^{bc} | 1.29 ^b | 6.12 ^c | 1.24 ^b | 0.86 ^a | 2223.8 ^b | 1112.6 ^c | 35.6 ^a |
| | 8 | 4.63 ^{ab} | 0.81 ^a | 5.28 ^b | 1.17 ^{ab} | 0.86 ^a | 1202.1 ^a | 808.5 ^b | 33.9 ^a |

^z Leaves were divided into upper and lower leaves at the middle leaf node.

^y Values in a column with the same letter are not significantly different at $p = 0.05$.

Table 2. Effects of dissolved O₂ (DO) levels in nutrient solution on mineral concentrations in the leaves and roots of cucumber plants grown at 25 °C.

| Organs ^z | DO level (ppm) | N | P | K | Ca | Mg | Fe | Mn | Zn |
|---------------------|----------------|----------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|
| | | (g·100 g ⁻¹ dw) | | | | | (μg·g ⁻¹ dw) | | |
| Upper leaves | 1 | 5.40 ^b | 1.15 ^a | 3.43 ^a | 3.63 ^d | 0.51 ^b | 85.1 ^c | 45.4 ^c | 50.1 ^a |
| | 2 | 5.36 ^{ab} | 1.24 ^c | 3.44 ^a | 3.48 ^c | 0.47 ^a | 100.0 ^b | 56.2 ^d | 53.0 ^b |
| | 4 | 5.40 ^b | 1.24 ^c | 3.42 ^a | 3.33 ^b | 0.48 ^{ab} | 73.8 ^a | 15.6 ^b | 68.2 ^c |
| | 8 | 5.26 ^a | 1.19 ^b | 3.41 ^a | 3.07 ^a | 0.49 ^{ab} | 70.8 ^a | 12.1 ^a | 83.0 ^d |
| Lower leaves | 1 | 4.73 ^b | 1.01 ^a | 4.08 ^b | 7.02 ^b | 0.86 ^c | 125.3 ^b | 115.4 ^c | 62.8 ^b |
| | 2 | 4.53 ^a | 1.18 ^b | 3.93 ^{ab} | 6.65 ^{ab} | 0.82 ^a | 139.1 ^c | 123.7 ^d | 55.1 ^a |
| | 4 | 4.73 ^b | 1.21 ^b | 3.95 ^{ab} | 6.31 ^a | 0.85 ^{bc} | 95.8 ^a | 45.5 ^b | 84.8 ^c |
| | 8 | 4.67 ^{ab} | 1.26 ^c | 3.86 ^a | 6.15 ^a | 0.84 ^b | 91.5 ^a | 22.2 ^a | 95.9 ^d |
| Roots | 1 | 5.15 ^b | 0.95 ^a | 8.38 ^b | 0.65 ^a | 0.15 ^a | 432.8 ^a | 600.1 ^d | 202.4 ^b |
| | 2 | 5.11 ^b | 1.07 ^c | 9.82 ^d | 0.71 ^b | 0.16 ^b | 1885.7 ^c | 348.4 ^c | 117.6 ^a |
| | 4 | 4.99 ^b | 1.02 ^b | 8.86 ^c | 0.69 ^{ab} | 0.17 ^b | 644.7 ^b | 201.4 ^b | 350.1 ^d |
| | 8 | 4.54 ^a | 1.10 ^d | 7.93 ^a | 0.67 ^{ab} | 0.19 ^c | 601.0 ^b | 147.6 ^a | 212.8 ^c |

^z Leaves were divided into upper and lower leaves at the middle leaf node.

^y Values in a column with the same letter are not significantly different at $p = 0.05$.

