

個体群葉面積を指標にした肥料施用量の日調節 による培養液に N・P・K の残留が無いトマト養液栽培

細井 徳夫・細野 達夫*

(平成 16 年 12 月 15 日受理)

Liquid Cultivation of Tomato Plants by Daily Control of Fertilizer Application in which There Are no N/P/K Residues in the Culture Solution and the Area of the Leaf Groups Is Used as an Indicator

Norio HOSOI and Tatuho HOSONO

Synopsis

When a culture solution containing less than the threshold values of the elements (Mg/Ca/S) is used, normal growth of tomato plants is not attainable. For these elements, Mg/Ca/S Fertilizer C prepared according to the contents of the fruit should be used, with EC value at the planting time being maintained at 0.7 - 1.0 to attain the lowest threshold value of each element. Tomato plants were planted in a culture solution as above, N/P/K/Mg/S Fertilizer A prepared according to the contents of the fruit was used, and quantitative control was conducted by daily regulation of the amount of fertilizer, with the area of the leaf groups of individual plants as an indicator. The concentration of the culture solution (EC) was checked by EC meter and regulated by Ca Fertilizer B, with the sugar degree of the fruit as an indicator. Utilizing the method above, basic technology for liquid-circulating cultivation with good quality and high productivity was established, in which a proper relation between photosynthesis and the area of leaf groups in individual tomato plants was maintained and there were no N/P/K residues in the culture solution after the harvesting time.

Key Words: tomato, optimum LAI control, daily quantitative application, no residual N・P・K in culture solution

目 次		試験 c マグネシウムに関するトマトの吸収特性および成育特性 90
		試験 d 硫黄に関するトマトの吸収特性および成育特性 91
I 緒 言	88	試験 e K 濃度が著しく低い培養液における Ca と Mg の拮抗作用の検証 91
II 材料および方法	89	2 培養液に肥料要素 N・P・K の残留が無いトマト養液栽培の開発 91
1 主要肥料要素に関するトマトの吸収特性および成育特性	89	試験 a 栽培終了時の培養液に N・P・K の残留がないトマト循環型養液栽培法の開発 91
試験 a リン酸, カリに関するトマトの吸収特性および成育特性	89	
試験 b カルシウムに関するトマトの吸収特性および成育特性	89	

試験 b 培養液に N・P・K 残留のない循環型 長段トマト養液栽培の開発	92
III 結 果	93
1 主要肥料要素に関するトマトの吸収特性およ び生育特性	93
試験 a リン酸, カリに関するトマトの吸収特 性および生育特性	93
試験 b カルシウムに関するトマトの吸収特性 および生育特性	94
試験 c マグネシウムに関するトマトの吸収特 性および生育特性	96
試験 d 硫黄に関するトマトの吸収特性およ び生育特性	98
試験 e K 濃度が著しく低い培養液における Ca と Mg の拮抗作用の検証	99
2 培養液に肥料要素 N・P・K の残留が無いト マト養液栽培の開発	101
試験 a 栽培終了時の培養液に N・P・K の残 留がないトマト栽培法の開発	101
試験 b 培養液に N・P・K 残留のない循環型 長段トマト養液栽培の開発	102
IV 考 察	107
1 主要肥料要素に関するトマトの吸収特性およ び生育特性	107
2 培養液に肥料要素 N・P・K の残留が無いト マト循環型養液栽培法の開発	109
a 栽培終了時の培養液に N・P・K の残留が ないトマト循環型養液栽培法の開発	109
b 培養液に N・P・K 残留のない循環型長段 トマト養液栽培の開発	110
V 摘 要	115
引用文献	116
Summary	117

I 緒 言

トマトの養液栽培は、土壌消毒が不要であり、土耕栽培に比較し水ストレスが減少し、増収が期待できる。トマト養液栽培では、ロックウール栽培が主流で窒素 (N)、リン酸 (P)、カリ (K) それぞれ 300ppm、30ppm、300ppm 濃度の培養液を年間 900t/10a 用い、廃液量と施用培養液量の比率は 1:3 を基準に培養液管理が行われている。したがって、10a 当たり年間の廃液量 300t

に伴い N, P, K それぞれ 90kg, 9kg, 90kg を施設外へ排出しトマトを栽培している。肥料成分の施設外への流出は、河川水や湖水および内海水の富栄養化や地下水汚染など深刻な環境問題を起こしている。

この課題を克服するため、培養液の循環利用方式を導入し、施設からの培養液排出の削減を図る方法 (岩本ら, 1997) や培養液を一段栽培終了時のトマトに全て吸収させ使い切る方法 (岡野ら, 1999) など色々な手法が開発されている。しかし、培養液循環利用方式においても、作物の吸収や pH 調節に伴う培養液の塩基バランスの崩れを矯正するため、寒候期 (11~4 月) 3 ヶ月に 1 回、暖候期 (5~10 月) は 2 ヶ月に 1 回、培養液 (20t/10a) の半量を年間 4 回交換し (40t/10a)、栽培終了時にも廃液 (20t/10a) を排出する。また、培養液を全量吸収、使い切り方式は (岡野ら, 1999)、樹勢が強く栽培期間の短いトマト栽培は適するが、長段取りトマトの栽培システムに応用するにはさらに工夫を要する。

著者は窒素少量分施肥によるトマト個体群の葉面積制御法を開発した (細井, 1997; 2000)。すなわち、毎日施用する窒素を量的制御する窒素少量分施肥は、トマト生育の早さを変えずに個体群葉面積を大きく可変できる。この方法で、トマト個体群の葉面積を光合成に好適な葉面積指数 (LAI) に維持し栽培すると、培養液中には毎日 20 時間以上窒素残留が無く、栽培終了時の廃液にも残留窒素が無い (細井, 2001b; 2003)。しかも、この栽培法は、目標収量を可能にする果実数 (果実数 30 万個/10a) を確保し、LAI: 4、樹高 3m 個体群を維持すると、年間収量 30~40t も可能な施設外に窒素排出のない環境に優しい循環型養液栽培である (細井, 2003)。

そこで、窒素少量分施肥を他の主要肥料要素 (N, P, K, Ca, Mg, S) に拡張し、トマト吸収量に相当する各主要肥料要素を毎日調節・施用する量的制御法を採用すると、培養液に各成分の残留が無くともトマトの生育の早さや収量水準を変えずに栽培可能か否か検討した。また、培養液中の濃度が閾値 (低濃度) 以下では正常な発生育が不可能な要素は、その低濃度限界を解析した。

一方、トマト生育に必要な主要肥料要素量を生体が含有する主要肥料要素量と仮定すると、葉面積を一定に制御したトマト個体群の光合成産物および吸収した主要肥料要素の果実と茎葉部に対する分配比は、収穫期以後ほぼ一定であり、吸収主要肥料要素の 85% 以上は果実に分配される (細井, 2003)。さらに、果実に含まれる主要肥料要素の分析値は、品種や種子の有無により多少変わるもの、周年安定している (香川, 1996)。すなわち、

トマトは、収穫期以後主要肥料要素の吸収比率をほぼ一定に維持する。

このトマトの育成特性および主要肥料要素に関する吸収特性の解析結果を活用し、光合成に好適な個体群の葉面積水準を指標に、施用量を調節する主要肥料要素の量的管理法を養液栽培に導入し、収穫期以後の培養液に N, P および K 残留のない良質多収・循環型養液栽培法の基本技術を構築したので報告する。

本研究は野菜・茶業試験場施設生産部環境制御研究室、野菜茶業研究所果菜研究部生育特性研究室にて行われ、培養液の分析には白神栄治氏（カネコ種苗開発部）、河合仁主任研究員（愛知県豊橋農業技術センター）、中野明正博士（農林水産技術会議事務局）、特種肥料の調整には宮浦紀史氏（大塚化学鳴門研究所）、トマトの栽培管理に果菜研究部業務科員の太田栄一技官、河野真人技官、棚山敏夫技官、石川一成技官、池田久夫技官、新美五世男技官、岩切浩文技官の御援助をいただいた。ここに感謝の意を表します。

II 材料および方法

1 主要肥料要素に関するトマトの吸収特性および育成特性

試験 a リン酸、カリに関するトマトの吸収特性および育成特性

1) N と P の日分肥施用とトマト育成

(1) 品種は‘ハウス桃太郎’を用い、1998年4月20日バーミキュライト床に播種し、10日後発泡スチロール水耕床に移植して窒素少量分施肥を用い育苗した。すなわち、窒素（以後 N とする）以外の肥料要素は、培養液の Ca 濃度を 71.5ppm、大塚 1 号改（大塚 1 号から N を除去したもの、細井、2000）を用い移植時の培養液の EC を $0.7\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ に調節して施用した。N は $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ （大塚 2 号）を用い $3\text{mg}/\text{個体}/\text{日}$ を施用し、第 1 花房が開花するまで養液栽培にて育苗した。

第 1 花房開花苗 2 個体を、ポリオレフィン被覆ハウス（POハウスとする）内に設置した下記の水耕液 16ℓ 入りの 1/2,000a ワグネルポットに 6 月 2 日定植し、各ポットとも泡口を用い通気した。窒素少量分施肥（細井、2000）を用い、窒素以外の肥料要素は、上記と同様に施用した。N は $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ を用い定植時 $3\text{mg}/\text{個体}/\text{日}$ から 7 日毎に 3mg 増量して 6 月 20 日、第 3 花房が開花するまでに $10\text{mg}/\text{個体}/\text{日}$ とした。

6 月 20 日以後 N 施用量は $\text{N}:10\text{mg}/\text{個体}/\text{日}$ に定め、すべてのポットに毎日供与した。

(2) 吸収 N とリン酸（以後 P とする）の過半が果実に分配され、茎葉部と果実への乾物分配率がほぼ定常状態となり、その後一定比率で推移する第 1 果房が成熟期に至った 7 月 25 日以後、個体当たり $\text{P}:1\text{mg}/\text{日}$ を基準に、 NaH_2PO_4 を用い $\text{P}:0.125\text{mg}, 0.25\text{mg}, 0.5\text{mg}, 1\text{mg}, 2\text{mg}, 4\text{mg}/\text{個体}/\text{日}$ と定め各 3 ポット 6 個体に施用し、トマト育成がよく培養液に N と P の残留が少ない P 施用量を検討した。この試験は、(3) に示した必須要素を含む培養液中の半量交換時に、ポット当たり KCl と K_2SO_4 をそれぞれ 256mg, 288mg 付加した。

(3) N, P および K 以外の必須要素は、培養液 (8ℓ) 中に $\text{CaCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($\text{CaCl}_2:1,216\text{mg}$), $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ($\text{MgSO}_4:1,360\text{mg}$), $\text{MnSO}_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ($\text{MnSO}_4:32\text{mg}$), $\text{FeC}_6\text{H}_5\text{O}_7\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ($\text{FeC}_6\text{H}_5\text{O}_7:132.8\text{mg}$) を混入し、週 1 回ポットの半量 (8ℓ) の培養液を交換施用した。

2) N と K の日分肥施用とトマト育成

(1) 品種は‘ハウス桃太郎’を用い、1998年4月20日バーミキュライト床に播種し、6月20日第3花房が開花するまで N と P の日分肥施用試験と同様に、窒素少量分施肥を用い養液栽培にて育苗した。

(2) 6 月 20 日以後 N は $\text{N}:10\text{mg}/\text{個体}/\text{日}$ とし、すべてのポットに毎日施用した。収穫期以後の吸収 N とカリウム（以後 K とする）の過半は果実に分配され、果実の N と K はともに果実乾物重 (DW) の 5% 程度である（香川、1996）ことを基礎に、トマト育成がよく培養液に N と K の残留が少ない K 施用量を検討した。すなわち、茎葉部と果実への乾物分配率がほぼ定常状態となる第 1 果房が成熟期に至った 7 月 25 日以後、個体当たり $\text{K}:6\text{mg}/\text{日}$ を基準に、 KCl と K_2SO_4 を用い個体当たり $\text{K}:0.75\text{mg}, 1.5\text{mg}, 3\text{mg}, 6\text{mg}, 12\text{mg}, 24\text{mg}/\text{日}$ の 6 水準と定め各 3 ポット 6 個体に施用した。

この試験は、下記に示した必須要素を含む培養液の半量交換時に、ポット当たり NaH_2PO_4 を 544mg を付加した。

(3) N, P および K 以外の必須要素は、前項と等しい培養液を、週 1 回ポットの半量 (8ℓ) 交換施用した。

試験 b カルシウムに関するトマトの吸収特性および育成特性

1) N・P・K とカルシウムの日分肥施用とトマト育成

(1) トマト品種‘サターン’を 1999 年 1 月 20 日バーミキュライト床へ播種し、3 葉期に育苗用水耕床に移植し、試験 a と同様に育苗した。

第1花房が開花期に達した3月15日、POハウス内に設置した下記の水耕液16ℓ入りの1/2,000aワグネルポットにトマト苗2個体定植した。この試験個体を試験aと同様に育成した。

(2) 収穫開始期に至った5月15日から試験終了まで個体当たり $N(NaNO_3)$:10mg, $P(NaH_2PO_4)$:1mg, $K(KCl$ と $K_2SO_4)$:10mgを毎日施用した。その他の必須要素は、試験aと同様に調合した培養液を、週1回ポット半量(8ℓ)交換施用した。

(3) 収穫期以後の吸収Nとカルシウム(以後Caとする)の過半は果実に分配され、果実のNとCaは果実乾物重(DW)の5%と0.12%である(香川, 1996)ことから、トマト成育がよく培養液に残留が少ないCa施用量を検討した。すなわち、7月1日から個体当たりCa:0.1mg, 0.2mg, 0.4mg, 0.8mg, 1.6mg, 3.2mgの6段階に変えて毎日施用する処理区を設定した。その他の必須要素は、培養液8ℓの中に $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ($MgSO_4$:1,360mg), $MnSO_4 \cdot 4H_2O$ ($MnSO_4$:32mg), $FeC_6H_5O_7 \cdot 5H_2O$ ($FeC_6H_5O_7$:132.8mg)を混入し、週1回ポット半量(8ℓ)の培養液を交換施用した。

2) 培養液のCa濃度とトマト成育

(1) トマト品種‘サターン’を2000年4月30日バーミキュライト床へ播種し、これまでと同様第1花房開花期の6月中旬まで育苗した。

(2) 6月12日第1花房開花期から $CaCl_2$ を用い750ℓの大型水槽の培養液Ca濃度を71.5ppm, Caを含ませ大塚1号(改)を用いて培養液のECを $0.7dS \cdot m^{-1}$ を維持し窒素以外の必須肥料要素を施用した。この大型水槽にトマト2個体を定植し、 $Ca(NO_3)_2$ を用い個体当たりNを10mg毎日施用し供試個体を育成した。

(3) 第1果房収穫期の8月5日から $CaCl_2$ を用い、750ℓ水槽の培養液のCa濃度を0.75ppm, 1.25ppm, 2.5ppm, 5.0ppm, 10ppm, 20ppmの6水準に設定し、他の肥料要素は大塚1号(改)を用い培養液ECを $0.7dS \cdot m^{-1}$ に調節することにより施用した。

各750ℓ水槽の培養液Ca濃度を可能なかぎり一定に維持するため、トマトのN:Caの吸収比率である50:1肥料を $NaNO_3$ と $Ca(NO_3)_2$ を用いて調合し、N:10mgの施用に伴いCa:0.2mgを毎日施用し、pHをHClとNaOHを用い5~6に調節してトマトを栽培した。

試験c マグネシウムに関するトマトの吸収特性および成育特性

1) N・P・Kとマグネシウムの日分肥施用とトマト成育

(1) トマト品種‘サターン’を1999年1月20日バーミキュライト床へ播種し、3葉期に育苗用水耕床に移植し、試験a, bと同様に育苗した。

第1花房が開花期に達した3月15日、POハウス内に設置した1/2,000aワグネルポットにトマト苗2個体定植し、第1果房が収穫期に至る5月中旬まで試験個体を試験a, bと同様に栽培した。

(2) 収穫期以後の吸収Nとマグネシウム(以後Mgとする)の過半は果実に分配され、果実のNとMgは果実乾物重(DW)の5%と0.14%である(香川, 1996)ことから、トマト成育がよく培養液に残留が少ないMg施用量を検討した。すなわち、7月1日から個体当たりN:10mg, P:1mg, K:10mgを毎日施用するとともに、個体当たり毎日施用するMg量を0.15mg, 0.3mg, 0.6mg, 1.2mg, 2.4mg, 4.8mgの6段階に異なるMg処理区を設定した。その他の必須要素は、培養液8ℓの中に $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ ($CaCl_2$:1216mg), $MnSO_4 \cdot 4H_2O$ ($MnSO_4$:32mg), $FeC_6H_5O_7 \cdot 5H_2O$ ($FeC_6H_5O_7$:132.8mg)を混入し、週1回ポット半量(8ℓ)の培養液を交換施用した。

2) 培養液のMg濃度とトマト成育

(1) トマト品種‘サターン’を2002年5月10日バーミキュライト床へ播種し、3葉期に育苗用の水耕床に移植し試験a, bと同様に供試個体を第1花房開花期の6月中旬まで育成した。

6月10日第1花房開花期から、試験個体を750ℓの大型水槽に2個体定植し、試験b, 2)と同様に7月下旬まで栽培した。

(2) 7月28日の第1果房収穫期から $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ を用い750ℓ水槽の培養液のMg濃度を1.87ppm, 3.75ppm, 7.5ppm, 15.0ppm, 30.0ppm, 60.0ppmの6水準に設定した。その他の肥料要素の培養液1ℓ中の含有量はP:18mg($NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$), K:32mg(KCl, K_2SO_4), Ca:56mg($CaCl_2 \cdot 2H_2O$), Mn:1.0mg($MnSO_4 \cdot 4H_2O$), Fe:2.8mg($FeC_6H_5O_7 \cdot 5H_2O$)と設定した。

