高濃度培養液を用いる高糖度トマト生産に適した 循環キャピラリー栽培システムの開発

大石直記¹・守谷栄樹²

¹ 静岡県農林技術研究所 438-0803 磐田市富丘 678-1

² 中部電力エネルギー応用研究所 459-8522 名古屋市緑区大高町字北関山 20-1

Development of a Recirculating Capillary Culture System for High Soluble Solids Tomato Production using a Higher Concentration Nutrient Solution.

Naoki OHISHI¹ and Hideki MORIYA²

¹Shizuoka Prefectural Research Institute of Agriculture and Forestry, Iwata, Shizuoka 438-0803, Japan

²Energy Applications R&D Center, Chubu Electric Power Co., Inc. Nagoya, Aichi 459-8522, Japan

Abstract

In order to recycle a higher concentration nutrient solution (HCNS) for high soluble solids tomato production, a new recirculating capillary culture system (RCC system) was developed and certain characteristics of the system were investigated. The RCC system used the irrigation method with a drip tube and two capillary mats (CM) connected to a fertigation gutter. The tomato root zone was restricted using a root protection bag (RPB; made of a root protection sheet) inserted between the upper and lower CM. The total amount of nutrient solution supply using CM was changed only 0.45-0.70 L RPB⁻¹ (for 5 minutes), supplying 2-12 L min⁻¹ water for the fertigation gutter. By dividing the mineral components of HCNS in basic nutrient solution (BNS: NO₃-N, P, K, minor elements, EC1.8 dS m⁻¹) in order to supply nutrients in response to the plant growth stage, and stress nutrient solution (SNS: Mg, Ca, Na) to control water stress, these nutrient solutions were irrigated to the RPB by drip tube and CM, respectively. The surplus drainage solution from RPB was recycled as SNS with EC control. Tomatoes were grown under two EC levels (2.0, 6.0 dS m⁻¹) in SNS in the RCC system and pot system irrigated with HCNS (EC 4.0 dS m⁻¹). In triple-truss cultivation using the RCC system, high Brix fruits (higher than 9%) were successfully harvested with recycling of all drainage solutions. Thereafter, the top fresh weight, dry weight, leaf area and marketable yield of EC6 in SNS were lower than that of EC2; Brix of tomato fruit from EC6 treatment was higher than that from EC2. There was no difference in plant growth, marketable yield and Brix of tomato fruits between the pot system and RCC system (EC2).

Keywords: basic nutrient solution, capillary mat, root protection bag, stress nutrient solution

緒 言

2007 年 6 月 15 日受付

2008 年 4 月 11 日受理

Corresponding author: Naoki Ohishi
(Naoki1_ohishi@pref.shizuoka.
lg.jp)

トマト果実の糖度は、その肥大過程における継続的な水分
ストレスの付与により上昇することが知られている¹⁾。近年、養
液栽培の持つ養水分制御機能を活かして、高糖度トマト生産

のための様々な栽培方式が提案されている²⁻⁶⁾。しかし、実際のトマト栽培過程では作物体の水分ストレスが天候や培地水分などにより時々刻々変動するため、過度な水分ストレスが生じると着果数の減少や小玉化による著しい減収が生じ、水分ストレスが小さいと果実糖度が上昇しないことから、適度な水分ストレスを安定して付与できる養液栽培システムの開発が必要となっている。一方、最近のトマトの養液栽培では環境負荷を軽減させるために余剰培養液の循環システム⁷⁾や非循環式の閉鎖型栽培システム⁸⁾の開発が行われている。今後、高糖度トマト生産を発展させるためには、栽培システムの具備条件として使用済み培地の削減や培養液廃液の抑制に関するアプローチが不可欠と考えられる。