Table 3. Effects of dissolved O₂ (DO) levels in nutrient solution on mineral concentrations in the leaves and roots of cucumber plants grown at 33 °C.

| Organs ^z | DO level (ppm) | N | P | K | Ca | Mg | Fe | Mn | Zn |
|---------------------|----------------|----------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|
| | | (g·100 g ⁻¹ dw) | | | | | (μg·g ⁻¹ dw) | | |
| Upper leaves | 1 | 5.07 ^a | 1.08 ^a | 3.13 ^a | 2.52 ^a | 0.41 ^a | 96.9 ^d | 49.8 ^a | 74.7 ^a |
| | 2 | 5.46 ^b | 1.09 ^a | 3.17 ^a | 2.44 ^a | 0.41 ^a | 92.1 ^c | 58.4 ^b | 80.6 ^b |
| | 4 | 5.64 ^c | 1.10 ^a | 3.15 ^a | 3.18 ^b | 0.50 ^b | 78.6 ^a | 65.3 ^c | 75.1 ^a |
| | 8 | 5.63 ^c | 1.11 ^a | 3.23 ^a | 3.21 ^b | 0.56 ^c | 85.0 ^b | 95.0 ^d | 80.3 ^b |
| Lower leaves | 1 | 4.56 ^a | 0.83 ^a | 2.97 ^a | 5.05 ^a | 0.70 ^a | 114.1 ^a | 106.5 ^a | 64.9 ^a |
| | 2 | 4.58 ^a | 0.89 ^b | 3.14 ^b | 5.07 ^a | 0.68 ^a | 119.8 ^b | 126.4 ^b | 83.1 ^b |
| | 4 | 5.47 ^b | 0.87 ^{ab} | 3.50 ^c | 6.08 ^b | 0.85 ^b | 121.6 ^b | 150.8 ^c | 90.8 ^c |
| | 8 | 5.48 ^b | 0.96 ^c | 3.82 ^d | 5.97 ^b | 0.90 ^c | 131.1 ^c | 195.0 ^d | 100.7 ^d |
| Roots | 1 | 4.38 ^a | 0.85 ^a | 7.99 ^c | 0.90 ^a | 0.21 ^a | 1872.8 ^c | 302.2 ^a | 140.0 ^a |
| | 2 | 4.80 ^b | 0.88 ^a | 8.15 ^c | 0.93 ^{bc} | 0.26 ^b | 1466.8 ^b | 1048.1 ^c | 163.8 ^b |
| | 4 | 4.80 ^b | 0.92 ^b | 7.48 ^b | 0.91 ^{ab} | 0.28 ^c | 997.3 ^a | 849.6 ^b | 173.0 ^b |
| | 8 | 4.67 ^b | 1.08 ^c | 6.56 ^a | 0.95 ^c | 0.28 ^c | 951.8 ^a | 1466.4 ^d | 246.6 ^c |

^z Leaves were divided into upper and lower leaves at the middle leaf node.
^y Values in a column with the same letter are not significantly different at $p = 0.05$.

Table 4. Effect of adventitious roots in the aerial space above the solution level on the growth of cucumber seedlings grown for 8 days in nutrient solution with the DO levels of 1 and 4 ppm and solution temperature of 25 °C.

| Treatment | | Fresh wt. of adventitious roots in the aerial space (g·plant ⁻¹) | Fresh wt. of whole plant (g·plant ⁻¹) | Fresh wt. of leaves (g·plant ⁻¹) | Fresh wt. of roots in nutrient sol. (g·plant ⁻¹) |
|-----------|------------------------|--|---|--|--|
| DO (ppm) | Adventitious roots in | | | | |
| 1 | Air space ^z | 0.69 ^c | 113.19 ^a | 35.59 ^a | 37.32 ^a |
| 1 | Solution ^z | 0.00 ^a | 118.91 ^{ab} | 36.94 ^a | 42.08 ^b |
| 4 | Air space | 0.30 ^b | 120.34 ^b | 37.94 ^a | 33.16 ^a |

^z Air space ; adventitious roots were developed in the aerial space. Solution ; all adventitious roots were submerged in nutrient solution.
^y Values in a column with the same letter are not significantly different at $p = 0.05$.