(3) 各750ℓ水槽の培養液Mg濃度を可能なかぎり一定に維持するため、トマトのNとMgの吸収比率である30:1に $NaNO_3$ と $Mg(NO_3)_2$ の調合肥料を用い、Nを10mg, Mgを0.3mg毎日施用し、pHをHClとNaOHを用い5~6に調節してトマトを栽培した。

試験 d 硫黄に関するトマトの吸収特性および成育特性**1) N と硫黄の日分肥施用とトマト成育**

(1) トマト品種‘サターン’を2000年2月4日パーミキュライト床へ播種し、3葉期に育苗用水耕床に移植し、試験 a, b, c と同様に育苗した。

4月2日に、POハウスの1/2,000aワグネルポットに第1花房開花期のトマト苗2個体を定植し、これまで同様に収穫開始期まで供試個体を育成した。

(2) 第1果房収穫期の6月5日からCaCl₂・6H₂OとMgCl₂・6H₂Oを用いCaとMgの比率が1:1の養液を用いて培養液ECを0.7に調節した。収穫期後の吸収NとSの過半は果実に分配され、果実のNと硫黄(以後Sとする)は果実乾物重(DW)の5%と0.14%である(中野ら, 2001)ことから、トマト成育がよく培養液に残留が少ないS施用量を検討した。すなわち、S含有の無いOKF-1(養液土耕用肥料, 大塚化学)を用い、N:9mg, P:4.8mg, K:10.2mgを毎日施用した。さらに、MgSO₄・7H₂Oを用いSの施用量を0mg, 0.34mg, 0.7mg, 2.1mg, 6.3mg, 18.9mgの6段階に変えて、それぞれ3ポット6個体に毎日施用した。

肥料要素の培養液への残留や培養液のEC, pHの変動を防ぐため、CaとMg比率が1:1でEC:0.7培養液を作りポットの培養液の半量(8ℓ)を2回/月交換した。

2) 培養液のSの濃度とトマト成育

(1) 2003年4月1日パーミキュライト床に‘ルネッサンス’を播種し、10日後発泡スチロール水耕床に移植して第1花房が開花するまで窒素少量分施肥法を用い、供試個体を6月5日までこれまでと同様に育苗した。

(2) 6月5日から750ℓ大型水槽培養液のS濃度を1.5ppm, 3.0ppm, 6.0ppm, 12.0ppm, 24.0ppm, 48.0ppmの6水準にMgSO₄・7H₂Oを用い設定した。CaCl₂・6H₂OとMgCl₂・6H₂Oを用いCaとMgの比率が1:1の養液を用いECを0.7に調節した大型水槽に第1花房開花期のトマト苗2個体それぞれ定植した。S含有の無いOKF-1(大塚化学)を用い、N:9mg, P:4.8mg, K:10.2mg毎日施用し栽培した。

試験 e K濃度が著しく低い培養液におけるCaとMgの拮抗作用の検証

(1) 2003年3月20日パーミキュライト床に品種‘ルネッサンス’を播種し、3葉期まで養成した後、育苗用の循環型水耕栽培容器(1m×2m×0.6m)に4月1日移植した。窒素少量分施肥法を用い、Nを個体当たり

2~3mg毎日施用した。その他の要素は、Ca:71.5ppmおよび大塚1号(改)(細井, 2000)を用い、培養液のECを0.7に維持することにより施用した。pHを5に調整し。早期の花芽誘導と繁茂の防止を目的に自然光下で窒素がやや不足ぎみの条件で育苗した。

(2) 第1花房が開花期に達した4月30日、POハウスの1/2,000aワグネルポットにトマト苗2個体を定植した。ポットの培養液(16ℓ)は、CaCl₂・2H₂OとMgSO₄・7H₂Oを用いCa:320mg, Mg:320mg, またMnSO₄・4H₂Oを用いMn:16mg, FeC₆H₅O₇・5H₂Oを用いFe:45mg調合した。NH₄NO₃, (NH₄)₂HP₂O₄, KNO₃およびK₂SO₄を用いNとSの比率を20:1に維持しN:P:Kを10:1:10に調合した肥料を用い、個体当たりN:30mg, P:3mg, K:30mgを毎日施用した。NとKの7日間施用量の1/25量のCa(CaCl₂・2H₂O)およびMg(MgCl₂・6H₂O)を毎週施用し、トマトの吸収による培養液中のCaとMg濃度を試験終了まで維持した。

(3) 6月1日からMgSO₄・7H₂Oを用いMg:20ppm(低濃度限界区)とMg:40ppm(高濃度限界区)の2区、同時にCaCl₂・2H₂Oを用い、培養液のECを1, 2, 4, 6, 8, 10に変更し、各区3ポット、トマト6個体を供試し、K濃度が著しく低い養液中においてトマトのMgの低濃度限界あるいは高濃度限界がCa濃度により変化するか否かを検討した。なお、ECが4以上の区では週当たりのEC上昇を2程度に留めた。8月1日から個体当たりN:60mg, P:6mg, K:60mgを毎日施用した。

2 培養液に肥料要素N・P・Kの残留が無いトマト養液栽培の開発**試験 a 栽培終了時の培養液にN・P・Kの残留が無いトマト循環型養液栽培法の開発**

試験1. a, b, cの知見をもとに、栽培終了時の培養液にN, PおよびKの残留がなく窒素少量分施肥法と同等の収量維持が可能な閉鎖型トマト養液栽培法を検討した。

(1) 2002年2月15日パーミキュライト床に品種‘ラクナファスト’を播種し、3葉期まで養成した後、育苗用の循環型水耕栽培容器(1m×2m×0.6m)に移植した。育苗には、Ca:71.5ppmおよび大塚1号(改)を用い、培養液のECを0.7, pHをHClとNaOHを用い5に調整した。NはCa(NO₃)₂を用い、Nを個体当たり2~3mg毎日施用し、早期の花芽誘導と繁茂の防止を目的に自然光下でNがやや不足ぎみの条件で育苗した。

2) 第1花房開花期の苗を、4月15日、9m×22mの温室に、幅0.60m×長さ20.5mの湛液式循環水耕装置(せせらぎ式養液栽培装置)6台の中で西側から順に1号栽培槽、2番目の2号槽、3番目の3号槽、4号槽、5号槽に各124個体、最も東側の6号槽に62個体定植した。1号槽と6号槽は、窒素少量分施肥法を用い、施設の構造に合わせて樹高2.5m、LAI:4の個体群を目標に栽培し、既存の結果(細井, 2001a)との比較および対照区とした。窒素少量分施肥法を用い2~5号槽は樹高3m、LAI:4の個体群を目標に栽培した。2月15日から2~5号槽はNとCaを除く主要肥料要素の施用を停止した。なお、4号槽個体群にP欠乏症状が認められたので2月25日から主要肥料要素(大塚1号改)の施用を開始した。

3) 2月28日、1~6号槽の主要肥料要素について培養液中の残留量を確認するためそれぞれの培養液を分析した。その培養液の分析値を基礎に、分析時の培養液量を試験前後の計測値を参考に1t(培養槽600ℓ、栽培床の養液残留量400ℓ、個体当たり8.06ℓ)と仮定し、2、4号槽の培養液中のN、PおよびK量を推定した。

4) 試験1.a、1.bおよび1.cからトマト個体群のN:P:K吸収比率を10:1:10であると推定し、個体当たりのN、PおよびKの3月中の吸収量を2号槽はそれぞれ1,500mg、150mg、1,500mg、4号槽は1,600mg、160mg、1,600mgと仮定し、この吸収量から培養液中に残存するN、PおよびK量を減算して3月中に施用するN、PおよびK量とした。

5) 2、4号槽に3月中のN施用量の1/30量を3月1日から機器にて毎日施用すると共に3月中に施用するPとK量を3月3日、10日、17日、24日の4回に分けて施用した。1号槽は窒素少量分施肥法を継続した。

6) トマト個体群のN:P:K吸収比率を10:1:10であると推定し、個体当たりのN、PおよびKの3月中の3、5号槽の吸収量を1,000mg、100mg、1,000mgと仮定し、この吸収量から培養液中に残存するN、PおよびK量を減算して3月中に施用するN、PおよびK量とした。すなわち、3、5号槽に2月28日の培養液分析値を反映した3月中のN、PおよびK施用量の1/4量(3、5号槽N:30、P:6、K:30mg/個体/日)を3月3日から9日まで毎日施用した。2月28日と3月7日培養液の分析値から、この期間にトマトが吸収したN、PおよびK量と培養液中のN、PおよびK量を反映し計算された3月中のN、PおよびK施用量の1/4量(3号槽N:25mg、P:6mg、K:40mg/個体/日、5号槽N:25mg、P:5mg、K:40mg/個体/日)を

10日から16日まで毎日施用した。3月14日培養液の分析値を反映した3月中のN、PおよびK施用量の1/4量(3号槽N:30mg、P:4mg、K:45mg/個体/日、5号槽N:30mg、P:4mg、K:45mg/個体/日)を17日から23日まで毎日施用した。3月20日培養液の分析値を反映した3月中のN、PおよびK施用量の1/4量(3号槽N:20mg、P:4mg、K:25mg/個体/日、5号槽N:30mg、P:4mg、K:40mg/個体/日)を24日から31日まで毎日施用した。NはCa(NO₃)₂、KはKClとK₂SO₄、PはNaH₂PO₄を用いた。

試験b 培養液にN・P・K残留のない循環型長段トマト養液栽培の開発

1) 2003年3月20日バーミキュライト床に品種‘ルネッサンス’を播種し、3葉期まで養成した後、育苗用の循環型水耕栽培容器(1m×2m×0.6m)に4月1日移植した。育苗は、前項と同様の条件で行った。

2) 4月15日、9m×22mの温室に、幅0.60m×長さ20.5mの湛液式循環水耕装置(せせらぎ式養液栽培装置)6台の中で西側から順に1号栽培槽、2号槽、3号槽、4号槽、5号槽、1号槽から5号槽に各124個体、最も東側の6号槽に62個体定植した。1号槽と6号槽は、施設の構造に合わせて樹高2.5m、LAI:3の個体群を目標に栽培し、既存の結果(細井, 2001a)との比較および2~5号槽の樹高3m、LAI:3の個体群の対照区とした。

3) 栽培槽1と6の培養液は、Ca:71.5ppmと大塚1号(改)を用いEC:0.7に調整した。その後、機器を用い移植時EC:0.7から6月15日に1.0、収穫開始時には1.2、10月末に1.5へ逐次上げて管理した。高さ3mトマト個体群の葉面積指数(LAI):3を目標にCa(NO₃)₂養液を用い、N施用量を定量ポンプの稼働時間を変える方法で制御し、毎日施用した。

4) 2~5号槽は4月15日の定植時に、CaCl₂・2H₂OとMgSO₄・7H₂Oを用い、CaとMgを1:1の比率で調整した培養原液C(Table 27)を大塚1号(改)の代替として用い、Ca、MgおよびSの低濃度限界条件を満たすためEC:0.7に上げて、このEC値を5月15日まで機器を用い維持した。NH₄NO₃、(NH₄)₂HP₂O₅、KNO₃を用い、N:P:Kを10:1:10に調整したN、PおよびK液肥(以後NPK液肥とする)を、Ca(NO₃)₂養液の代替として用い、高さ3mトマト個体群の葉面積指数(LAI):3を目標にNPK液肥の施用量を調節し5月15日まで機器により毎日施用した。

5) 5月15日からNH₄NO₃、(NH₄)₂HP₂O₅、KNO₃お

Table 1. Yield in tomato cultivation in which 10mgN/plant of nitrogen was applied and P was applied at 6 levels every day.

Amount of P (mg/plant/day)	Monthly Yield (kg/6 plants)				Mean	Sig. ¹⁾ at 5 % level	Total	Weight of each fruit (g)	Number of fruits	Num. ²⁾ of har. clusters
	7	8	9	10						
0.125	1.41	1.90	1.06	0.41	1.19	0.25, 0.5, 1, 2, 4	4.78	56.9	75	10.1
0.250	1.48	2.12	1.39	0.53	1.39	0.125, 1.0, 2.0, 4.0	5.54	57.1	86	10.2
0.500	1.42	2.08	1.64	0.66	1.44	0.125	5.78	59.5	99	10.2
1.000	1.45	2.27	1.73	0.68	1.58	0.125, 0.25	6.33	60.2	105	10.4
2.000	1.50	2.51	1.67	0.83	1.61	0.125, 0.25	6.42	59.8	109	10.5
4.000	1.46	2.34	1.75	0.79	1.58	0.125, 0.25	6.32	62.6	101	10.4
Mean	1.45	2.20	1.54	0.65	1.47		5.89	59.3	95.8	10.2

1) Test of significance at 5% level (Mean yield in which P was applied at 6 levels).

2) Number of harvested clusters.

よび K_2SO_4 を用い N と S の比率を 20 : 1 に維持しつつ N : P : K を 10 : 1 : 10 に調整した N, P, K および S 液肥を使用し, 高さ 3m トマト個体群の葉面積指数 (LAI) : 3 を目標に N, P, K および S 液肥の施用量を, 定量ポンプの稼働時間を変えて調節し, 毎日施用した. 5 月 15 日から 10 月末まで, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ と $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ を用い Ca : Mg が 1 : 1 の調整液肥を用い, この液肥で収穫開始時までに EC を 1.2 へ上げ, 10 月末までに 1.3~1.5 へ逐次あげて対応した.

6) 第 5 果房収穫期の 8 月 1 日から NH_4NO_3 あるいは $NaNO_3$, $(NH_4)_2NP_2O_5$, KNO_3 および K_2SO_4 を用い N と S の比率を 20 : 1 に維持しつつ, 2 号槽は N : P : K を 10 : 1 : 10 で継続し, 3 号槽は 10 : 1 : 10 から 10 : 1.1 : 11, 4 号槽は 10 : 1.2 : 12, 5 号槽は 10 : 1.3 : 13 に変更した. このトマト個体群の葉面積指数 (LAI) を 3 に制御するため, N, P, K および S 液肥量を調節し機器により毎日施用した.

7) 10 月の培養液分析結果を反映し, 11 月から栽培槽 3, 4, 5 の N : P : K 比率を NH_4NO_3 , $(NH_4)_2HP_2O_5$, KNO_3 用いて 10 : 1.2 : 11 に変え, 1. 試験 e の結果を反映し, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ を用い S と Mg を N のそれぞれ 1/17, 1/22 含有する肥料 A (Table 27) を用いる量的施用に切り替え, 個体群の葉面積指数 (LAI) を 3 に制御するため, 肥料 A 液 (N, P, K, S および Mg 液肥) 量を調節し, 機器により毎日施用した.

11 月からの 2~5 号栽培槽の EC 制御は, $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ (肥料 B, Table 27) を用いて機器により管理した.

8) 培養槽 1 と 6 の培養液の EC は, 大塚 1 号改を用い移植時 0.7, 5 月 15 日に 1.0, 収穫開始時に 1.2, 10 月末に EC : 1.5 へ逐次上げ, 11 月以後 EC : 1.7 にて機器により管理した.

9) 栽培槽 1~6 の培養液 pH を $Ca(OH)_2$ と H_2SO_4 を用い, 1 日一回培養液の pH を移植時 4.5~5, 収穫開始時 5~5.5, その後は 5~6 に調整維持した.

III 結 果

1 主要肥料要素に関するトマトの吸収特性および成育特性

試験 a リン酸, カリに関するトマトの吸収特性および成育特性

1) N と P の日分肥施用とトマト成育

個体当たり窒素(N) : 10mg および 6 水準のリン(P) を毎日施用し 10 月 15 日まで栽培した各区 6 個体の月別収量, 総収量, 一果重, 果実数, 収穫果房数を Table 1 に示した. 個体当たり毎日 P : 1mg 以上施用した処理区間の月別収量, 果実数, 一果重, 総収量および収穫果房数に差異は無かった. しかし, P : 0.5mg 以下の処理区では, 8 月以後の月別収量, 果実数, 一果重および総収量はともに毎日の P 施用量が少ないほど減少した. 一方, 生育や成熟速度を示す収穫果房数の P 施用量の差異による変動幅は小さかった.

Table 2. Concentration (ppm) of P and N in hydroponic culture solution.

Amount of P ¹⁾	0.125	0.25	0.5	1	2	4
P	ND ²⁾	ND	ND	Tr	4.4	7.1
N	3.6	1.6	0.5	Tr	ND	ND

1) The amount of applied Phosphorus (mg) per plant per day

2) The analysis of the culture solution just before half of solution was renewed and before daily application of P and N (10mg). ND: Not detected. Tr: < 0.1ppm.

Table 3. Yield in tomato cultivation in which 10 mgN/plant was applied and K was applied at 6 levels every day.

Amount of K (mg/plant/day)	Monthly Yield (kg/6 plants)				Mean	Sig. ¹⁾ at 5 % level	Total	Weight of each fruit (g)	Number of fruits	Num. ²⁾ of har. clusters
	7	8	9	10						
0.75	1.38	1.90	1.56	0.66	1.37	3.0, 6.0, 12, 24	5.50	50.5	109	10.4
1.50	1.44	2.11	1.60	0.69	1.46	6.0, 12, 24	5.84	53.1	110	10.4
3.00	1.47	2.37	1.72	0.71	1.58	0.75	6.27	57.5	109	10.5
6.00	1.43	2.64	1.91	0.85	1.70	0.75, 1.5	6.83	58.4	117	10.6
12.00	1.48	2.60	2.05	0.90	1.76	0.75, 1.5	7.03	60.6	116	10.8
24.00	1.45	2.63	2.06	0.87	1.75	0.75, 1.5	7.01	58.4	120	10.8
Mean	1.44	2.37	1.81	0.78	1.60		6.41	56.4	113	10.6

1) Test of significance at 5 % level (Mean yield in which K was applied at 6 levels).

2) Number of harvested clusters.