一般的にトマト果実の糖度を向上させるためには、培地量の削減や根域を小さく制限する栽培方式が採られている。これは給液後短時間で根域を低水分にすることにより確実な水分ストレスを付与できるが、培地量を減らすほど水分ストレスの変動が激しいため高精度の給液制御が要求される。したがって、培地を用いなくても安定した水分ストレスを付与することができるキャピラリーマット（以下、CMと呼ぶ）と遮根シートを組み合わせた給液方式が検討されている^{4,5)}。これは、CMの有する毛管作用により培養液を根域に少しずつ供給する手段として有効であるが、栽培条件によっては作物の吸水量が供給量を上回り過度な水分ストレスが生じる可能性が指摘されている^{9,10)}。したがって、CMの特性を活かして根域へ安定的に培養液を供給できるとともに、栽培管理により適度な水分ストレスを付与できる根域制限・給液方式の開発が必要と思われる。

一方、トマトの果実糖度を上昇させるための培養液管理法として、慣行のトマト栽培用培養液よりEC (Electric Conductivity) を高めた高濃度培養液が用いられる。これは、培養液の浸透ポテンシャルを低下させることにより作物体の吸水を抑制する効果があり¹¹⁾、根域が多水分であっても所定の水分ストレスを付与することができる。したがって、特に根域が小さく水分変動が生じやすい栽培方式では、高濃度培養液の利用との組み合わせにより、安定した水分ストレスの付与に基づく果実糖度の向上が可能になると考えられる。

通常、高濃度培養液は作物による肥料成分の吸収濃度に合わせた既存の培養液処方に、吸収されにくい成分(NaCl^{5,11)}、海水⁶⁾、あるいは多量に添加しても栽培上支障の少ない成分(KCl, CaCl₂, MgSO₄など^{2,3)})を作物の吸収量以上に増量することによって作成される。このように、培養液を構成する全成分の濃度を高めるのではなく特定の成分のみを増量・添加する理由として、トマトを正常に生育させるために培養液中のN、Pや微量元素を適正濃度に維持すべきことや経済性を考慮して価格の安い塩類が選択されたこと

などが考えられる。

しかし、高濃度培養液を利用した高糖度トマト生産では、①添加・増量した成分の濃縮により栽培過程を通じて培養液のECが急激に上昇すること^{4,5,12)}、②高濃度に濃縮した余剰培養液を循環・再利用するためにはECを低下させる必要があるが、ECのみを指標に水希釈を繰り返すと作物の吸収量に合わせて添加した肥料成分(NO₃-Nなど)による欠乏症が発生しやすいことから¹³⁾、培養液の継続的な循環・再利用は行われていない。そこで、著者らは高濃度培養液を構成する成分のうち、水分ストレスを付与するために増量・添加した成分、言い換えると培養液を循環させた場合に残存しやすい成分とそれ以外の吸収量に応じて供給する成分とを分割し、それぞれをストレス培養液および基本培養液として別系統で給液・循環させる方式を考案した¹⁴⁾。この方式では、回収した両培養液の余剰排液はストレス培養液として再利用するが、作物の養分吸収に応じて基本培養液を給液することにより過剰な肥料成分の供給を抑え、ストレス培養液への肥料成分の流入を抑制できるため、ストレス培養液のEC調節だけで安定的な高糖度トマト生産が可能となる。

本研究では、CMと遮根シートを用いた根域制限・給液方式と基本培養液およびストレス培養液を用いた培養液循環方式とを組み合わせることにより、高糖度トマト生産を目的とした循環キャピラリー栽培システム（以下、キャピラリーシステムと呼ぶ。）を構築する。また、CMによる給液方式の特性および同システムにおけるトマトの生育と培養液濃度などの変化を明らかにし、高糖度トマト生産への適用性を検討する。

材料および方法

1. 循環キャピラリー栽培システムの概要

(1) 栽培ベッドの基本構造

試作したキャピラリーシステムの栽培ベッドの構造および培養液循環方式をFig. 1およびFig. 2に示す。栽培ベッドとして、長さ方向に1/100の傾斜を付けた鉄パイプ製高設ベンチ（幅40 cm×高さ50 cm）に防水シートで被覆した栽培枠（発泡スチロール製、幅38 cm×長さ92 cm）を設置して用いた。本システムでは、肥料成分の異なる基本培養液とストレス培養液を別系統で給液するため、点滴チューブによる点滴給液方式とCMによる給液方式の2種類の給液手段を有する。ストレス培養液の給液手段であるCMを用いた給液方式は、栽培枠の中央部に幅7 cm×深さ7 cmの給液樋を設置し、この給液樋を中心にその両側に上層、下層の2枚重ねとしたCM（ジャームガード4420S、東洋紡製）を配した。また、下層のCMの端は栽培枠の両端にある排液溝（深さ4 cm×幅1～2 cm）に4 cm下垂させ、上層のCMは栽培枠の

Fig. 1 Structure and nutrient solution flow of cultivation bed in the recirculating capillary culture system.