た。また、根の Fe 濃度はトマトと同様に 1, 2ppm で顕著に増大した。

3. 気根の存在が低溶存酸素濃度下でのキュウリの生育に及ぼす影響

前述の実験で、25℃・1ppm の培養液で生育したキュウリでは培養液面と植物を支持する蓋との間の気相中に不定根（気根）が多量に発生したが、33℃では気根の発生はわずかであった。この観察結果から、キュウリが 25℃では 1ppm でもほぼ正常に生長したことに気根の存在が関係していると予想された。そこで、1ppm でのキュウリの生長に対する気根の存在の有無の影響を調べた。気根の存在する区は、培養液面と蓋の間に約 3cm の隙間を設けることによって、気相中に露出している下胚軸から不定根が発生するようにした。気根の存在しない区は、液面と蓋の間に隙間を設けず、下胚軸から発生した不定根がすべて培養液中に

漬かるようにし、吸水による液面の低下を脱気した培養液で常時補った。対照区として DO 4ppm で気根が発生する区を設けた。液温は 25℃とし、その他は材料および方法を記載した条件と同じとした。

培養液面上に気相を設けた場合は、気根の発生量は 4ppm 区より 1ppm 区のほうが明らかに多かった。しかし、気根の存在しない 1ppm 区の 1 株当たり生体重は、気根の存在する 1ppm 区や対照区のそれとほぼ同じであり、気根の存在が低 DO でのキュウリの生育を促進することはなかった（第 4 表）。また、葉身含水率や培養液中根の TTC 還元活性にも気根の有無や DO による違いは認められなかった（データ省略）。

考 察

トマトは根域の酸素不足に敏感に反応し、水耕では根が 3～4ppm 以下の DO に長期間さらされると、生育や果実収量が著しく低下する（位田, 1956; 山崎ら,

1976; Zeroni ら, 1983; 橘, 1986). 幼植物を用いて行った本実験でもこれらの結果とほぼ同じ結果が得られたことから、トマトは、植物体の齡や液温に関係なく 2~3ppm 以下の DO で栄養生長や根の機能が障害を受けると考えられる。

キュウリは根の酸素消費量が多く (Gislerod・Kempton, 1983), このために、特に根系が大きくなっている生育中後期に液温が高いと、酸素不足の害を受けやすいとされている (板木, 1987). しかし、NFT では培養液の DO が 1~3ppm になっても、栄養生長や果実収量はあまり低下しない (Gislerod・Kempton, 1983). これは、NFT では多くの根が空气中に暴気しているためとも考えられるが、キュウリは湛液水耕でも低酸素下で比較的良く生長すること (位田ら, 1957; 但野ら, 1979) から、キュウリ自体の特性によっている可能性のほうが大きい。

一般に、根域の酸素不足に対する耐性の大きい植物は、低酸素や無酸素に感応して根に通気組織が良く発達する (有門, 1955; Jackson ら, 1978). トマトでは根域の酸素不足によって根に通気組織がある程度発達し (並木ら, 1974), 茎基部に空洞が生じる (景山, 1983) ことが知られているが、キュウリでは通気組織はあまり発達しない (位田, 1956; Yoshida・Eguchi, 1994). また、茎基部からの気根の発生も耐湿性に関与しているといわれている (Jackson, 1955) が、多湿下での気根の発生程度と耐湿性の間には明確な関係がないとする報告もある (久保田ら, 1993). 本実験では、栽培槽の蓋と液面の間に発生した気根の存在はキュウリの低酸素耐性にはほとんど関係していないことが示されたが、気相中の酸素分圧は大気のものよりかなり低かったと思われるので、この結果は大気中に露出した気根の意義を否定するものではない。

液温 25℃で生育したキュウリに限って 1ppm 区で根表面に亀裂が生じたが、このことが、キュウリが DO の低い培養液でも良く生長したことと関係がある可能性がある。根の通水抵抗は、根の表面から道管までの水吸収抵抗が道管内での通導抵抗よりかなり大きいことが知られている (長野ら, 1994). キュウリでは根表面の亀裂によって根の水吸収抵抗が小さくなり、その結果、水に溶存した酸素の根への侵入が容易になったのかもしれない。

キュウリは培養液の DO が低下しても大きな吸水障害を受けないこと (Veen, 1988; 吉田ら, 1996) に関して、吉田ら (1996) は、ガスで充満された茎葉の細