8月12日PとN施用前の培養液についてPとNの分析値をTable 2に示した。Pが1mgより少量施用された処理区では培養液にPの残留は無かったが、Pの施用量が少ない処理区ほど培養液中のN残留量が多かった。一方、Pを2mg以上施用した処理区では、培養液中にPの残留を認めたが、Nの残留は無かった。N:Pが10:1であるP:1mgよりPが少ない場合は、P施用量が収量の制限要因であり、P:1mg以上ではN施用量が制限要因で、N:10mgに対応する収量を得た。

2) NとKの日分肥施用とトマト成育

個体当たりN:10mgおよび6水準のKを毎日施用し、10月15日まで栽培した各区6個体の月別収量、総収量、一果重、果実数および収穫果房数をTable 3に示した。個体当たり毎日K:6mg以上施用した処理区間の月別収量、果実数、一果重、総収量および収穫果房数に差異は無かった。しかし、K:3mg以下の処理区は、8月以後の月別収量、一果重および総収量ともにK施用量の少ない処理区ほど減少した。一方、生育や成熟速度を示す収穫果房数のK施用量の違いによる差異は小幅であった。

8月12日のKとN施用前の培養液についてKとNの分析値をTable 4に示した。Kが6mgより少量施用

Table 4. Concentration (ppm) of K and N in hydroponic culture solution.

Amount of K ¹⁾	0.75mg	1.5mg	3.0mg	6.0mg	12mg	24mg
K	Tr ²⁾	Tr	Tr	Tr	0.1	25
N	4.3	2.4	1.8	0.1	Tr	ND

1) The amount of applied Potassium (mg) per plant per day

2) The analysis of the culture solution before half of solution was renewed and before daily application of K and N (10mg)
ND: Not detected. Tr: <0.1ppm.

された処理区では培養液にKの残留は無かったが、Kの施用量が少ない処理区ほど培養液中のN残留量が多かった。一方、Kを12mg以上施用した処理区では、培養液中にKの残留を認めたが、Nの残留は無かった。N:Kが1:0.6であるK:0.6mgよりKが少ない場合、K施用量が収量の制限要因であり、K:12mg以上ではN施用量が制限要因として機能し、N:10mgに対応する収量を得た。

P試験では、N:Pが10:1であるP:1mg以上で施用N量が制限要因となりN:10mgに対応する収量、K試験ではN:Kが10:6であるK:6mg以上でN:10mgに対応する収量を得た。なお、N:10mg/個体/日であってもP試験系のPが十分な場合の収量は、K試験系のKが十分な場合の収量に劣った。

POハウスにおいて気温および1/2,000aワゲネルポットの培養液温度が35~40℃を記録した盛夏期もPとK試験系ともに供試トマト個体は欠損無く成育した。P試験系はP:0.25mg施用区以下で成育量は減少したが、葉、茎および根部おける既存のP欠乏症状は痕跡程度であった。K実験系はK:1.5mg以下では成育量の減少は認められたが、葉、茎および根部おける既存のK欠乏症状は痕跡程度であった。また、P:1mgあるいはK:6mg以上の施用区においてPあるいはKの欠乏症状はなく、日光下の個体ではN:10mgが葉面積(生長量)や光合成量(収量)の制限要因であった。

試験 b カルシウムに関するトマトの吸収特性および成育特性

1) N・P・KとCaの日分肥施用とトマト成育

6水準のCa日分肥施用区を設定し、個体当たりN:10mg, P:1mg, K:10mgを毎日施用し栽培したトマ

Table 5. Monthly yield of tomato cultivation in which 10 mg of N was applied and Calcium was applied at 6 levels every day.

Treatment	Monthly Yield (kg/6 plants)						
	5	6	7	8	9	10	11
N ¹⁾	1.98	3.24	2.41	2.15	1.92	1.99	2.14
N, P, K ²⁾	2.03	2.97	2.32	1.96	1.82	1.85	2.31
Ca : 0.1 mg ³⁾			2.44	1.84	0.51	0.23	0.36
Ca : 0.2 mg			2.18	1.91	0.39	0.24	0.45
Ca : 0.4 mg			2.34	2.08	0.88	0.51	0.28
Ca : 0.8 mg			2.46	1.79	0.40	0.46	0.47
Ca : 1.6 mg			2.22	1.85	0.42	0.38	0.52
Ca : 3.2 mg			2.17	1.90	0.57	0.59	0.59

1) Daily application of N (10mg per plant)

2) Daily application of N (10mg per plant), P (1mg per plant) and K (10mg per plant)

1), 2) Ca concentration 71.5 ppm at the beginning of the cultivation.

3) Daily application of Calcium per plant. Ca concentration in the solution at the beginning of the treatment was nearly zero.

トの収量を Table 5 に示した。

収穫開始期の5月中旬から個体当たり N : 10mg, P : 1mg, K : 10mg を毎日施用した (N・P・K 試験系とする) 各6個体の収量は, N : 10mg を毎日施用した窒素少量分施肥による個体と月別収量に差は無かった。7月中旬以後 N : 10mg, P : 1mg, K : 10mg と共に個体当たりの Ca 量を6水準変えて毎日施用した処理区 (Ca 試験系とする) において9月以後のトマト収量はほとんど無かった。

試験終了期において当日分 N, P, K および Ca の施用前における培養液中の N と Ca の分析値を Table 6 に示した。

N・P・K 試験系において培養液中の N に関する分析値は極めて低い水準であった。一方, Ca 試験系において, 培養液中の Ca 濃度は, 施用量に比例して残留が認められ, 施用 Ca がトマトに全量吸収された処理区は無かった。また, 全ての Ca 処理区において N の残留が認められた。

Table 6. Concentration (ppm) of Ca and N in hydroponic culture solution.

Amount of Ca ³⁾	0.1mg	0.2mg	0.4mg	0.8mg	1.6mg	3.2mg	N,P,K ²⁾
Ca	1.1 ¹⁾	1.8	2.9	5.3	8.9	11.8	176
N	3.4	3.4	3.2	3.4	2.4	2.5	ND

1) The analysis of the culture solution just before half of solution was renewed and before the daily application of Ca and N (10mg).

2) Daily application of nitrogen (10mg), phosphorus (1mg) and potassium (10mg) per plant.

3) The amount of applied Calcium per plant per day. ND: Not detected.

Ca の日分肥施用区は, Ca 施用量が少ないほど生長点が短期間に奇形化し, 正常な成育が不能であり, かつ生長途上の果実のほとんど尻腐れ果となった。このことから, Ca は閾値以上の濃度を維持する必要がある, 培養液中の Ca 無残留を目的とする日分肥施用法の応用は不可能な成分であると判断した。

また, 植物の必須要素の中に培養液からほぼ全て吸収可能な要素 (N, P および K) と一定の濃度以下に至ると吸収が著しく抑制される要素 (Ca) の存在が示された。

2) 培養液の Ca の濃度とトマト成育

CaCl₂ を用い 750 l 水槽の培養液の Ca 濃度を6段階に設定し栽培したトマト収量を Table 7 に示した。

Ca 濃度 20ppm 区 (以後 Ca : 20ppm とする) の月別収量は8月から11月まで大きな変化は無かった。Ca : 10ppm 区の収量は, Ca : 20ppm と比較し9月以後急減した。しかし, 気温の低下に伴い10, 11月とやや回復した。Ca : 5ppm 以下の処理区では Ca : 20ppm と比較し9月の以後の収量が半減し, かつその後回復することは無かった。

Ca 処理開始25日後の8月30日の各 Ca 区における培養液中の Ca と N の濃度を Table 8 に示した。Ca : 10ppm 以上の処理区の培養液中の Ca 濃度は目標値を保ち, N の残留も無かった。Ca : 5ppm 区以下の処理区の Ca 濃度はやや上昇し, N の残留が認められた。8月30日にて Ca : 5ppm 以下の処理区のトマトは, 生長点の奇形あるいは生長が停止し, 果実の過半は尻腐れ果となった。Ca : 10ppm 区は生長は正常であるが, 尻腐れ果を多く認めた。

Table 7. Monthly yield of tomatoes cultured in the culture solution at 6 levels of calcium concentration.

Ca conc. ¹⁾	Monthly yield (g/2 plants)				Total	After Sep ²⁾ .	(Normal ³⁾)
	8	9	10	11			
0.75	1,308	140	110	134	1,692	384	(0)
1.25	1,330	554	408	372	2,664	1,718	(238)
2.5	1,436	546	648	530	3,160	1,724	(638)
5.0	1,458	652	662	618	3,390	1,932	(1,076)
10	1,420	788	816	982	4,006	2,586	(1,870)
20	1,470	1,338	1,174	1,268	5,600	3,780	(3,196)

1) Ca concentration (ppm) at the beginning of the culture.

2) Yield (g) of Tomatoes from Sep. to Nov.

3) Yield (g) of normal fruit after September.

Table 8. Concentration of calcium and nitrogen in used solution in warm season.

Ca conc. ¹⁾	Amount of Ca (mg/750 ℓ)	Ca conc. ²⁾ (ppm)	N conc. ³⁾ (ppm)	Growth and Development
0.75	562	1.3*	0.3	Abnormal devel.
1.25	1,125	1.8*	0.3	Abnormal devel.
2.5	2,250	3.4	0.2	Abnormal devel.
5.0	4,500	6.9	0.2	Abnormal devel.
10	9,000	10.6	Tr	Blossom-end rot
20	18,000	20.3	ND	Normal

1) Ca concentration (ppm) at the beginning of the cultivation.

2) Ca concentration on Aug. 30. 3) N concentration on Aug. 30.

* reference data. ND: Not detected. Tr: <0.1ppm.

Table 9. Concentration of calcium and nitrogen in used solution on Oct. 20.

Ca conc. ¹⁾	Amount of Ca (mg/750 ℓ)	Ca conc. ²⁾ (ppm) ¹⁾	N conc. ³⁾ (ppm)	Growth and Development
0.75	562	5.2	0.4	Abnormal devel.
1.25	1,125	5.0	0.4	Abnormal devel.
2.5	2,250	5.1	0.4	Abnormal devel.
5.0	4,500	10.1	0.2	Blossom-end rot
10	9,000	13.1	Tr	Normal
20	18,000	17.9	Tr	Normal

1) Ca concentration at the beginning of the cultivation. 2) Ca concentration on Oct. 20.

3) N concentration on Oct. 20. Tr: <0.1ppm.

10月20日の各Ca区における培養液中のCaとNの濃度をTable 9に示した。Ca:20ppm処理区の培養液中のCa濃度は減少し、Nの残留も無かった。Ca:10ppm区のCa濃度はやや上昇し、Nの残留は無かった。Ca:5ppm以下の処理区では培養液中のCa濃度は上昇し、Nの残留が認められた。

この試験結果から、トマトが正常に成育可能な培養液中のCaの低濃度限界は、培養液EC:0.7、N濃度が低い条件の盛夏期8月では20ppm、気温が低下するとそ

の低濃度限界はやや低下した。

試験c マグネシウムに関するトマトの吸収特性および成育特性

1) N・P・KとMgの日分肥施用とトマト成育

N:10mg, P:1mg, K:10mgと6水準のMg日分肥施用区を設定し栽培したトマト収量をTable 10に示した。

収穫開始期の5月中旬から個体当たりN:10mg, P:

Table 10. Monthly yield of tomato cultivation in which 10mgN/plant of nitrogen was applied and Mg was applied at 6 levels every day.

Treatment	Monthly Yield (kg/6 plants)						
	5	6	7	8	9	10	11
N ¹⁾	1.98	3.24	2.41	2.15	1.92	1.99	2.14
N, P, K ²⁾	2.03	2.97	2.32	1.96	1.82	1.85	2.31
Mg : 0.15mg ³⁾			2.05	1.77	0.52	0.44	0.35
Mg : 0.3mg			2.40	1.82	0.76	0.37	0.46
Mg : 0.6mg			2.25	1.69	0.50	0.39	0.57
Mg : 1.2mg			2.19	1.93	0.85	0.42	0.43
Mg : 2.4mg			2.38	1.88	0.43	0.68	0.58
Mg : 4.8mg			2.26	1.79	0.65	0.54	0.55

1) Daily application of Nitrogen (10mg per plant).

2) Daily application of Nitrogen (10mg), Phosphorus (1mg) and Potassium (10mg) per plant.

1), 2) Mg concentration 34 ppm at the beginning of the cultivation.

3) Daily application of Magnesium per plant. Mg concentration in the solution at the beginning of the treatment was nearly zero.

1mg, K : 10mg を毎日施用し育成した個体を, 7月中旬以後個体当たり N : 10mg, P : 1mg, K : 10mg と共に Mg 施用量を 6 水準に変えて毎日施用した処理区 (Mg 試験系とする) の収量は 9 月以後ほとんど無かった。

試験終了期において, 当日分の N, P, K および Mg 施用前の培養液中の N と Mg の分析値を Table 11 に示した。

Mg 試験系において, 培養液中の Mg 濃度は, 施用量に比例して高まり, トマトによって施用 Mg が全て吸収された処理区は無かった。各 Mg 試験区の培養液中の N 濃度は, Mg の施用量に反比例した。一方, N・P・K 試験系の養液中の N 濃度の分析値は極めて低い水準であった。

Mg の日分肥施用区では, 施用量が少ない区ほど短期間に生長点の生長が止まり, 正常な成育が不能となり, かつ生長途上の果実は成育がほとんど停止し, 硬化した小果も多く, 尻腐れ果も認められた。このことより, Mg は閾値以上の濃度が維持されないと日分肥用法を応用不能な肥料成分と判断した。したがって, 主要要素

Mg の培養液管理は, 培養液中の他の要素とのバランス維持と閾値以上の濃度保持が必須である。

2) 培養液の Mg の濃度とトマト成育

MgSO₄・7H₂O を用い 750 l 水槽の培養液の Mg 濃度を 6 水準に変えて栽培したトマト収量を Table 12 に示した。

処理開始 30 日後の 8 月後半では Mg 低濃度区の収量は明らかに減少した。9 月に至ると Mg : 15ppm 以下の収量は, Mg 濃度が低い処理区ほど低減したが, 低温期の 11 月に至ると各区とも月別収量がやや増加した。Mg : 30ppm 区の個体は 8 月から 12 月まで正常な生育と収量を得た。一方, Mg : 60ppm 区の個体は 8 月から 9 月の生育は正常であるが, 尻腐れ果が多発した。しかし, 低温期に至ると尻腐れ果の発生が減少し, 収量も回復した。

Mg 処理開始 60 日後の 9 月 30 日の培養液中の Mg と N の濃度を Table 13 に示した。Mg : 60ppm 区の個体の茎葉部は正常な生育を示したが, 尻腐れ果が発生した。この培養液中の Mg 濃度は目標値を保ったが, N が僅かに残留した。Mg : 30ppm 区個体は生育および果実ともに正常で培養液中の Mg 濃度は減少し, N の残留はほとんど無かった。Mg : 15ppm 以下の処理区の Mg 濃度はやや上昇し, N が残留した。9 月 30 日の Mg : 1.87 ppm 区では, トマト生長点が奇形あるいは生長停止が認められ, 果実の過半は生長を停止した。Mg : 15~3.75ppm 区の個体は生育が遅延し, 葉色は Mg 欠乏症状を示した。

寒候期の 12 月 15 日の培養液中の Mg と N の濃度を Table 14 に示した。Mg : 60ppm 区は正常な生育を示し,

Table 11. Concentration (ppm) of Mg and N in hydroponic culture solution (ppm).

Amount of Mg ³⁾	0.15mg	0.3mg	0.6 mg	1.2mg	2.4mg	4.8mg	N, P, K ²⁾
Mg	1.0 ¹⁾	1.8	3.1	5.2	8.8	12.3	82
N	3.2	2.7	2.7	2.9	2.4	2.0	ND

1) The analysis of the culture solution just before half of solution was renewed and before daily application of Mg and N.

2) Daily application of Nitrogen (10mg), Phosphorus (1mg) and Potassium (10mg) per plant.

3) The amount of applied Magnesium per plant per day
ND: Not detected.

Table 12. Monthly yield of tomatoes cultured in culture solution at 6 levels of magnesium concentration.

Mg conc. ¹⁾	Monthly yield (g/2 plants)					Total	Aug.~ Sep.	Nov.~ Des.
	8*	9	10	11	12			
1.87	452	356	246	324	752	2,130	1,054	1,076
3.75	414	368	340	580	866	2,568	1,122	1,446
7.5	390	435	394	641	1,194	3,054	1,219	1,835
15.0	508	548	734	1,226	1,332	4,348	1,790	2,558
30	922	1,330	1,346	1,527	1,528	6,853	3,598	3,055
60	744	504	416	388	1,054	3,106	1,664	1,442
Standard (37.6ppm)	636	872	1,373	1,652	1,520	6,053	2,881	3,172

1) Mg concentration(ppm) at the beginning of the culture.

* July+August

Table 13. Concentration of magnesium and nitrogen in used solution in warm season.

Mg concent. ¹⁾	Amount of Mg (mg/750 ℓ)	Mg concent. ²⁾ (ppm)	N concent. ³⁾ (ppm)	Growth and Development
1.87	1,402	2.8	10.0	Abnormal ⁴⁾
3.75	2,812	5.7	9.0	Leaf color ⁵⁾
7.5	5,625	10.3	9.2	Leaf color
15.0	11,250	17.9	9.7	Leaf color
30	22,500	20.6	1.1	Normal
60	45,000	64.0	3.8	Blossom-end rot

1) Mg concentration(ppm) at the beginning of the cultivation.

2) Mg concentration on Sep.30. 3) N concentration on Sep.30.

4) Abnormal development.

5) Unusual leaf color.

Table 14. Concentration of magnesium and nitrogen in used solution on Dec. 15.

Mg conc. ¹⁾	Amount of Mg (mg/750 ℓ)	Mg conc. ²⁾ (ppm)	N conc. ³⁾ (ppm)	Growth and Development
1.87	1,402	2.5	16.1	Leaf color ⁴⁾
3.75	2,812	6.1	13.8	Leaf color ⁴⁾
7.5	5,625	8.4	7.4	Leaf color ⁴⁾
15.0	11,250	15.9	Tr	Normal
30	22,500	23.7	ND	Normal
60	45,000	58.6	1.9	Blossom-end rot

1) Mg concentration(ppm) at the beginning of the cultivation.

2) Mg concentration on Dec. 15. 3) N concentration on Dec. 15.