Fig. 2 Irrigation and circulation methods of basic nutrient solution and stress nutrient solution in the recirculating capillary culture system.

端までの長さとした。トマトの根域は遮根シート（防根透水シート，東洋紡製）を袋状に加工した遮根バッグ（開口部の長さ92 cm×奥行き14 cm；以下，RPBと呼ぶ）により制限した。

RPBは，開口部を栽培枠の外側方向に向けて上層と下層のCMの間に挿入し，栽培枠の長さ方向に接続して設置した。基本培養液の給液手段である点滴チューブ（ストリームライン

80, 10 cm ピッチ, ネタフィルム製) は, 給液樋の両側に設置されている上層の CM 上に 2 列で設置した。

トマト苗の定植は, 栽培ベッド両側の RPB の開口部からセル苗の根部を横から差し込むことによって行い, 複数株単位で根域制限を行った。なお, 本試験では 1 枚の RPB に 22.5 cm 間隔で 4 株ずつ定植した。苗の定植位置に合わせて側面に植え溝を開けたカバーパネル (発泡スチロール製, 幅 30 cm × 長さ 92 cm × 側面の高さ 8 cm) は定植後に栽培枠の遮根シート上に設置した。また, RPB と CM の密着性を高めるため, カバーパネル上に加重材 (レンガ 1/2 片) を設置した。

(2) 培養液の給液・循環方式

循環・再利用を前提とするストレス培養液は, EC の設定値が比較的高く, 循環系内に肥料沈殿物や藻類が混入し給液不良の原因となり易いため, CM を用いた給液方式とした (Fig. 1)。すなわち, タンク内のストレス培養液は給液ポンプにより給液樋の上端に供給されると, 栽培槽の傾斜に基づき給液樋内を自然流下する。この時, ストレス培養液の一部は CM の毛管作用により給液樋の両側に吸収され, 遮根シートの上層および下層を流れる過程でその一部が RPB 内の根域に浸透する。一方, 基本培養液は点滴チューブにより上層の CM に滴下された後, RPB 内の根域に浸透する。この両培養液の給液に基づく余剰排水は, 下層の CM を通じて排水溝に落ち, 栽培槽の傾斜にしたがって栽培枠の下端方向に流れて, 排水タンクに集められる (Fig. 2)。また, 給液樋の流下時に CM に吸収されなかったストレス培養液も給液樋の下端から排水タンクに落ち, 所定の水位を越えるとポンプによりストレス培養液タンクに随時回収され, ストレス培養液として循環・再利用される。

2. 循環キャピラリー栽培システムの特性評価試験

(1) キャピラリーマット(CM)による給液特性

静岡県農林技術研究所内のプラスチック温室 (100 m²) に設置した長さ 2.8 m のキャピラリーシステムを用いた。ストレス培養液の給液を前提とした CM による給液特性を把握するため, 株がない状態における CM を通じた排水量が RPB への給液量 (能力) を表すとみなして, 以下のとおり調査した。なお, 両試験はあらかじめ CM を十分に濡らしてから行い, 肥料成分の有無が CM による水の移動量に影響はないものとして, 肥料成分を添加しない水道水を用いて行った。

給液樋への水の供給速度が, RPB への給液量に及ぼす影響をみるため, 給液ポンプによる給液樋上端への供給速度を 2 ~ 12 L min⁻¹ に変えてそれぞれ 5 分間給液し, 2 枚の CM を通じた排水溝からの排水量を調査した。排水量に基づく RPB への給液量は, 給液樋に水を供給している期間 (5 分間) と水の供給を停止してから自然に排水がなくなるまでの期間 (供給停止後 20 分) に分けて調査し, 両者の合計を