胞間隙を通して外気の空気が根に供給されること (Yoshida・Eguchi, 1994) をその理由として挙げている。しかし、筆者らは、茎葉を切除した根の本部出液速度が、トマトでは低酸素下で有意に低下するのに対して、キュウリではわずかに増大することを認めている (郭・橘, 未発表). このことから、地上部環境からの酸素の供給よりも上記のような根の表面の形態的变化の関与が大きいと推察される。

また、液温 25℃で生育したキュウリでは 1ppm で根の Fe 濃度が顕著に低下したことも興味深い現象である。Hendry・Brocklebank (1985) は、無酸素下で根の Fe 濃度が著しく増大する植物では根に脂質過酸化物が多量に蓄積することを見出し、無酸素によってスーパーオキシドラジカルやヒドロキシラジカルなどの有毒な活性酸素が根で多量に生成することを示唆している。25℃・1ppm の培養液で生育したキュウリでは、根の Fe 濃度が増大しなかったために、低酸素下でも活性酸素の生成が起こらず、そのために根の生長や機能の障害が起こらなかったのかもしれない。

キュウリでも液温 33℃では 1ppm で生育が明らかに阻害された。この原因としては、根の呼吸速度の増大によって根の表面近くの溶存酸素濃度が 1ppm 以下に低下していたことも考えられるが、根表面に亀裂が生じなかったことや、根の Fe 濃度の低下が起こらなかったことも関係しているかもしれない。現在、これらの点について研究を進めている。

栄養生長を溶存酸素によって調節する場合の DO としては、トマトでは 2ppm 前後を目安にすれば良いと思われる。大河内ら (1979) はトマトで、定植初期から低濃度の DO で栽培した場合には 1.3ppm でも根腐れが起こらず、2~3ppm の DO で草勢を抑えることが出来るとしている。本実験でも彼等とほぼ同じ結果が得られた。しかし、キュウリは根域の低 DO に対する感受性が低く、草勢を調節するためには、液温にもよるが、DO は 1ppm 以下に下げることがあろう。

本実験では培養液は常時流動状態にしたので、根面近くの培養液の DO は設定した DO とほぼ同じであったと考えられる。しかし、実際栽培の DFT では通気停止中には液流はほとんどないことが多いので、根表面の DO は DO センサ周辺よりかなり低い可能性がある。また、ベッドと蓋の間隙を通して大気中の酸素が培養液に溶解しやすい実際栽培の DFT では、DO は通気停止後徐々に低下すると考えられるが、DO が徐々に低下した場合と急速に低下した場合とでは低

DO に対する生育反応が異なる可能性もある。今後、これらの点を考慮して、栄養生長と生殖生長のバランスが問題になる生育ステージでの DO に対する生育反応と根や茎葉の生理的反応を明らかにする必要がある。

摘 要

栄養生長と生殖生長のバランスが崩れて過繁茂になりやすい果菜類の湛液水耕での生長調節を DO によって行うためには、一定レベルの低 DO に対する作物の生長および生理的反応を明らかにする必要がある。そこで、トマト 'ハウス桃太郎' とキュウリ 'シャープ I' の幼植物を、DO を 1, 2, 4, 8ppm に調節した湛液水耕 (液温は、トマトでは 22℃ と 30℃ とし、キュウリでは 25℃ と 33℃ とした) で 8 日間栽培し、生育と葉および根の無機成分濃度を調査した。その結果、トマトは、液温にかかわらず 2ppm 以下で生育が不良になり、葉身の含水量や無機成分濃度が低下した。キュウリでも液温が 33℃ の場合は 2ppm 以下で生育が抑制されたが、25℃ の場合は 1ppm でもほぼ正常に生長し、葉身含水率や無機成分濃度も影響を受けなかった。以上の結果から、湛液水耕で DO によって栄養生長を調節する場合、トマトでは 2ppm 前後を目安にすればよいと思われるが、キュウリでは 1ppm 以下に下げる必要があると判断される。

引用文献

有門博樹. 1955. 通気系の発達と耐湿性の関係. 第 4 報. 本田期における水稻の通気圧について. 日作紀. 23 : 285-286.

Gislerod, H. R. and R. J. Kempton. 1983. The oxygen content of flowing nutrient solutions used for cucumber and tomato culture. *Sci. Hort.* 20 : 23-33.