4) Unusual leaf color. ND: Not detected. Tr: <0.1ppm.

尻腐れ果も半減し、培養液中の Mg 濃度は目標値を保ち、N はわずかに残留した。Mg : 30 と 15ppm 区は生育および果実ともに正常で培養液中の Mg 濃度は減少し、N の残留は無かった。Mg : 7.5ppm 以下の処理区の Mg 濃度はやや上昇し、施用 N の残留が認められた。12月15日の Mg : 1.87ppm 区において個体の側枝生長点の発育は正常であるが、生育は遅延し、葉色は Mg

欠乏症状を示し、果実の過半は硬化して生長を停止した。Mg : 7.5~3.75ppm 区は生長が遅延し、葉色は Mg 欠乏症状を示した。

この結果から、トマト個体が正常に成育可能な養液中 Mg の低濃度限界は、暖候期は 20ppm、寒候期は 15ppm 程度と解析された。また、Mg : 60ppm 区は、トマトの Ca 吸収を阻害し、培養液中の Mg 好適濃度範囲を超えると判断した。

試験 d 硫黄に関するトマトの吸収特性および成育特性

1) N と S の日分肥施用とトマト成育

硫黄 (以後 S とする) を含まない OKF-1 (大塚化学) を用い、施用 N, P, K 量をそれぞれ 9mg, 4.8mg, 10.2mg/個体とし、S 施用量を 6 水準に変えて日分肥施用したトマトの収量を Table 15 に示した。8月下旬の培養液の S と N の分析結果を Table 16 に示した。

7月以後の収量は、毎日の S 施用量に比例した。また、S : 0.34mg/個体/日以下であると S は全量吸収されるが、茎葉部の矮小化と果実の石化、生長部異常と花房の発育異常および着果異常が発生した。

S : 0.7~6.3mg/個体/日の水準では、S が培養液に溶存するにも関わらず、欠乏症状が①葉身の内側への湾曲、次第に②生育遅延、③生育遅滞と果実の矮小化④茎葉部の矮小化と果実の石化、⑤生長部の発育異常と花房の発育異常および着果異常の発生へ進行した。

S : 6.3mg/個体/日以下では、培養液に N 残留が認められた。残留量は S の個体あたり日施用量に反比例した。

S : 18.9mg 区は、S 欠乏症状はなく、培養液に S が多く残留し、施用した N はすべてトマトに吸収され、施用 N 量の 9mg/個体/日が生育の律速要因であった。

Table 15. Monthly yield of tomato cultivation in which 9mg of N and various amounts(6 levels) of S were applied every day.

Amount of applied Sulfur (mg/plant/day)	Monthly yield (kg/6 plants)					Total
	7	8	9	10	11	
0	1.57	1.43	1.25	1.15	1.05	6.44
0.34 ^D	1.58	1.46	1.27	1.26	1.29	6.86
0.7	1.58	1.57	1.38	1.64	1.53	7.70
2.1	2.11	1.72	1.74	1.78	1.63	8.98
6.3	2.17	1.79	1.95	1.76	1.74	9.41
18.9	2.31	2.34	2.44	2.02	1.78	10.89
Mean	1.88	1.72	1.67	1.32	1.50	8.38

1) Daily applied amount of Sulfer per plant.

Table 16. Concentration (ppm) of S and N in used solution on Aug. 23.

Amount of S mg/plant/day	Total S mg/plant	S conc. ¹⁾	N conc. ²⁾	Growth and Development
0	0	0	12.0	Abnormal devel.
0.34	14.4	0	6.5	Abnormal devel.
0.7	43.2	0.17	1.8	Growth delay.
2.1	129.	2.47	0.5	Growth delay.
6.3	388.	3.87	0.3	Slight deficiency symptoms
18.9	1,166.	51.47	ND	Normal

1) Concentration (ppm) of S in hydroponic culture solution.

2) Concentration (ppm) of N in used solution in which 9 mg of N was applied per plant every day.

ND: Not detected.

この結果からトマトは、培養液から溶存硫黄 (S) を全量吸収可能であるが、一定の濃度以下では吸収量が不足し、発育と生育異常が発生し、施用量に比例した生長量が期待できない要素であった。

2) 培養液の S の濃度とトマト成育

第 1 花房開花期から NaSO₄ を用い 750 ℓ 水槽の培養液の S 濃度を 6 水準に変えて栽培したトマトの収量を Table 17 に示した。

処理から 30 日後の 7 月において S の濃度高い区ほど

Table 17. Monthly yield of Tomatoes cultured in the culture solution at 6 levels of sulfur concentration.

S conc. ¹⁾	Monthly yield (g/2 plants)				Total
	7	8	9	10	
1.5	471	569	581	0	1,621
3.0	516	802	703	101	2,122
6.0	612	833	717	270	2,432
12.0	837	945	732	346	2,860
24.0	946	972	872	395	3,185
48.0	1,041	992	972	540	3,545

1) Sulfur concentration (ppm) at the beginning of the culture

収量が多かった。この傾向は処理から日数が経過するほど明確に現れた。

S 処理 100 日を越えた 9 月 30 日の培養液中の S と N 濃度を Table 18 に示した。S : 48 および 24ppm 区は正常な生育を示したが、収量は 48mg > 28mg であり、培養液中に N が僅かに残留した。S : 12ppm 区では、果実は正常であったが生育が遅れが認められた。S : 6 ppm 区以下の処理区では顕著な N の残留が認められ、S : 6 ~ 3.0ppm 区は成育が遅延し、葉色は S 欠乏症状を示した。9 月 30 日にて S : 1.5ppm 区では、トマト生長点が奇形あるいは生長停止が認められ、果実の過半は生長を停止した。これより、トマトが正常に生育可能な S の低濃度限界は 50ppm 程度と判断された。

試験 e K 濃度が著しく低い培養液における Ca と Mg の拮抗作用の検証

K 濃度が著しく低い養液中において Mg の低濃度限界 (20ppm) および高濃度限界 (40ppm) が Ca 濃度により変化するか否かを検討し、その結果を Table 19 に示した。

Table 18. Concentration of sulfur and nitrogen in used solution on September 30.

S conc. ¹⁾	Amount of S (750 ℓ)	S conc. ²⁾ (ppm)	N conc. ³⁾ (ppm)	Growth and Development
1.5	1,125	4*	20	Abnormal devel. ⁴⁾
3.0	2,250	5*	18	Growth delay.
6.0	4,500	8*	11	Growth delay.
12.0	9,000	15	6	Growth delay.
24.0	18,000	23	4	Normal
48.0	36,000	43	2	Normal

1) Sulfur concentration(ppm) at the beginning of the cultivation.

2) S concentration on Sep. 30. 3) N concentration on Sep. 30.

4) Abnormal development. * reference data.

Table 19. Yield (kg/6 plants) and Brix of the tomatoes cultured by the method of daily application of NPK in which the concentration of Mg was 20ppm or 40ppm, and the EC was controlled by using a CaCl₂ solution within the range of 1 to 10 dS•m⁻¹.

Conc. ¹⁾ (ppm)	(EC) ²⁾	Month						Total ³⁾ Avg. Brix ⁴⁾
		7	8	9	10	11	12	
Mg : 20 Brix	1	2.38 ⁵⁾	3.56	3.32	2.24	2.21	1.91	15.62
		4.9	4.7	5.2	5.4	4.6	6.0	5.3
Mg : 20 Brix	2	2.34	3.44	3.43	2.72	2.18	1.96	16.07
		5.0	4.8	5.6	5.8	6.1	6.9	5.7
Mg : 20 Brix	4	2.54	3.67	3.59	2.37	2.32	2.38	16.87
		5.3	5.4	5.7	6.5	7.2	7.3	6.2
Mg : 20 Brix	6	2.26	3.59	3.58	2.36	2.52	1.92	16.23
		5.4	5.5	5.7	7.0	7.9	8.1	6.6
Mg : 20 Brix	8	2.36	3.68	2.89	2.27	1.53	1.65	14.38
		5.3	5.8	6.5	7.6	8.4	9.3	7.2
Mg : 20 Brix	10	2.19	3.50	3.34	1.46	1.81	1.35	13.65
		5.2	6.1	7.9	8.5	9.2	10.2	7.8
Total Avg. Brix		14.07	21.44	20.15	13.42	12.57	11.17	92.82
		5.2	5.3	6.1	6.8	7.4	8.0	6.5
Mg : 40 Brix	1	2.08	3.97	3.84	2.66	2.06	2.69	17.30
		4.8	4.5	4.9	5.4	5.8	6.2	5.2
Mg : 40 Brix	2	2.18	3.88	3.59	2.87	2.10	2.66	17.28
		4.9	4.9	4.8	5.2	5.7	6.8	5.3
Mg : 40 Brix	4	2.11	3.79	3.41	2.62	2.56	2.88	17.37
		5.2	5.5	5.8	6.4	6.9	7.2	6.2
Mg : 40 Brix	6	2.24	3.20	3.03	2.21	2.17	2.54	15.39
		5.5	5.5	5.6	6.5	7.1	7.9	6.4
Mg : 40 Brix	8	2.08	3.66	3.13	2.18	1.93	1.65	14.62
		5.2	5.9	6.7	7.3	7.8	9.0	6.9
Mg : 40 Brix	10	2.04	3.60	2.98	2.02	2.13	1.23	14.00
		5.3	6.0	7.5	8.1	9.4	10.4	7.8
Total Avg. Brix		12.73	22.10	19.98	14.56	12.95	13.65	95.97
		5.2	5.4	5.9	6.5	7.1	7.9	6.3

1) Concentration of Magnesium (ppm) in used solution. 2) EC in used solution.

3) Total yield of 6 plants (kg). 4) Averaged Brix. 5) Yield of 6 plants (kg).

Mg の濃度を 20ppm と 40ppm に設定し、CaCl₂・2H₂O によって EC を 1~10 に変えた培養液に育つトマトは、全ての処理区において、N, P, K, Mg および Ca の欠乏や過剰症状は無かった。すなわち、Ca 濃度は Mg の低濃度限界や K の吸収に影響を与えなかった。一方、Mg 高濃度限界 40ppm 条件で CaCl₂による EC : 1 を維持した比較的 Ca 低濃度区においても、盛夏期に尻腐り果の発生は無いことから高濃度限界以下の Mg 濃度では Ca の吸収阻害効果は無いと判断された。

また、CaCl₂・2H₂O による EC : 1~10 を維持した培養液に育つトマト果実は尻腐り果がなく、EC の上昇による Ca 欠乏が認められなかった。これらの果実の糖度を測定したところ、EC : 4 以上の処理区では果実糖度の上昇を認めたが、期待したほど大幅では無かった。

CaCl₂・2H₂O による EC : 1~10 の処理区において、EC の上昇による収量の抑制効果は小幅であり、EC : 10 区においても EC : 2 区と比較し 8 割程度の収量水準を維持した。

2 培養液に肥料要素 N・P・K の残留が無いトマト養液栽培の開発

試験 a 栽培終了時の培養液に N・P・K の残留がないトマト栽培法の開発

誘引の高さ 3m, 個体当たり 8ℓ の培養液と窒素少量施肥法を用いたトマト栽培の収量を Table 20 に示した。3.7 個体/m², LAI : 4 を維持した 2 から 5 号槽のトマト個体群では、各槽とも糖度 5 の果実を 30t/10a 以上収穫した。

2 月 28 日以後、N や N, P および K の施用量、施用法の異なる処理区おける培養液の分析結果を Table 21

に示した。3 月中の個体当たり N, P および K 施用量、吸収量、培養液残留量を Table 22 に示した。

窒素少量施肥法を継続した栽培槽 1 の 2 月 28 日および 3 月 27 日培養液について、N はアンモニア態 (NH₄-N)、硝酸態 (NO₃-N) を合わせても 5~3ppm と水道水の N 許容濃度基準以下であった。栽培槽 1 の培養液中に残留する個体当たりの N 量は 84~53mg (8ℓ) であり、窒素少量施肥法の寒候期の N 施用量 1~2 日に相当した。

培養液 1 回分析、N, P および K 施用量 1 回修正区の栽培槽 2 の 2 月 27 日培養液について、N は NH₄-N, NO₃-N を合わせて 75ppm, P は無検出、K は 51ppm, 個体当たりの N, P, K はそれぞれ 639mg, 0mg, 437mg であった。この培養液に N, P, K それぞれ個体当たり 872mg, 155mg, 1,117mg を N は 1/30 に分けて毎日、P と K は 4 分割し施用した。Table 22 の試算結果によれば、3 月 28 日の培養液の N, P, K 濃度はそれぞれ 22, 無検出, 3ppm であり、3 月中に N, P, K を個体当たり 1,432mg, 155mg, 1,538mg 吸収し、個体当たり残留 N, P, K 量は 206mg, 0mg, 16mg で N のみ培養液中に残留した。栽培槽 4 の 2 月 27 日培養液の N, P, K 濃度は、それぞれ 59ppm, 13ppm, 112ppm, 個体当たりの残留 N, P, K はそれぞれ 545mg, 121mg, 1,031mg であった。この培養液に N, P, K それぞれ個体当たり 1,077mg, 48mg, 601mg を N は 1/30 に分けて毎日、P と K は 4 分割し施用した。4 号槽の 3 月 18 日の培養液の N, P, K 濃度はそれぞれ 20ppm, 5ppm, 23ppm であり、Table 22 によれば 3 月中に N, P, K を個体当たり 1,432mg, 125mg, 1,299mg 吸収し、個体当たり残留 N, P, K 量は 190mg, 44mg, 333mg であり、N, P および K 各要素とも培養液中に

Table 20. Yield (kg/124 plants) and Brix of the tomatoes of which height was 3m with LAI 4.

Tank number	Monthly yield and Brix (in parenthesis)										Yield(t)/10a/Year
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	
1 ¹⁾	63.8	109.7	114.3	82.1	51.6	60.4	56.5	57.5	51.3	46.8	20.8
(Brix)	(5.3)	(5.3)	(5.2)	(5.3)	(5.5)	(6.1)	(6.6)	(6.8)	(7.2)	(6.9)	(6.0)
2	90.6	196.9	205.3	125.3	91.2	103.0	86.1	89.7	80.0	52.4	33.7
(Brix)	(5.2)	(5.1)	(5.0)	(5.1)	(5.3)	(5.8)	(6.4)	(6.8)	(7.1)	(6.5)	(5.8)
3	110.9	189.6	197.2	126.3	90.0	93.4	82.7	105.6	78.9	49.4	33.7
(Brix)	(5.1)	(5.0)	(5.0)	(5.2)	(5.3)	(5.7)	(6.2)	(6.6)	(7.2)	(6.8)	(5.8)
4	103.3	177.0	176.8	92.7	84.4	112.9	98.3	100.7	74.1	50.0	32.1
(Brix)	(5.2)	(5.2)	(5.1)	(5.3)	(5.5)	(5.8)	(6.4)	(6.5)	(7.0)	(6.7)	(5.9)
5	99.7	180.4	166.7	112.9	93.2	115.2	91.5	98.9	77.8	48.5	32.5
(Brix)	(5.0)	(5.1)	(5.0)	(5.4)	(5.4)	(5.9)	(6.2)	(6.4)	(6.9)	(6.6)	(5.8)

1) 62 plants/culture bed and tank (kg).

Table 21. Content of inorganic elements in used solution on hydroponic culture in greenhouses.

Tank	Sample		Content of elements in nutrient solutions (ppm)												
	Date	EC	NH ₄ -N	NO ₃ -N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn	Na	Cl	S
1	2.28	1.9	2.0	2.9	35	254	86	46	0.74	2.8	0.87	0.19	42	220	124
1	3.14	1.6	1.0	2.0	30	206	51	39	0.03	1.2	0.57	0.13	37	179	103
1	3.27	1.0	2.1	0.8	14	116	26	24	0.08	1.5	0.68	0.14	60	131	68
2	2.28	1.9	1.7	72	ND	51	180	71	0.18	2.1	1.19	0.15	59	185	127
2	3.14	1.7	1.1	49	ND	7	140	88	0.16	1.6	0.82	0.12	58	190	138
2	3.27	1.3	0.8	21	ND	3	108	67	0.05	1.8	0.80	0.07	55	177	113
4	2.28	1.8	2.1	57	13	112	141	66	0.16	2.3	0.78	0.18	58	203	131
4	3.14	1.6	0.9	33	11	69	105	78	0.03	1.4	0.69	0.16	50	183	137
4	3.27	1.3	0.9	18	5	23	83	62	0.06	1.9	0.75	0.09	50	154	107
3	2.28	1.7	2.1	50	ND	24	159	121	0.06	2.3	0.87	0.15	58	202	118
3	3.07	1.7	1.6	31	ND	12	140	127	0.02	7.3	0.77	0.12	61	173	184
3	3.14	1.6	1.0	22	ND	3	115	113	0.03	1.5	0.63	0.12	58	186	196
3	3.20	1.5	1.4	10	ND	2	111	103	ND	2.0	0.63	0.14	61	156	166
3	3.27	1.3	ND	0.8	ND	2	91	89	0.01	1.9	0.65	0.12	55	163	162
5	2.28	1.7	2.1	46	ND	28	172	81	ND	2.8	0.72	0.09	64	223	108
5	3.07	1.6	1.6	24	ND	10	143	75	ND	2.6	0.48	0.03	67	214	121
5	3.14	1.4	0.6	12	ND	3	113	69	ND	2.0	0.37	0.04	49	183	94
5	3.20	1.3	1.5	5.2	ND	2	102	61	ND	2.4	0.48	0.07	65	207	102
5	3.27	1.2	ND	0.8	ND	1	68	47	ND	1.4	0.33	0.04	43	119	90

ND: Not detected. Tr: <0.1ppm.

残留した。すなわち、10a 当たり培養液排出に伴い年間 N, P, K それぞれ 710.6g, 164.6g, 1,245.4g 施設外に排出する。

7日間隔培養液4回分析, N, P および K 施用量4回修正区の栽培槽3と5の各肥料要素分析値は Table 21のごとく推移し, 3月27日に至ると培養液の N, P および K は 4ppm 以下であり2月28日に存在した培養液中の N, P および K はトマト個体群により全て吸収された。Table 22によれば, 3号槽及び5号槽とも1月間に個体当たりほぼ N:1,100mg, P:120mg, K:1,100mg 吸収した。2月28日~3月7日, 3月7日~14日, 3月14~21日, 3月21~27日の各期間のトマト個体当たりの N と K 吸収量は, P の期間施用量のほぼ10倍であり, 7日当たり 300mg 前後であった。

培養液1回分析, N, P および K 施用量1回修正区の個体の N, P および K 吸収量と比較し, 培養液4回分析, N, P および K 施用量4回修正区の個体の N, P および K 吸収量はともに80%程度であった。

試験 b 培養液に N・P・K 残留のない循環型長段トマト養液栽培の開発

2003年3月20日播種, 4月15日定植し, N, P および K の量的制御を開始した各処理区収量と果実糖度を

Table 23 に示した。

窒素少量分施肥を用いたトマト個体群の LAI を 3 に維持して栽培した栽培槽1の個体群の月別収量の推移を見ると, 8月までは順調な収量水準であったが, 9月の収量は著しく低下した。その後持ち直したが10ヶ月余の栽培期間にて 27.3t/10a であった。

4月15日以後 10:1:10 の比率をもつ NPK 肥料の量的制御による培養液に N, P および K 残留の無い栽培槽2の月別収量は, 栽培槽1の個体群とほぼ等しく推移し, 10ヶ月余の栽培期間収量は 25.9t/10a であった。

定植後 10:1:10 の比率の NPK 肥料の日分肥施用, 8月1日からは 10:1.1:11~10:1.3:13 の比率の NPK 肥料, 11月から 10:1.2:11 の NPK 肥料の量的制御による培養液に N, P および K 残留の無い栽培槽3, 4, 5の10ヶ月余の収量は, それぞれ 26.4t, 26.6t, 26.8t/10a であり, 培養液に N 残留の無い栽培槽1と比較し大きな収量差は無かった。

また, Table 26 に示す培養液の EC 管理のもとで, 窒素少量分施肥, N:P:K が 10:1:10 の NPK 肥料, あるいは8月からの N:P:K 比率を 10:1.3:13, 11月から 10:1.2:11 と N:P:K の施用比率を変更し量的制御を継続した各区において, 月別の果実糖度 (Brix) や年間の果実糖度に関し大きな差異は無かった。

Table 22. Amounts (mg) of uptake and application of N, P and K in March.

Tank ¹	Date	plants ²		Amount of fertilizer (mg/Plant)				
				N	P	K		
1	2.28	58	solution ³⁾	84	600	4,382		
1			applied ⁴⁾	1,311	—	—		
1			uptake ⁵⁾	1,342	—	—		
1			3.27	54	residual ⁶⁾	53	257	2,143
2	2.28	116	solution	639	0	437		
2			applied	872	155	1,117		
2			uptake	1,432	155	1,538		
2			3.27	108	residual	206	0	16
4	2.28	109	solution	545	121	1,031		
4			applied	1,077	48	601		
4			uptake	1,432	125	1,299		
4			3.27	100	residual	190	44	333
3	2.28	115	solution	443	0	212		
3			applied	150	30	150		
3			uptake	307	30	306		
3			3.07	115	residual	286	0	56
3			applied	185	32	260		
3			uptake	270	32	290		
3			3.14	115	residual	201	0	26
3			3.20	112	supplied	170	28	265
3	uptake	273			28	275		
3	residual	98			0	16		
3	3.27	110			applied	170	28	235
3			uptake	261	28	237		
3			residual	7	0	14		
3			total absorp.	1,111	118	1,108		
5	2.28	119	solution	403	0	231		
5			applied	150	30	150		
5			uptake	328	30	336		
5			3.07	118	residual	225	0	45
5			applied	185	37	260		
5			uptake	303	37	283		
5			3.14	114	residual	107	0	22
5			3.20	109	applied	170	26	260
5	uptake	216			26	265		
5	residual	61			0	17		
5	3.27	107			applied	210	28	250
5			uptake	264	28	260		
5			residual	7	0	7		
5			total absorp.	1,111	121	1,144		

1) Tank number. 2) Number of plants. 3) Amount of residual fertilizer in solution per plant.

4) Amount of applied fertilizer per plant. 5) Uptake amount per plant.

6) Final amount of residual fertilizer in solution per plant.

Table 23. Yield (kg/124 plants) and Brix of the tomatoes of which height was 3m with LAI 3.

Tank number	Monthly yield and Brix (in parenthesis)										Total (Kg)	Yield(t)/10a/Year
	6	7	8	9	10	11	12	1	2			
1 ¹⁾	118.9	152.6	141.5	92.8	95.0	92.6	91.8	67.6	47.6	910.4	27.3	
(Brix)	(5.3)	(5.3)	(5.2)	(5.3)	(5.5)	(6.3)	(6.7)	(6.9)	(7.2)		(6.0)	
2 ²⁾	116.1	140.9	137.0	99.9	92.3	87.9	85.2	70.4	33.9	863.6	25.9	
(Brix)	(5.2)	(5.1)	(5.1)	(5.2)	(5.3)	(5.9)	(6.7)	(6.9)	(7.2)		(5.8)	
3 ²⁾	119.4	157.5	136.9	90.3	94.0	91.4	88.3	64.8	36.1	878.7	26.4	
(Brix)	(5.3)	(5.2)	(5.2)	(5.3)	(5.5)	(6.0)	(6.9)	(7.0)	(7.5)		(6.0)	
4 ²⁾	116.7	145.1	135.7	87.4	91.3	89.3	95.6	65.7	37.3	889.1	26.6	
(Brix)	(5.2)	(5.2)	(5.2)	(5.3)	(5.5)	(6.1)	(6.8)	(6.9)	(7.2)		(5.9)	
5 ²⁾	126.5	147.0	140.1	86.3	96.2	93.4	88.7	71.9	44.7	894.8	26.8	
(Brix)	(5.2)	(5.2)	(5.3)	(5.4)	(5.6)	(6.3)	(7.0)	(7.1)	(7.4)		(6.0)	

1) 124 plants/culture bed and tank. The tomato plants were cultivated in the solutions in which no residual N remained.

2) 124 plants/culture bed and tank. The tomato plants were cultivated in the solutions in which no residual N, P and K remained.

Table 24. Yield component of the tomato plants cultivated in solutions in which no residual N, P and K remained.

Tank number	Yield t/10a	Weight of fruit(g)	Good ¹⁾ fruits rate	Num. of ²⁾ fruits/clusters	Num. of harvested clusters	Num. of plants/10a	Stem length (m)	Num. of leaves
1 ³⁾	27.3	125.8	95.6	3.07	19.6	3740	7.53	88.2
2 ⁴⁾	25.9	133.8	94.0	2.89	19.2	3740	7.29	86.2
3 ⁴⁾	26.4	136.0	94.1	2.85	19.7	3740	7.51	93.0
4 ⁴⁾	26.6	137.7	93.2	2.87	19.4	3740	7.47	87.2
5 ⁴⁾	26.8	132.0	94.2	2.90	19.9	3740	7.60	89.2

1) Weight of good fruits/Weight of total harvested fruits.

2) Num. of harvested fruits/Num. of harvested clusters.

3) Yield component of the tomato cultivated in solutions in which no residual N remained.

4) Yield component of the tomato cultivated in solutions in which no residual N, P and K remained.

5) Date of investigation: 15 Feb. 2004.

これら個体群の収量構成要素を Table 24 に示す。窒素少量分施肥を用いた栽培槽 1 の個体群の収量構成要素を、培養液中に N, P および K 残留が無い栽培槽 2~5 と比較すると、1 果重がやや軽いものの、良品率が相対的によく、果房当たりの果数で優り 27t/10a の収量を確保した。

栽培槽 2 では、果房あたりの果数と収穫果房数が他の栽培槽に比較し劣り、栽培期間収量は 25.9t/10a と最も劣った。栽培槽 2 の個体群の茎長は他区と比較し短く、葉数も少なかった。

栽培槽 3 では、1 果重と収穫果房数が比較的良好な数値を示したが、収量は 26.4t/10a と栽培槽 2 に次いで低かった。なお、栽培槽 2 の個体群は主茎の葉数のみ他区より優った。

栽培槽 4 では、特に特徴は認められなかった。栽培槽 4 の収量は 26.6t/10a と栽培槽 3 よりやや多かった。

栽培槽 5 では、1 果重が栽培槽 1 に次ぎ軽いものの、

他の収量構成要素が比較的良好な数値を示し、収量は 26.8t/10a と栽培槽 1 に次ぎ多かった。

窒素少量分施肥の継続区、N:P:K が 10:1:10 あるいは 8 月からの N:P:K 比率を 10:1.3:13 の範囲で変更し、11 月から 10:1.2:11 と N:P:K の施用比率を変更し量的制御を継続した各区において、収量構成要素や主茎長および主茎葉数に特徴のある差異は無かった。

2 月 15 日における各栽培槽の個体群の生葉重、茎重、未熟果実重など現存量を Table 25 に示した。

窒素少量分施肥を用いたトマト個体群の LAI:3 を目標に N を量的に制御して維持して栽培した栽培槽 1 の個体群、N, P および K を量的に制御して栽培した栽培槽 2~5 の個体群に関し、終了時の LAI は 3 前後であった。栽培槽 2 の個体群は、生葉重、茎重がやや軽く、現存量、収量および乾物生産量いずれも他区より劣った。栽培槽 3 の個体群の現存量は、栽培槽 1 の個体群に優ったが、収量が劣り、乾物生産量は栽培槽 2 の個体群につ

Table 25. Fresh weight of leaf, stem and immature fruit of tomato plants cultivated in solutions in which no residual N, P and K remained. Date of measurements: 15 Feb. 2004.

Tank number	LAI	Days of cultivation	Leaf (g/m ²)	Stem (g/m ²)	Immature Fruit (g/m ²)	Standing Crop (g/m ²)	Yield (Kg)	Yield/ yield+St.Cr. ²⁾	D.W. t/10a	D.W.R. ³⁾ (kg/10a)
1 ¹⁾	3.17	307	1,259.3	3,406.1	3,672.9	8,338.3	27,312	0.735	1.90	42.1
2	2.88	307	1,142.2	3,439.6	3,696.7	8,278.5	25,908	0.726	1.84	61.8
3	2.98	307	1,183.5	3,531.3	3,659.9	8,374.7	26,361	0.727	1.87	62.7
4	3.07	307	1,218.0	3,584.2	3,606.0	8,408.2	26,673	0.729	1.89	57.9
5	3.09	307	1,226.0	3,563.0	3,677.4	8,466.4	26,884	0.729	1.90	58.0

1) The tomato plants were cultivated in solutions in which no residual N remained.

2) Standing crop (g/m²).

3) Dry weight of root (kg/10a).

ぎ少なかった。栽培槽 4 の個体群の現存量は、栽培槽 5 の個体群につき多かったが、乾物生産量は栽培槽 1 および 5 の個体群に比較し劣った。栽培槽 5 個体群の現存量は最も多かったが、収穫量および乾物生産量は栽培槽 1 個体群に比較し劣った。トマト果実への乾物分配率と乾物生産量は、収穫量が多い栽培槽の個体群ほど高かった。

なお、N、P、K、S および Mg 量的制御法を用いた栽培槽 2~5 の個体群の根の乾物重は 60kg/10a 前後（乾物率 6.5%）で、全乾物重の 3% を占めるにすぎないが、窒素少量分肥法を用いた栽培槽 1 の乾燥根重 40kg/10a と比較し 4 割程度増加した。

Table 26 に、定植時、N、P および K の量的処理開始期と栽培時の培養液分析結果を示した。

育苗期および定植後窒素少量分肥法を用いて LAI : 3 を維持して栽培した栽培槽 1 の培養液に残留する定植後の N 肥料要素の推移を見ると、N は生育期間を通して極めて低濃度を保ち推移した。P は 3.4ppm から 30ppm 程度に濃度を増し、K は 69ppm から 190ppm へ濃度を増した。Ca は 38ppm から 105ppm の範囲、Mg は 23ppm~30ppm と安定した数値で推移した。これに対し、S は 40ppm から 107ppm、Cl は 155ppm から 224ppm へ濃度は上がり培養液に蓄積した。

栽培槽 2 の培養液は、定植 7 月後の 10 月 15 日において N は 1ppm、P は 0.3ppm、K は 3.6ppm 以内に経過した。Ca は 54ppm~31ppm の範囲、Mg は 47ppm~30ppm と安定した数値に推移した。これに対し S は 49ppm~91ppm、Cl は 163ppm から 240ppm へ濃度が上がり培養液に蓄積した。

7 月 31 日まで 10 : 1 : 10、8 月 1 日からは 10 : 1.1 : 11、11 月から 10 : 1.2 : 11 の N : P : K 比率の肥料を用い、施用量を調節し LAI を 3 に制御して栽培した栽培槽 3 の培養液において、N、P および K の残留量は 7

月 15 日までは栽培槽 2 とほとんど等しかった。10 月 15 日においても N は 1.8ppm、P は 0.1ppm 以下、K は 2.8ppm であり、栽培槽 2 との差異は無かった。栽培槽 3 の Ca は 37ppm~88.8ppm の範囲、Mg は 26ppm~41ppm と安定した数値を維持した。また、S は 47ppm~86ppm と安定した数値を維持したが、Cl は 181ppm から 377ppm と濃度が上がり培養液に蓄積した。

栽培槽 4 と 5 の培養液において、7 月 15 日まで主要肥料要素 N、P、K、Ca、Mg、S および Cl の含有率の推移は、栽培槽 2 および 3 と差異は無かった。8 月 1 日から N : P : K 比率が 1 : 1.2 : 12、11 月から 10 : 1.2 : 11 の N : P : K 比率の肥料を用い、施用量を調節し LAI を 3 に制御して栽培した栽培槽 4 の 9 月 5 日、10 月 15 日培養液は、極めて低濃度であるが 1.2~1.6ppm の P、2.4~3.3ppm の K 残留が認められた。N は 0.2~0.5ppm であり、栽培槽 2 や 3 の培養液より N 濃度は低下した。

7 月 31 日まで 10 : 1 : 10、8 月 1 日から N : P : K 比率が 1 : 1.3 : 13、11 月から 10 : 1.2 : 11 の N : P : K 比率の肥料を用い、施用量を調節し LAI を 3 に制御して栽培した栽培槽 5 の 9 月 5 日、10 月 15 日培養液は、2.3~2.6ppm の P、2.8~3.9ppm の K 残留が認められたが、N は 0.5~0.6ppm であり、栽培槽 4 の培養液同様に培養槽 2 や 3 の培養液より N 濃度が低下した。

培養槽 4 と 5 において、Ca、Mg および S 濃度は培養槽 2 と 3 と同様安定し推移した。一方、培養槽 4 と 5 において Cl の濃度は、培養槽 2 および 3 と同様栽培期間に比例して濃度は上がり、培養液に蓄積残留した。

トマト個体群の正確な N : P : K 吸収比率を求めるため、8 月 1 日から N : P : K 比率を 10 : 1.1 : 11、10 : 1.2 : 12、10 : 1.3 : 13 の処理区を設定し栽培を継続したところ、10 月 15 日の培養液分析結果によれば、N : P :

Table 26. Content of inorganic elements in used solution for hydroponic culture in greenhouses(ppm).

Tank	Date	EC	pH	N	P	K	Ca	Mg	S	Cl
Seedling	4.15	0.7	5.0	ND	8.0	52.1	25.7	24.5	33.8	98.0
1 ¹⁾	5.15	1.0	5.2	1.0	9.7	92.7	50.2	27.6	40.1	155.0
1	6.15	1.1	6.0	1.4	5.8	69.9	65.3	23.5	48.7	162.5
1	7.15	1.3	6.4	0.1	3.4	99.7	105.1	23.7	67.1	172.1
1	9.05	1.4	5.3	ND	28.2	189.1	90.1	28.7	92.7	188.6
1	10.15	1.4	5.6	ND	23.7	170.2	38.5	28.8	106.9	224.9
1	12.15	1.8	5.8	Tr	63.1	282.4	156.8	41.6	205.2	275.7
2 ²⁾	5.15	1.0	4.8	ND	ND	ND	54.4	33.4	49.3	172.9
2	6.15	1.1	6.0	ND	ND	1.3	48.6	47.4	77.3	163.8
2	7.15	1.3	5.8	0.5	ND	1.9	30.8	29.8	80.1	195.3
2	9.05	1.3	5.2	0.9	ND	3.3	42.3	35.2	91.0	202.4
2	10.15	1.4	6.0	1.0	0.3	3.6	37.7	30.1	88.7	240.2
2	12.15	1.6	6.0	2.4	Tr	3.9	63.6	46.8	91.4	391.5
3 ²⁾	5.15	1.1	6.4	ND	ND	ND	58.6	26.6	47.4	189.1
3	6.05	1.1	6.2	ND	Tr	Tr	57.4	41.8	74.6	181.6
3	7.15	1.2	5.3	ND	ND	1.3	46.4	33.3	74.0	224.3
3	9.05	1.3	5.0	0.8	0.7	1.1	37.7	32.4	86.1	290.8
3	10.15	1.5	6.2	1.8	ND	2.8	88.2	34.2	78.8	377.3
3	12.15	1.8	6.0	Tr	Tr	1.1	171.4	41.5	89.0	415.0
4 ²⁾	5.15	1.0	6.3	ND	ND	ND	74.3	36.5	69.7	173.2
4	6.15	1.0	6.2	1.9	0.9	1.3	70.9	54.1	92.5	147.8
4	7.15	1.2	6.2	1.8	ND	1.2	42.4	39.1	96.7	185.5
4	9.05	1.2	5.2	0.2	1.2	2.4	32.3	31.8	90.6	251.7
4	10.15	1.4	5.4	0.5	1.6	3.3	72.9	30.0	78.9	338.6
4	12.15	1.6	6.2	0.3	0.1	1.9	159.7	38.3	96.3	381.5
5 ²⁾	5.15	1.1	5.4	ND	ND	ND	67.2	37.1	65.5	191.5
5	6.05	1.0	6.2	1.5	ND	2.1	51.8	52.3	89.9	146.4
5	7.15	1.2	6.4	Tr	ND	1.1	64.1	30.8	77.9	273.1
5	9.05	1.2	5.3	0.5	2.3	2.8	31.0	35.0	79.1	285.4
5	10.15	1.5	5.5	0.6	2.6	3.9	69.3	33.2	61.5	343.8
5	12.15	1.7	5.9	Tr	0.4	2.1	153.8	40.5	83.1	425.8

1) 124 plants/culture bed and tank. The tomato plants were cultivated in solutions in which no residual N remained.