Hendry, G. A. F. and K. J. Brocklebank. 1985. Iron-induced oxygen radical metabolism in waterlogged plants. *New Phytol.* 101 : 199-206.

板木利隆. 1987. 施設園芸・装置と栽培技術. p. 386-476. 誠文堂新光社.

板木利隆. 佐々木皓二・宇田川雄二. 1996. 養液栽培の実用技術. p. 63-65. 農業電化協会.

位田藤久太郎. 1956. 蔬菜の根の生理に関する研究 (第 4 報). 土壌空気中の酸素濃度が果菜類の生育、養分吸収に及ぼす影響. 園学雑誌. 25 : 85-93.

位田藤久太郎・小川幸持・新井和夫. 1957. 蔬菜の根の生理に関する研究 (第 5 報). 水耕培地における通気が蔬菜類の生育並びに養分吸収に及ぼす影響について. 園学雑誌. 26 : 171-177.

Jackson, W. T. 1955. The role of adventitious roots in recovery of shoots following flooding of the origin-

al root systems. *Amer. J. Bot.* 42 : 816-819.

Jackson, M. B., K. Gales and D. J. Campbell. 1978. Effect of waterlogged soil conditions on the production of ethylene and on water relationships in tomato plants. *J. Exp. Bot.* 29 : 183-193.

景山詳弘. 1983. トマトの水耕密植低段栽培法と水耕トマトの形態的・生理的特徴. 京都大学学位論文.

久保田尚浩・李 相根・安井公一. 1993. ブドウ台木の生長と体内の生理的变化に及ぼす湛水処理の影響. 生環調. 31 : 231-236.

長野敏英・石田朋靖・森田茂紀. 1994. 植物体内の水分状態とその制御に関する研究(4)—種々の根の通水抵抗について—. 生環調. 31 : 147-153.

並木隆和・西 新也・小田雅行・高嶋四郎. 1974. 蔬菜水耕培地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. 京都府大学報. 26 : 37-43.

大河内信夫・榊田正治・浅平 端. 1979. トマトの水耕密植低段摘芯栽培における定植後の溶存酸素濃度が果実収量と品質に及ぼす影響. 生環調. 17 : 79-88.

Reid, D. M. and A. Crozier. 1969. The effects of flooding on the export of gibberellin from the root to the shoot. *Planta* 89 : 376-379.

但野利秋・切本清和・青山 功・田中 明. 1979. 耐湿性の作物間差—比較植物栄養に関する研究—土肥誌. 50 : 261-269.

橘 昌司. 1986. 養液栽培における環境要因と根の機能. 農及園. 61 (別冊) : 143-148.

高島友三. 1993. 養液栽培の普及の現状と今後の推進方向. ハイドロポニックス 6 : 36-43.

Veen, B. W. 1988. Influence of oxygen deficiency on growth and function of plant roots. *Plant and Soil* 111 : 259-266.

Wample, R. L. and D. M. Reid. 1979. The role of endogenous auxins and ethylene in the formation of adventitious roots and hypocotyl hypertrophy in flooded sunflower plants (*Helianthus annuus*). *Physiol. Plant.* 45 : 219-226.

山崎肯哉・鈴木芳夫・篠原 温. 1976. 主要野菜の養液栽培 (水耕) に関する研究, 特に培養液管理とみかけの吸収濃度 (n/w) について. 東教大農学部紀要. 22 : 53-100.

Yoshida, S. and H. Eguchi. 1994. Environmental analysis of aerial O₂ transport through leaves for root respiration in relation to water uptake in cucumber plants (*Cucumis sativus* L.) in O₂ deficient nutrient solution. *J. Exp. Bot.* 45 : 187-192.

吉田 敏・北野雅治・江口広美. 1996. 水耕における溶存 O₂ 濃度制御下のキュウリ植物の吸水. 生環調. 34 : 53-58.

Zeroni, M., J. Gale and J. Ben-Asher. 1983. Root aeration in a deep hydroponic system and its effect on growth and yield of tomato. *Sci. Hort.* 19 : 213-220.