2) 124 plants/culture bed and tank. The tomato plants were cultivated in solutions in which no residual N, P and K remained.

ND: Not detected. Tr: < 0.1ppm.

K 比率 10 : 1.1 : 11 区では P の残留がなく、10 : 1.2 : 12 において N と P のわずかな残留を認めた。しかし、K は 3.3ppm と N および P 比較しやや高い濃度を示した。

この培養液分析結果を施用肥料の主要要素の組成に反映させ、3~5号栽培槽は11月から施用する N : P : K の比率を 10 : 1.2 : 11 に変えた。さらに、N、P および K が極めて低濃度な培養液における Ca と Mg の拮抗作用の解析結果を取り入れ (Table 19)、11月以後は S と Mg を MgSO₄ を用い N のそれぞれ 1/17、1/22 施用する量的施用に切り替えた。したがって、11月からの 3~5号栽培槽の EC 制御は CaCl₂ 養液を用いて管理した。

12月15日の培養液分析結果によれば、窒素少量分施

法を継続した栽培槽 1 の培養液は、N の残留はないが、P は残留し、K、Ca、S および Cl が培養液に蓄積した。これに対し N : P : K 比率が 10 : 1 : 10 を継続した栽培槽 2 の培養液は P は無検出であったが、N と K が僅かに残留し、Mg 値が理想値と比較しやや高く、Cl は高濃度に蓄積した。

N : P : K 比率を 10 : 1.2 : 11、S と Mg を量的制御に切り替えた栽培槽 3~5 の培養液では、N と P の残留はほとんど無いところまで改善したが、K は 2ppm 程度の残留を認め、Ca : Mg : S の比率および残留量は、栽培槽 1~2 と比較し理想値に接近した。しかし、Cl の残留は改善できなかった。

IV 考 察

1 主要肥料要素に関するトマトの吸収特性および成育特性

これまでにトマト個体群の葉面積を指標（光合成に好適な水準）に主要肥料要素の窒素を量的に制御して栽培すると培養液に窒素要素が残らず、他の主要肥料要素をトマトの吸収比率（トマト果実の含有比率）に配合した特殊肥料（大塚1号改）を用いることにより、年間収量30~40tの環境に優しい循環型養液栽培を開発した（細井，2000；2001a）。他の主要肥料要素も窒素と同様な取り扱いが可能ならば、培養液にそれらの肥料要素の残留が無くともトマト栽培が可能と推定し、トマトのP吸収特性を検討した。Ca, Mg, SおよびKが基準濃度以上溶存する培養液を用い、トマト生育に必要な量のNとPを毎日施用すると、収穫期以後の個体では、N:Pの含有比率が10:1であるとNとPをほぼ全量吸収可能であり、NやPの欠乏症状（渡辺，2002）がなく、窒素少量分施肥によるトマト個体群と比較し収穫果房数など生育遅延もないトマトのPとNの吸収および成育特性を明らかにした（Table 1, 2）。続いて、主要肥料要素のKについて検討したところ、Ca, Mg, SおよびPが基準濃度以上溶存する培養液を用いた場合、N:Kの含有比率が1:0.6~1.2であるとNとKをほぼ全量吸収可能で、NやKの欠乏症状（渡辺，2002）がなく、窒素少量分施肥によるトマト個体群と比較し収穫果房数など生育や成熟の遅延もないトマトのKとNの成育特性を示した（Table 3, 4）。

植物のN吸収はトランスポーターが関与し（小俣，1999），かつ低濃度N対応のトランスポーターの存在が認められている。また、植物のP吸収にも低濃度対応のトランスポーター（三村，1999；大柴，1999）の存在が認められている。植物のK吸収速度は培養液中のK濃度により2段階に異なることが古くから知られており、NやPと同様な高濃度と低濃度のトランスポーターによる吸収機構が存在する（MAATHUISら，1993；MAATHUISら，1996）。すなわち、トマトにはN, PおよびK吸収に関してそれぞれ低濃度対応トランスポーターが存在し、かつトマトはN, PおよびK濃度が極めて低濃度であっても有効に機能するトランスポーター量を分泌可能と推定された。

また、施肥するN/Pが>10であるとPの施用量が孤立個体のトマト生育量を律速し、Nは培養液に残留

した。施肥するN/Pが<10であるとNの施用量が孤立個体のトマト生育量を律速し、Pは培養液に残留した（Table 2）。このとき、トマトはPあるいはNの著しい欠乏症状もなく、成育速さは変わらず生育量のみ縮小することが日分肥施用法の特徴である。同様に、施用するN/Kが>1であるとKの施用量が孤立個体のトマト生育を律速し、Nは培養液に残留した。施用するN/Kが<1であるとNの施用量が孤立個体のトマト生育量を律速し、Kは培養液に残留した（Table 4）。この現象から植物はN, PおよびKに関し、不足要素のみ吸収しており、N不足時のKとP, P不足時のNとK, K不足時のNとPの過剰吸収量は微小と推察した。一方、N, PおよびKが常に存在する培養液では、トマトはこれらの肥料要素を過剰吸収あるいは贅沢吸収する（岩本ら，1979）。すなわち、本研究からN, PおよびKがともに存在する培養液のみ、N, PおよびKの過剰吸収あるいは贅沢吸収が顕著になると推察された。

上記の結果から孤立個体トマトのN:P:Kの吸収比率は10:1:10であると推定された。この比率はトマト果実のN:P:Kの含有比率と等しい（香川，1996；細井，2001a；2003）。細井（2001a；2003）によれば、受粉（有種）果実やミニトマト果実のN含有率はやや高いが、PとKの含有率も共に上がり、果実のN:P:Kの比率は極めて安定している。さらにトマトは収穫期以後の乾物生産量とN, PおよびK吸収量の85%以上を果実に転流する（細井，2001a；2003）。果実以外の生体部分のN:P:Kの含有比率も果実と大きな差異は認められない（GERALD，1993）。これらの結果から、トマト孤立個体においては、N:P:Kの含有比率の10:1:10肥料を毎日少量ずつ施用すると、トマトの生育は最も不足する要素により制御され、Nと同様PおよびKの欠乏症状がほとんどなく、収穫果房数など生育や成熟の遅延も認められないことから、PとKは、Nと同様毎日の施用量を量的に制御すると培養液に残留なく正常なトマト栽培が可能であると推察された（Table 5, 10）。

ついで、トマトのCa吸収特性について検討した。すなわち、Mg, SおよびK, Pが基準濃度以上溶存する培養液を用い、トマト生育に必要な量のNとCaを毎日施用すると、収穫期以後の個体は、培養液にCaが溶存するにもかかわらずCa欠乏症状を示し、トマト生育量はCaの施用量に比例せず、果実生産および成育が異常となる生育特性を示した。また、トマトはCa以外の必須要素が溶存する培養液条件においてCaを全量吸収で

きなかった。これより、トマトのCa吸収特性はN、PおよびKと異なり、培養液中のCa濃度がある閾値以下の濃度では生育に必要な量を吸収できず、このときNも培養液中に残ることが示された (Table 5, 6)。

そこで、収穫期以後のトマト個体が正常に生育可能な培養液中のCa低濃度限界を求めたところ、暖候期20ppm、寒候期10ppmと指摘され、閾値は季節により異なった。培養液中のCa濃度がこの閾値濃度未満であるとトマト果実に尻腐れが発生し、生育は著しく阻害され、生長点が奇形化した (Table 7, 8, 9)。すなわち、Caが低濃度限界以下であると吸収が著しく抑制されることから、トマトのCaトランスポーターは、Ca低濃度限界以上で機能し、低濃度対応トランスポーターは無いかあるいは量的に少ないものと推定される。すなわち培養液中に低濃度限界20ppm以上のCaが溶存している条件下においてのみ日分肥施用等Caの量的制御が機能する。

トマトのMg吸収特性について検討した。すなわち、Ca、S、KおよびPが基準濃度以上溶存する培養液を用い、必要量のNとMgを毎日施用すると、収穫期以後のトマト個体は、培養液にMgが溶存するにもかかわらずMg欠乏症状を示した。トマト生育量はMgの施用量に比例せず、Mg欠乏症状は葉色異常 (渡辺, 2002) 以外にも認められ、果実の生産および生育が奇形・異常となった。さらに、トマトはMg以外の必須要素が溶存する培養液条件においてMgを全量吸収できなかった。これより、トマトのMg吸収特性はN、PおよびKと異なり、培養液中のMg濃度が低濃度であると生育に必要な量を吸収できず、このときNも培養液中に残ることが示された (Table 10, 11)。

収穫期以後のトマト個体が正常に生育可能な培養液中のMg低濃度限界を求めたところ、暖候期20ppm、寒候期10ppmであり、Mgの閾値は季節により異なり、培養液中のMg濃度がこの閾値濃度未満であると葉色異常のみでなく、トマト生育は著しく阻害され、果実は硬化生長を止め、培養液中にNの残留を認めた (Table 12, 13, 14)。これより、トマトのMgトランスポーターはMg低濃度限界以上で機能し、低濃度対応トランスポーターは無いかあるいは量的に少ないものと推定される。すなわちMgの量的制御が機能するのはCaと同様培養液中に低濃度限界20ppm以上のMg溶存を必須条件としている。さらに、培養液中のMg濃度が50ppm以上 (Table 12, 13) であるとCa吸収が阻害されることから、培養液中のMg濃度は適正範囲 (20~40ppm) が在り、トマト養液栽培における適正なMg濃度範囲は

かなり小幅であると指摘できる。

KとMgおよびCaの吸収は拮抗作用があるとされている (嶋田, 1989; 山崎傳, 1976)。そこでN、PおよびKの溶存がほとんど無い培養液において、トマトのMg低濃度限界および高濃度限界値が培養液中のCa濃度によって如何なる影響を受けるか検討したところ、Mg吸収はCa濃度の影響をほとんど受けなかった (Table 19)。すなわち、トマトのCaとMgの吸収は相互拮抗ではなく、MgのCa吸収に対する阻害・干渉作用であることが解った。さらに、Kの吸収は、適正濃度Mgが存在する養液中のCa濃度の影響をほとんど受けないことが判明した。すなわち、トマト栽培において培養液のCa濃度はMgおよびKの吸収にほとんど影響を与えないが、Mgが高濃度限界を越えるとトマトのCa吸収は著しく抑制され、培養液中のMg高濃度限界はCaの吸収阻害濃度によって決まると推察された。一方、培養液中のK低濃度限界は150ppm (SCHWARZ, 1968) とされており、この程度のK濃度はCaの吸収阻害効果はないと推察され、N、PおよびK無残留を目的とする本栽培ではKによるCa吸収抑制はないと判断した。

N、PおよびK濃度が極めて低く、Mg濃度が20~40ppmである培養液をCaCl₂を用いてECを10 (dS・m⁻¹) まで高めて栽培したところ、盛夏期においても尻腐れ果の発生は無かった (Table 19)。一般の養液栽培でECを高めると、K、MgおよびCa濃度が比例的に上がり、EC:5では栽培可能であるが、EC:6を越えると夏の若い果実は尻腐れ果となる (細井, 2000)。これより、培養液濃度 (EC) の上昇によるトマトのCa欠乏は水ストレスによるものではなく、培養液中のKとMg濃度上昇によるCa吸収阻害効果であることが判明し、夏季の尻腐れ果発生防止の端緒と防止策が策定できた。すなわち、培養液中のK濃度を低く保ち、Mg濃度を適正值 (20~40ppm) に維持し、Caを用いて適正なEC値に維持するとトマト尻腐れ果の発生はない。また、N、PおよびK濃度が極めて低く、Mg濃度が適正範囲にある培養液をCaCl₂を用いてECを10 (dS・m⁻¹) まで高めた処理区では、根とくに細根、毛細根の発達が著しかった。

トマトのS吸収特性について検討した。すなわち、培養液にCa、MgおよびK、Pが基準濃度以上溶存する条件下で、収穫期以後のトマトに必要な量のNとSを毎日施用すると、培養液からSを全量吸収した処理区、培養液のS残留濃度が極めて低い処理区において、Sの

施用量に反比例して逐次欠乏と成育異常が現れ、S の施用量とトマト収量は正比例しないことが判明した (Table 15, 16). そこで、収穫期以後のトマト個体が正常に成育可能な培養液中の S 低濃度限界を求めたところ 40ppm 程度であり、培養液中の S 濃度がこの閾値濃度未満であるとトマト生育は著しく遅れ、阻害されることを明らかにした (Table 17, 18). これより、トマトの S トランスポーター (LOPEZら, 1996; 2000) は、S 低濃度限界以上で機能し、低濃度対応トランスポーターがトマトに存在するものの量的に極めて少ないと推定される。すなわち S の量的制御が機能するのは培養液中に低濃度限界 40ppm 以上の S 溶存が必須条件である。

以上、主要肥料要素に関するトマトの吸収特性は、施用量に比例した生長量が期待可能で培養液から極めて低濃度まで吸収可能な要素 (N, P および K) と、培養液から低濃度まで吸収可能であるが、閾値濃度以下の培養液では施用量に比例した生長量は期待できない要素 (S) および低濃度までは吸収不能で、かつ閾値濃度以下の培養液では施用量に比例した生長量が期待できない要素 (Ca および Mg) に整理された。また、孤立個体において N, P および K を毎日少量ずつ施用すると、トマトの生育は最も不足する要素により制御され、N, P および K の欠乏症状はほとんどなく、生育遅延もない生育特性が認められた。これらの結果は従前の知見 (SCHWARZ, 1968) とかなり異なった。

すなわち、トマト個体群に毎日 N が施用されると培養液中における N の低濃度限界はなく、SCHWARZ (1968) が記載した N 低濃度限界 (45ppm) 以下の培養液においてトマト個体群は N 過剰の過繁茂となる。SCHWARZ (1968) は P の低濃度限界を 30ppm としたが、P を毎日施用すれば、ほとんど残留が無いほどの P 低濃度培養液において、N と K は極めて低濃度の状態まで吸収され、毎日施用する N と K 量が全吸収されると生育を律速し、P 濃度は生育の制限 (律速) 条件ではない。また、K の低濃度限界を 150ppm としたが、トマト個体群に K を毎日施用すると P や N 同様、培養液中に K の溶存がなくともトマトは正常に生育し、K の低濃度限界は認められなかった。

一方、SCHWARZ (1968) は Ca の低濃度限界を 100ppm としたが、本報では 20ppm と判明し高濃度限界は策定不能な濃度であった (Table19). SCHWARZ (1968) の Mg 濃度適正範囲は 20~75ppm とした。この数値は本試験におけるトマトの Mg 適正範囲 20~40ppm と類似結果であった。SCHWARZ (1968) の

S 低濃度限界は 50ppm、本試験のトマトのそれは 40ppm と判明した。

トマトの主要肥料各要素間の吸収比率は、果実部と茎葉部の乾物分配比率が著しく異なる品種等では再検討を要す。しかし、育苗時においては主要肥料要素の吸収特性に関し、供試した品種間に差異は認められなかった。また、トマトで得られた N の吸収特性と成育特性は、イネ科やマメ科等取り扱った植物全てにおいて類似の結果を得ている。本試験で得られたトマトの主要肥料 (N, P, K, Mg, Ca および S) 要素の吸収特性は、ウリ科 (メロン, キュウリ) も類似の結果を得ており (未発表)、ナス科全般にも適用可能と考える。

2 培養液に肥料要素 N・P・K の残留が無いトマト循環型養液栽培法の開発

a 栽培終了時の培養液に N・P・K の残留がないトマト循環型養液栽培法の開発

培養液中の Ca, Mg および S の低濃度限界を維持した培養液において、LAI:3 のトマト個体群の収穫期以後の N:P:K の吸収比率を 10:1:10 と仮定し、個体当たりの N, P および K の 3 月中の吸収量を 2 号槽はそれぞれ 1,500, 150, 1,500mg, 4 号槽は 1,600, 160, 1,600mg と推定した。この吸収量から培養液中に残存する N, P および K 量を減算して 3 月中に施用する N, P および K 量とした。2, 4 号槽に 3 月中の N 施用量の 1/30 量を 3 月 1 日から毎日機器にて施用すると共に 3 月中に施用する P と K 量を 3 月 3, 10, 17, 24 日の 4 回に分けて施用したところ、培養液中に栽培槽 2 では N, 栽培槽 4 では N, P および K の残留を認め、N, P および K の無残留化に失敗した (Table21, 22)。しかしながら、10a 当たり年間 N, P, K をそれぞれ 90kg, 9kg, 90kg を施設外へ排出するトマトのロックウール栽培と比較し、培養液 1 回分析しそれらの施用量を 1 回修正することによって、収量や品質を落とすことなく、N, P および K の排出をそれぞれ 1kg/10a 程度まで大幅な改善が可能である。

岡部 (1997) は、トマトの栽培期間に無施肥を継続すると培養液中の N, P および K は作物により全量吸収されるとした。しかし、培養液中の N, P および K のうち 1 要素が全て吸収されると他の 2 要素の吸収は著しく抑制される N, P および K の吸収特性から、岡部 (1997) の結果は施肥停止時の培養液中に作物が吸収する比率で N:P:K が溶存したと推定される。すなわち、

2, 4号槽の培養液を7日後再度分析したが, 2号槽ではKが3ppm, Nは15ppm 残留し, 4号槽はPが3ppm, Kは19ppmの残留を認め, N, PおよびKはいずれか1要素がほぼ全量吸収されると水は吸収可能であるが他の2要素はほとんど吸収されなかった (Table 21, 22).

栽培終了1ヶ月前の2月28日から7日間隔で培養液を4回分析, N, およびK施用量を4回修正処理した栽培槽3と5の各肥料要素分析値は, 3月27日に至ると培養液のN, PおよびKは4ppm以下であり2月28日に存在した培養液中のN, PおよびKはトマト個体群により全量吸収されていた. 3号槽および5号槽とも1ヶ月間に個体当たりほぼN:1,100mg, P:120mg, K:1,100mgを吸収した. すなわち, 栽培終了30日前から4回の培養液の分析結果を基礎にN, PおよびKそれぞれの施用量を量的に4回修正・調節・分施することにより, 窒素少量分施肥法を用いたトマト栽培の終了時廃液に, 主要肥料要素(N, PおよびK)が無残留の栽培法を開発した (Table 21, 22). しかしながら, 培養液分析4回, これに基づくN, PおよびK施用量の修正を個人農家に求めることは難しく, 普及機関の助力を要する培養液管理法である. 一方, 本方法よれば, 窒素少量分施肥法と同等の良質多収, かつN, PおよびKの肥料効率100%で, 施設外にN, PおよびKの排出のないトマト40t/10a取り (細井, 2003)の環境に優しい養液栽培が可能である.

b 培養液にN・P・K残留のない循環型長段トマト養液栽培の開発

低濃度限界以下であると正常なトマト成育が不能である要素(Mg, CaおよびS)は, 果実糖度を指標に培養液のEC計により調節する従来の濃度管理法を採用し, 施用量に比例した生長量が期待可能で培養液から極めて低濃度まで吸収可能な要素(N, PおよびK)は, トマト個体群の葉面積を指標に施用量を調節・分肥する定量管理を行う方法を用いて, トマト個体群の葉面積と光合成環境を好適に保ち, かつ収穫期以後の培養液にN, PおよびK残留のない良質多収・循環型養液栽培法を開始した.

本栽培法は, トマトが収穫期以後N:P:Kを一定の比率で吸収する成育特性を活用し, N, PおよびK要素をトマトの吸収比率に配合して, 光合成に最適な個体群葉面積を維持するよう毎日の施用量を増減する量的制御法を採用した. 個体群葉面積が最適葉面積指数以下であり培養液のECが3 ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)以下であると (細井,

2000), 培養液中にN, PおよびKの残留はない. 本栽培法は, N, PおよびKの肥料効率も100%であり, 栽培途中での培養液交換も不要で, 培養液の流出があっても施設外へN, PおよびKの流出がない特徴を持つ (Table 26).

栽培開始1ヶ月後, S, MgおよびCa混合液肥の原液槽において CaSO_4 沈殿が認められたので, Sを K_2SO_4 を用いてN, PおよびK肥料の原液に混入し量的制御法を用い供給し, MgSO_4 を MgCl_2 に変えて肥料要素のCaとMgは濃度制御を継続した. その結果 Cl_2 は培養液中の蓄積を加速したが, 300日後において300ppmと Cl_2 の高濃度限界600ppm (SCHWARZ, 1968)にあり, またNaClを培養液に加えるトマト高糖度養液栽培法の存在, トマトの耐塩性などから判断すると, CaCl_2 と MgCl_2 の利用も可能と断定した.

7月15日における栽培槽2~5の培養液分析結果では, P残留が無くNとKがわずかであるが残留した. そこで8月1日からN:P:K比率を10:1.1:11, 10:1.2:12, 10:1.3:13の処理区を設定し栽培を継続したところ, 10月15日の培養液分析結果では, N:P:K比率10:1.1:11区ではPの残留がなく, NとKは10:1:10と同様残留した. 10:1.2:12および10:1.3:13においては, N残留はわずかであったが, Pが1.6ppm, Kは3.3ppmとNと比較しやや高い濃度を示した. そこで, 3~5号栽培槽は11月から施用するN:P:Kの比率を10:1.2:11に変えた. さらに, N, PおよびKが著しく低濃度の培養液におけるCaとMgの拮抗作用の解析結果が判明し (Table 19), 11月以後は MgSO_4 を用いSとMgをNのそれぞれ1/17, 1/22施用する量的施用に切り替えた. したがって, 11月からの3~5号栽培槽のEC制御は CaCl_2 養液を用いて管理した.

培養液にN, PおよびK残留のないトマト栽培を可能とする栽培システム概念図をFig.1に, この改良した栽培システムに用いる肥料とその組成をTable 27に示した.

本システムは一般の養液栽培システム (岩本ら, 1997)に, 稼働時間制御タイマー, 定量ポンプ, 肥料原液タンクを付加した. システムの稼働方法は以下の手順で行う.

①養液タンクと栽培槽の培養液ECを0.7~1まで制御可能な量の肥料原液C ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)を準備し, EC制御付き培養原液タンクに入れる.

②栽培システム (EC制御)を直ちに稼働し養液タンクと栽培槽の培養液ECを肥料原液Cを用い0.7~1.0程度

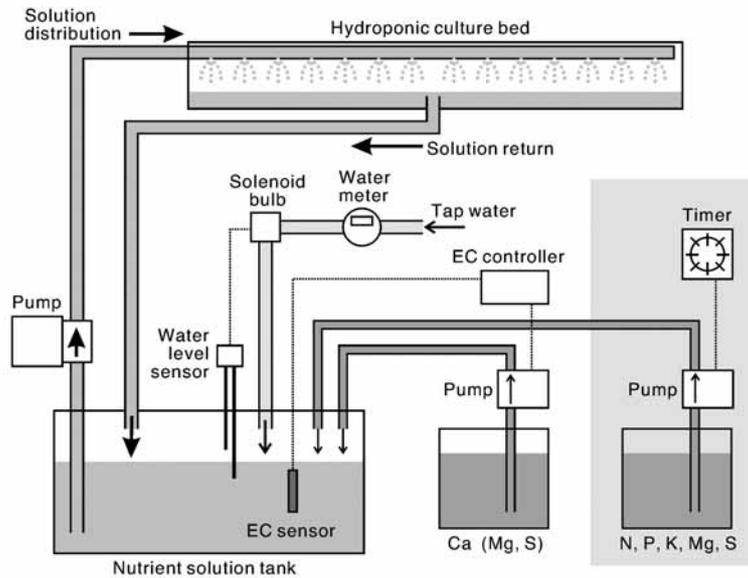


Fig. 1 System of tomato hydroponic cultivation to ensure that no N・P・K manure elements remain in the culture solution.

Table 27. Mineral content and composition of the liquid fertilizer (solutions A, B and C).

		in 20 l of solution				in 60 l of solution		Mineral content of solution
		KNO ₃	NH ₄ NO ₃	(NH ₄) ₂ HPO ₄	MgSO ₄ ·7H ₂ O	CaCl ₂ ·6H ₂ O	MgSO ₄ ·7H ₂ O	
Quantity of salts		2019g	923g	397.2g	315.3g			
Solution A	N	13.99 ¹⁾	16.16	3.65				33.8 mg/cc
	P			4.05				4.05mg/cc
	K	38.97						38.9 mg/cc
	S				2.04			2.04mg/cc
	Mg				1.54			1.54mg/cc
Quantity of salts						9.120kg		
Solution B	Ca					27.7		27.7 mg/cc
Quantity of salts						2.255kg	4.255kg	
Solution C	Mg						7.00	7.00mg/cc
	Ca					6.92		6.92mg/cc
	S						9.27	9.27mg/cc

1) mg/cc

に制御し，Ca，Mg および S の低濃度限界を満たす。

③ pH 自動調節器は 1 日 1 回 30 分程度稼働させ，Ca(OH)₂ と H₂SO₄ を用い培養液 pH を 5 とする。

④ 肥料原液 A を用意し，所定の培養原液タンクに入れる。

⑤ 第一花房開花期の苗を移植後，個体当たり 5mg の窒素量が毎日施用されるよう肥料原液 A を供給する定量ポンプ稼働時間を調節する。

⑥ 肥料原液 C の使用完了後，肥料原液 B を用意し EC 制御付き培養原液タンクに入れ培養液の EC 管理に用いる。

この栽培システムを用いると，肥料原液 C 使用中の

培養液の EC は Ca，Mg，S および Cl の濃度を示す。

肥料原液 B の使用に至ると，Ca 濃度は果実糖度を指標に EC で管理される。トマトの吸収比率に調査された N，P，K，Mg および S を含む肥料 A を個体群の最適葉面積を指標に量的制御を用いて栽培すると，N，P および K の施用量と吸収量が均衡しトマト個体の生育量が制御され，それに伴い Mg : S の吸収量（施用量）も均衡するよう量的に制御されており，培養液中の Mg と S 濃度は安定して推移する。すなわち，培養液の N，P および K の残留はなく，Mg，S の残留濃度と比率は変わらず，Ca 濃度は培養液 EC によりモニターされる結果，

本システムでは周年培養液分析から解放される。

孤立個体では、地下部の主要肥料量がトマトの生育・収量の制限要因である (Table 1, 3)。すなわち、SCHWARZ (1968) の示した各要素の低濃度限界がトマト生育を律速する。一方、地下部 N, P および K 量により、葉面積指数 (LAI) が 3 に制御された個体群の収量は、LAI:3 に相当する光合成量により支配され LAI:4 の個体群と比較し少ない (Table 20, 23)。N, P および K 無残留個体群の目標 LAI を 4 にするならば、さらに増収が期待できる。すなわち、LAI が 3 以上の高さ 3m トマト個体群においては、地下部環境に支えられつつ地上部条件の LAI により収量水準が決定される。

LAI:3 であっても、N:P:K の 10:1.3:13 肥料を 2 ヶ月施用後 10:1.2:11 肥料に切り替え施用した栽培槽 5、および P と K 十分区の栽培槽 1 の収量は、N:P:K 比率が 10:1:10 肥料を継続施用した栽培槽 2 と比較し僅かであるが多い。すなわち、トマトの P や K の吸収は著しい低濃度であると吸収に負担 (MAATHUISら, 1993) があり、これが十分満たされないと個体群の活性は低下し、光合成量はやや減少するものと推定される。栽培槽 1 と 2 の収量差は地下部 P と K 環境の収量に及ぼす影響を示すが、個体群の収量決定要因ではない。すなわち、個体群の収量水準は光合成量 (好適葉面積の維持) によって決まる。しかしながら、P と K が培養液に若干残る程度の N:P:K 比率の肥料を用いることが増収や耐病性強化に有利と推察される。

一方、個体群で栽培されるトマトにおいて、N, P および K が培養液中に恒常的に溶存し、EC が 3 以下の栽培条件では、たとえ N 濃度が低くとも、この個体群はいずれ過繁茂に至り (森次ら, 1981; 細井, 2000)、過繁茂個体群の収量は低減し、品質も低下する (細井, 2001a)。

トマト個体群は、孤立個体同様、N, P あるいは K を少量ずつ毎日施用すると、生育は最も不足する要素により制御され、N, P および K の欠乏症状はほとんどなく (Fig. 2)、生長速度も変わらず栽培終了期を迎える (Table 24, 25)。なお、肥料原液 A を過剰に施用投入した場合 (EC:5 以下) が一般の養液栽培であり (岩本ら, 1997)、肥料原液 C を過剰に施用するとトマト高糖度栽培に変わる。この場合にも穏やかな EC 変化であると尻腐れ果発生のないことが本栽培法の特徴である (Table 19)。すなわち、量的制御を用いて培養液中の Mg 濃度を 20~40ppm に制御し、CaCl₂ を用い培養液の EC を逐次上げてトマトの水分ストレスを調節する

手法を用いると、盛夏期の高糖度トマト栽培も可能である (Fig. 3)。

個体群の好適葉面積指数 (LAI:3) を指標とする N 量的制御と N, P, K, Mg および S の量的制御によって栽培されたトマトは、生育速度 (茎長, 主茎葉数, 収穫果房数) や収量構成要素 (1 果重, 良果率, 果房当たり果数, 収穫果房数) に大きな差異は無かった (Table 24)。すなわち、N, P および K をバランス良く毎日施用すると、培養液中に N, P および K 残留が無くとも個体群の生育速度や収量構成要素について、N 量的制御 (P と K 潤沢) との差異はほとんど無いと指摘できよう。また、乾物生産量の N 量的制御と N, P, K, Mg および S 量的制御栽培の差異は 5%以内であり、乾物の果実への転流比率には差異が無かった (Table 25)。一方、栽培槽 2~5 の N, P, K, Mg および S 量的制御栽培の根重は、栽培槽 1 の N 量的制御栽培と比較し明らかに重く、N, P, K, Mg および S 量的制御栽培は根の生育量が増す栽培法と指摘できる。植物を N 濃度の低い培養液で栽培すると N 高濃度条件と比較し根長、根量ともに増加する。培養液中の N, P および K の濃度が低いと N 低濃度栽培と比較し、さらに根の成長促進が起きることを示唆する。すなわち、N, P および K 残留がない栽培法を用いるには、従来の栽培床より容積の大きい栽培床を必要とする。

根量の増加は Ca による高 EC 区にも顕著に認められ (Table 19)、高濃度 Ca と低濃度 N, P および K 栽培はともに根量の増加を促進し、栄養素や水の吸収促進に寄与し、盛夏期の強日射・高温条件下にあっても尻腐れ果の発生を強く抑制する。なお、Mg が 20~40ppm, S が 50~100ppm 程度と推定される培養液において、EC:1 の比較的低い Ca 濃度区から EC:10 の高濃度まで正比例的なトマト根量の増加を認めた。水ストレス以外の Ca 濃度に対するトマト根反応と低濃度 N, P および K に対する根反応は、塩濃度に対し逆反応である。

Table 27 に示したトマト栽培用肥料 A と B の取扱に問題はない。肥料 C は、MgSO₄・7H₂O を 4.255kg 溶かした 30 l の培養液原液、CaCl₂・6H₂O を 2.255kg 溶かした 30 l の培養液原液をそれぞれ用意し、合わせて 60 l の培養液原液 C を作る。培養液原液中の MgSO₄・7H₂O や CaCl₂・6H₂O の濃度を上げると CaSO₄ が形成され沈殿する。また、長期に保存すると CaSO₄ が形成されるので短期間に使いきる。

トマトの初期生育時に認められる肥料要素の吸収に伴う培養液の強酸性あるいは強アルカリへの移行防止は、



Fig. 2-1 Tomatoes cultivated in solutions that had no remaining manure elements N, P and K in the culture solution (N : P : K, 10 : 1 : 10 and Plant height 2.5m, LAI 2.7, 2003/6/19).



Fig. 2-2 Tomatoes cultivated in solutions that had no remaining manure elements N, P and K in the culture solution (N : P : K, 10 : 1.2 : 11 and Plant height 3.0m, LAI 3.3, 2003/12/15).



Fig. 3 Tomatoes cultured by the method of daily quantitative regulation of NPK and the culture solution in which the concentration of Mg was 20 ppm (left) or 40 ppm (right), and in which the EC was changed by using a CaCl_2 solution from 1 to 10 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (2003/12/8)

窒素供給源の NH_4NO_3 の一部を NaNO_3 あるいは HNO_3 に変えて対応する。肥料要素の残留を抑制し、pH 制御に伴う酸およびアルカリの培養液への投入を抑制した本栽培法は、個体当たり培養液量 8ℓ を用いると培養液の交換なく 1 年間栽培可能である。

本システムを参考に、ロックウール養液栽培等一般養液栽培システムを簡単に改造活用し、個体群の好適 LAI を指標に NPKMgS 肥料 (肥料 A) と Ca 肥料 (肥料 B) を量的制御し毎日施用すると施設からの廃液由来する肥料成分の排出の画期的な削減と増収、高品質化が期待できる。

培養原液 A と B および細井 (2001b) が開発した装置を用いて、N、P および K 残留がないトマト養液栽培の手法を養液土耕栽培に応用すると、施設土壌に主要肥料要素 (N, P, K, Mg, S, Ca) の残留が極小で灌漑水が節約され、個体群の葉面積が好適に制御されたトマト良質多収栽培が可能である (細井未発表)。施設土壌に肥料成分無残留の持続可能なトマト栽培が本研究の最終目標である。

一方、N、P および K の残留がないトマト養液栽培

の手法は、養液栽培による葉菜類や幼果実の硝酸塩低減化技術に応用可能で、従来の養液栽培法と比較し収量水準を変えずに作物体の硝酸塩濃度を大幅に減らすことができる (細井未発表)。また、各肥料要素を量的制御する養液土耕栽培 (細井, 2001b) を行えば、異種類の作物に関し硝酸塩低減化とともに肥料要素の施設土壌残留の画期的な減量化および施設土壌の塩類バランス改良が可能である。

なお、本養液栽培を他作物に応用するためには、①トマトの主要肥料要素の吸収特性が他の作物において成立するか否か、Ca, Mg および S の培養液中の低濃度限界 (閾値) が他の作物ではどのように変化するか等の解析が必要であり、②各作物の生育推移に伴う主要肥料要素の吸収比率の変動についての解析も待たれる。また、N, P および K の日分肥施用量の指標に関し、③光競合が生育を律速する作物 (野菜) については光合成に好適な葉面積水準の解析が必要であり、④独立個体 (光競合の無い) 条件で栽培する作物は、N, P および K の日分肥施用量に関する指標開発が必要である。

根圏制限が可能な養液土耕に応用し、N, P および K

要素の残留がなく、Ca、Mg および S 要素の適正残留量の維持が可能な施設土壌環境に優しい野菜栽培を確立するためには、⑤N、P、K、Ca、Mg および S に関する土壌中の適正な含有量（渡辺，2002）および各要素間の適正比率の解析が要求されよう。

V 摘 要

1) Ca、Mg、S および K が基準濃度以上溶存する培養液を用い、トマトに N：10mg と P：0.125～4mg を毎日施用すると、収穫期以後の個体は、N：P の含有比率が 10：1 であると N と P を極低濃度まで吸収した。Ca、Mg、S および K が基準濃度以上溶存する培養液を用い、施肥する N/P が >10 であると P の施用量が、その比率が <10 であると N の施用量がトマト生育量を律速した。

2) Ca、Mg、S および P が基準濃度以上溶存する培養液を用い、トマトに N：10mg と K：0.75～24mg を毎日施用すると、収穫期以後の個体は、N：K 含有比率が 1：0.6 であると N と K を極低濃度まで吸収した。Ca、Mg、S および P が基準濃度以上溶存する培養液を用い、施用する N/K が >1 であると K の施用量が、その比率が <1 であると N の施用量がトマト生育量を律速した。

3) Mg、S、K および P が基準濃度以上溶存する培養液を用い、トマトに N：10mg と Ca：0.1～3.2mg を毎日施用すると、収穫期以後の個体は、培養液に Ca が溶存するにもかかわらず Ca 欠乏症状を示し、果実生産および成育が異常となり、トマト生育量は Ca の施用量に比例しなかった。

収穫期以後のトマト個体が正常に成育可能な培養液中の Ca 低濃度限界は、暖候期 20ppm、寒候期 10ppm と季節により異なり、トマト成育は培養液中の Ca 濃度がこの閾値濃度未満で著しく阻害された。

4) Ca、S、K および P が基準濃度以上溶存する培養液を用い、トマトに N：10mg と Mg：0.15mg～4.8mg を毎日施用すると、収穫期以後の個体は、培養液に Mg が溶存するにもかかわらず Mg 欠乏症状を示し、トマト生育量は Mg の施用量に比例しなかった。

収穫期以後のトマト個体が正常に成育可能な培養液中の Mg 低濃度限界は、暖候期 20ppm、寒候期 10ppm と季節により異なり、トマト生育は培養液中の Mg 濃度がこの閾値濃度未満で著しく阻害された。また、培養液中の Mg 濃度が 50ppm 以上であると Ca 吸収が阻害さ

れ、培養液中の Mg は高濃度限界の存在が示唆された。

5) N、P および K が極めて低濃度の培養液においてトマトの Ca と Mg 吸収の拮抗作用を検討したところ、Mg と K の吸収は Ca の濃度にほとんど影響されなかった。すなわち、Ca と Mg あるいは K の吸収は相互拮抗ではなく、Ca 吸収に対する Mg あるいは K の阻害・干渉作用であることが解った。

また、Mg 濃度を 20ppm あるいは 40ppm、N、P および K 濃度が極めて低い培養液を CaCl₂ を用いて EC：10 まで高めトマトを栽培したところ、盛夏期にも尻腐れ果の発生は無かった。すなわち、EC 上昇によるトマトの Ca 欠乏は、水ストレスによる Ca 吸収阻害より、培養液中の Mg あるいは K 濃度の上昇による Ca 吸収阻害効果であることが判明した。

6) 培養液に Ca、Mg、K および P が基準濃度以上溶存する条件下で、収穫期以後のトマトに N：9mg と S：0.34～18.9mg を毎日施用すると、培養液から S を全量吸収した処理区と培養液に S が残留した処理区においてトマト個体は S 欠乏症状を示し、S 施用量に反比例して逐次欠乏と成育異常が現れ、S 施用量とトマト収量は正比例しなかった。

収穫期以後トマト個体が正常に生育可能な培養液中の S 低濃度限界は 40ppm 前後である。培養液中の S 濃度がこの閾値濃度未満であるとトマト生育は著しく遅れ、阻害された。

7) 主要肥料要素に関するトマトの吸収特性は、施用量に比例した生長量が期待可能で培養液から極低濃度まで吸収可能な要素（N、P および K）と、培養液から極低濃度まで吸収可能であるが、閾値濃度以下の培養液では施用量に比例した生長量は期待できない要素（S）および低濃度までは吸収不能で、かつ閾値濃度以下の培養液では施用量に比例した生長量が期待できない要素（Ca と Mg）に整理された。また、孤立個体において N、P あるいは K を毎日少量ずつ施用すると、トマトの生育は最も不足する要素により制御され、N、P および K の欠乏症状はほとんど認められなかった。

8) トマト栽培終了 30 日前から培養液の 7 日間隔 4 回の分析結果を基礎に N、P および K の施用量を 4 回修正し、毎日施用する方法を採用すると、窒素少量分施肥を用いたトマト栽培終了時の廃液から N、P および K 全量を吸収可能で Ca、Mg および S の残留量も僅かである。しかも、窒素少量分施肥と同等の良質多収、かつ N、P および K の肥料効率が 100% の環境に優しいトマト養液栽培が可能である。

9) 培養液に N, P および K の残留がないトマト循環型周年養液栽培は以下の方法による。①培養液中の濃度が閾値以下であると正常なトマト生育が不能な要素 (Mg, Ca および S) に対応するため, 果実の Mg:Ca:S 含有比率に調合した肥料 C を用意する。肥料 C を用い培養液 EC を 0.7~1.0 に上げ, 各要素の低濃度限界を満たした栽培槽にトマト苗を定植する。②収穫期以後主要肥料要素を一定の比率で吸収するトマトの生育特性を活用し, N, P, K, Mg および S 要素をトマトの吸収比率に配合した肥料 A を用意する。光合成に最適な個体群葉面積を指標に肥料 A の施用量を調節し, 量的管理法により毎日施用する。③培養液の EC は, Ca 肥料 B を用い果実糖度を指標に, EC 計による濃度管理法を用いる。④ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と H_2SO_4 を用い培養液の pH を 1 日 1 回, 5~6 に調整する。

10) 10a 当たり 3.5~4 千個体を定植して果実数を確保し, 個体群葉面積を光合成に好適な水準に維持し, 個体当たり 8 l の培養液の EC を 1~3 に保てば, N, P および K の肥料効率が 100% の環境に優しく, 年間収量 25~30t の良質・多収トマト養液栽培が成立する。すなわち, 定植から栽培終了までの培養液中に N, P および K 残留 (水道水以下の濃度) が無く, 培養液流出事故があっても N, P および K の流出はない。また, 培養液中の S と Mg 濃度は安定し過度の残留蓄積も無く, 主要要素は毎日施用され欠乏することは周年なく, 培養液分析や培養液交換も年間不要である。

Ca 肥料を用いて培養液の EC を逐次可変し, トマトの水分ストレスを調節する手法を用いると高糖度 (Brix 8) トマト栽培も可能である。

引用文献

- 1) GERALD E.W. (1993): Tomato. Editer by W. F. BENNETT, Nutrient Deficiencies & Toxicities In Crop Plants. APS PRESS. St. Paul Minesota USA, 137~141.
- 2) 細井徳夫 (1997): トマト個体群の持続的維持が可能な葉面積調査法. 農業気象東海支部会誌, 55, 13~16.
- 3) 細井徳夫 (2000): 窒素少量分施による養液栽培トマトの葉面積制御. 野菜・茶試研報, 15, 79~93.
- 4) 細井徳夫 (2001a): 養液耕による施設栽培長段トマト個体群の収量に好適な葉面積指数に関する研究. 野菜・茶試研報, 16, 329~349.
- 5) 細井徳夫 (2001b): トマト個体群葉面積の適正制御が可能
- な養液土耕装置の開発. 野菜・茶業成果情報, 12 年度, 1~2.
- 6) 細井徳夫 (2003): 葉面積を 4 水準に制御した樹高 3m トマト個体群の収量解析. 野菜茶研報, 2, 245~265.
- 7) 岩本恒夫・高梨恒夫・赤松達夫 (1997): 養液栽培装置. 施設園芸の環境制御技術. 誠文堂新光社, 東京, 187~207.
- 8) 香川綾 (1996): 日本食品標準成分表 (トマト), 四訂日本食品成分表. 女子栄養大学出版部. 東京, 350~351.
- 9) 茅野充・篠崎泰子 (1989): 養液栽培における陰イオン吸収の問題. 養液栽培と植物栄養. 日本土壌肥料学会編, 博友社, 東京, pp.85~102.
- 10) LOPEZ, J., BELL, C.I., TREMBLAY, N., DORAIS, M., GOSSELIN, A., and ZEKKI, H. (2000): Sulphate uptake and translocation in tomato seedlings in response to sulphate level in the nutrient solution. Proc. Int. Conf. and British-Israeli. Workshop on Greenhouse Tech. towards 3rd Mill. Eds. M. Teitel. B. J. Bailey Acta Hort. 534, ISHS.
- 11) LOPEZ J., TREMBLAY N., VOOGT W., DOBE S. and GOSSELIN A., (1996): Effect of Varying sulphate concentrations on growth, physiology and yield of the greenhouse-tomato. *Scientia Horticulturae*. 67, 207~217.
- 12) MAATHUIS FJM, SANDER D (1993): Energization of potassium uptake in Arabidopsis thaliana. *Planta*. 191, 302~307.
- 13) MAATHUIS FJM, SANDER D (1996): Mchanisms of potassium absorption by higher plant root. *Physiol. Plant*. 96, 156~168.
- 14) 三村徹郎 (1999): 植物とリン環境の関わり合い. 植物の環境応答. 細胞工学別冊 12, 秀潤社, 東京, 191~199.
- 15) 森次益三・川崎利夫 (1981): 作物生育ならびに無機養分吸収に及ぼす窒素源の影響. 土肥誌, 52, 20~26.
- 16) 中野明正・上原洋一・山内章 (2001): 養液土耕法による根圏ストレス軽減がトマトの尻腐れ果発生を軽減する. 土肥誌, 72(3), 385~393.
- 17) 岡部勝美 (1997): 「ナッパラランド」システムー環境負荷軽減についてー. 第 33 回 養液栽培研究会. 17~18.
- 18) 岡野邦夫・坂本有加・渡邊慎一・中島武彦 (1999): 廃液の再利用による閉鎖型養液栽培システムの確立. 生環調, 37, 63~71.
- 19) 大柴大輔 (1999): リン酸吸収の分子機構. 細胞工学別冊 12, 秀潤社, 東京, 200~206.
- 20) 小俣達夫 (1999): 植物の硝酸イオントランスポーター. 植物の環境応答. 細胞工学別冊 12, 秀潤社, 東京, 184~186.
- 21) SCHWARZ, M. (1968): Soilless Culture Management, Advanced Series in Agricultural Sciences 24, Springer, 179.
- 22) 島田典司 (1989): 培地の K, Ca, Mg のバランスと植物生育. 養液栽培と植物栄養. 日本土壌肥料学会編, 博友社, 東京, pp55~84.
- 23) 渡辺和彦 (2002): 原色 野菜の要素欠乏・過剰症. 農山漁村文化協会. 東京, 1~124.
- 24) 山崎傳 (1976): 無機要素の相互関係. 微量元素と多量要素. 博友社, 東京, pp54~60.

Liquid Cultivation of Tomato Plants by Daily Control of Fertilizer Application in which There Are no N/P/K Residues in the Culture Solution and the Area of the Leaf Groups Is Used as an Indicator

Norio HOSOI and Tatsuo HOSONO

Summary

1) When N: 10 mg and P: 0.125 - 4 mg were applied daily to tomato plants using a culture solution containing Ca, Mg, S and K in more than the standard concentrations, each plant after harvesting time absorbed N and P to extremely lower concentrations when the N: P ratio was 10:1. When a culture solution containing Ca, Mg, S and K in more than the standard concentrations was applied, the amount of P applied was rate-determining to the growth of tomato when N/P was > 10 , and the amount of N applied was rate-determining when it was < 10 .

2) When N: 10 mg and K: 0.75 - 24mg were applied daily to tomato plants using a culture solution containing more than the standard concentrations of Ca, Mg, S and P, individual plants after harvesting time absorbed N and K to extremely lower concentrations when the N: K ratio was 1:06. When a culture solution containing Ca, Mg, S and P in more than the standard concentrations was applied, the amount of K applied was rate-determining to the growth of tomato when N/K was > 1 , and the amount of N applied was rate-determining when it was < 1 .

3) When N: 10 mg and Ca: 0.1 - 3.2mg were applied daily to tomato plants using a culture solution containing Mg, S, K and P in more than the standard concentrations, individual plants after harvesting time showed symptoms of Ca deficiency, even though Ca was present in the culture solution. Moreover, the production of fruit and growth was abnormal and the growth of plants was not parallel to the amount of Ca applied. The lowest threshold value of Ca in the culture solution in which tomatoes could grow normally after harvesting time was different by season, being 20 ppm during mild periods and 10 ppm during cold periods, and the growth of tomato plants was considerably inhibited in the culture solution containing Ca in a concentration less than the threshold value.

4) When N: 10 mg and Mg: 0.15 - 4.8mg were applied daily to tomato plants using a culture solution containing Ca, S, K and P in more than the standard concentrations, individual plants showed symptoms of Mg deficiency and the growth of plants was not parallel to the amount of Mg applied, even though Mg was present in the solution. The lowest threshold value of Mg in a culture solution in which tomato plants could grow normally after harvesting time was different depending on the season, being 20 ppm during mild periods and 10 ppm during cold ones, and the growth of plants was inhibited considerably in a culture solution containing Mg less than the threshold value.

When the concentration of Mg in a culture solution was more than 50 ppm, the absorption of Ca was inhibited, showing possible presence of the highest limit of concentration of Mg in a culture solution.

5) Competitive absorption of Ca and Mg by tomato plants in a culture solution containing N, P and K in extremely lower concentrations was examined. As a result, the absorption of Mg and K were hardly affected by the concentration of Ca. It was shown that the absorption of Ca, Mg and K were not competitive with one another, but that there was inhibition/interference action by Mg or K to Ca absorption.

When tomato plants were cultured in a solution containing Mg in 20 or 40 ppm and N, P, and K in extremely lower concentrations and the EC value was elevated to 10 with CaCl₂, no occurrence of *shiri-gusare* fruits (fruits rotten in the rear) was observed, even in mid-summer. It was recognized that the Ca deficiency of tomato plants by the increase of EC was caused by the inhibition of Ca absorption due to the increase of Mg or K in the culture solutions rather than by the inhibition of Ca absorption due to water stress.

6) When N: 9 mg and S: 0.34 - 18.9mg were applied daily to tomato plants after harvesting time under the condition that Ca/Mg and K/P were present in more than standard concentrations in the culture solution, individual plants showed symptoms of S deficiency in the plot where S was absorbed completely and also in the plot where S remained in the culture solution. The S deficiency and abnormal growth were observed to be gradually in inverse proportion to the amount of S applied, and the amount of S applied was not proportional to the yield of tomato fruit.

The lowest threshold concentration of S in the culture solution enabling tomato plant to grow normally after harvesting time was about 40 ppm. When the concentration of S in a culture solution was lower than the threshold value, the growth of tomato plant was retarded considerably and inhibited.

7) The absorption characteristics of tomato plants for major fertilizer elements may be summarized as follows.

N/P/K: Growth proportional to the amount applied is expectable and they are absorbable to extremely lower concentrations from the culture solution.

S: Absorbable to extremely lower concentrations from the culture solution, but growth proportional to the amount applied is not expectable for a culture solution containing the element at less than the threshold value.

Ca/Mg: Not absorbable to lower concentrations, and growth proportional to the amount applied is not expectable for a culture solution containing less than the threshold values of these elements.

When small amounts of N, P and K were applied daily to individual plants, the growth was controlled by the element lacking most, and symptoms for N, P and K deficiency were scarcely observed.

8) The amounts of N, P and K were regulated on the basis of analyses of the culture solution 4 times at 7-day intervals from 30 days before the end of cultivation, and the regulated amounts were applied daily. Under the above conditions, the whole amount of N/P/K was absorbable from the culture solution wasted after the end of cultivation in the Application Method of Nitrogen Distributed in Small Portions (the NDSP Method), and scarce amounts of Ca/Mg/S remained in the culture solution. Moreover, liquid cultivation of tomato plants that is friendly to the environment

with 100% fertilizing efficiency for N/P/K, equivalent to the NDSP Method, was attainable.

9) Yearly liquid-circulating cultivation of tomato plants without residual N/P/K in the culture solution can be accomplished by the following methods.

(1) Prepare Fertilizer C with Mg/Ca/S content in compliance with those in the fruit because normal growth of tomato plants is not attainable if the concentrations of these elements in the culture solution are less than the threshold values. In order to attain the lowest threshold value of each element, tomato seedlings are planted in cultivation cells containing Fertilizer C with EC values raised to 0.7 - 1.0. (2) Prepare Fertilizer A in which the N/P/K/Mg/S elements are combined in compliance with the absorption ratio by tomato plants, utilizing the growth characteristics of tomato plants, which absorb the major elements of fertilizers in a definite ratio after harvesting time. Regulate the amount of Fertilizer A applied daily, making use of the area of the leaf groups in individual plants most suitable to photosynthesis as an indicator, and apply it daily in accordance with the Quantity-control Method. (3) Regulate the EC value of the culture solution with Ca Fertilizer B by the use of an EC meter and making use of the sugar degree (Brix) of the fruit as an indicator. (4) Regulate the pH of the culture solution to 5 - 6 once a day with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and H_2SO_4 .

10) Liquid cultivation of tomato plants that is friendly to the environment, with 100% fertilizing efficiency for N/P/K and high productivity yielding 25 - 30t of good tomato fruits yearly, can be accomplished if 3500-4000 plants are planted per 10a to secure the number of fruits, if the area of the leaf groups in individual plants is kept at a level suitable to photosynthesis, and an EC value of 8 L of culture solution per individual plant is maintained at 1 - 3. Thus, there is no residual N/P/K in the culture solution (less than in tap water) from planting to the end of cultivation, and there is no drainage of N/P/K in incidence of overflow of the culture solution. Moreover, the concentrations of S and Mg in the culture solution are stable, excess accumulation of residues is not present, the major elements are applied daily without causing deficiency throughout the year, and analysis and exchange of the culture solution are not required throughout the year.

The cultivation of tomato plants with a high sugar degree (Brix 8) is attainable if the EC value of the culture solution is altered with Ca fertilizer and the water stress of tomato plants is controlled.