総給液量として求めた。なお, 本試験において水の供給速度の増加により給液樋内の水位は CM 上の約 2 mm から約 12 mm に上昇した。

また, CM の設置枚数が根域への給液量に及ぼす影響をみるため, 上, 下 2 枚の CM を設置した上・下層マット区 (標準区) と下層の CM のみを設置した下層マット区を設けて, 給液ポンプにより 6 L min⁻¹ および 12 L min⁻¹ の供給速度で給液樋の上端にそれぞれ 5 分間給液し, 排水樋の排水量から RPB への総給液量を調査した。

(2) 循環キャピラリー栽培システムとかけ流しポットシステムの比較

試作したキャピラリーシステムの基本的な栽培特性を把握するため, ストレス培養液の EC を 2 dS m⁻¹ および 6 dS m⁻¹ に調節する EC 処理区 (EC2 区, EC6 区) を設けるとともに, その他の高糖度トマト栽培システムとしてかけ流しポットシステム (以下, ポットシステムと呼ぶ)¹⁵⁾ を用い, 両システムの生育, 収量, 果実糖度および培養液濃度などの変化を比較した。

2006 年 1 月 1 日にトマト品種 ‘桃太郎ヨーク’ を 200 穴セルトレイ (培地: ロックウール細粒綿) に播種した。3 葉期の 2 月 1 日に研究所内のフェンロー型ガラス温室 (300 m²) に設置された培養液循環系の異なるキャピラリーシステム 2 基 (長さ 2.8 m) に 24 株ずつ定植し (株間 22.5 cm, 条間 30 cm の 2 条植え, 通路 125 cm, 栽植密度 5.7 plant m⁻²), それぞれを EC 処理区とした。また, 不織布で成形されたポット (直径 12 cm, 高さ 10 cm) にロックウール細粒綿 (約 600 mL) を充填し, ポット毎に点滴ノズルにより給液するポットシステムを同じ温室内に設置し (長さ 4.5 m), 16 株を定植した (株間 28 cm の 1 条植え, 通路 150 cm, 栽植密度 2.9 plant m⁻²)。両システムとも摘心は 3 段果房上の 2 葉を残して行い, 天窓および側窓は 25℃で開閉し, 最低夜温は 12℃で管理した。収穫調査は 5 月 8 日から 6 月 9 日までの 3 ~ 4 日おきに行い, 着色した収穫果実のうち尻腐れ果などの異常果を除く可販果実の果数および重量を調査した (1 区 6 株)。果実の糖度は, 平均的な果実を各果房 6 個ずつ選び, 酸糖分析装置 (NH-1000, 堀場製作所製) により Brix を測定した。

培養液管理について, キャピラリーシステムでは定植直後から基本培養液およびストレス培養液をそれぞれ点滴チューブおよび CM により給液した。基本培養液は, KNO₃, KH₂PO₄, 微量要素 (大塚ハウス 5 号) を所定量添加し作成した (EC 1.8 dS m⁻¹, NO₃-N 12.0, P 4.0, K 13.3 me L⁻¹, Mn 0.77, Fe 2.85 ppm)。また, EC2 区のストレス培養液は, CaCl₂ · 2H₂O, MgSO₄ · 7H₂O を所定量添加することにより作成し (EC 2.0 dS m⁻¹, Ca 9.7, Mg 4.7 me L⁻¹)。EC6 区は上記の塩類を同比率で増量するとともに, NaCl を添加して

作成した (EC 6.0 dS m⁻¹, Ca 23.3, Mg 11.7, Na 23.3 me L⁻¹). なお、両区ともストレス培養液は 200 L タンクに液量が 100 L (4.2 L plant⁻¹) となるように作成して栽培を開始し、栽培期間を通じて定期的に EC を各設定値に調節した。基本培養液の給液は、タイムスイッチを用いて天候に関わらず 8 時から 12 時の時間帯で行い、生育ステージに応じて給液回数を 0 ~ 3 回および 1 回の給液量を 25 ~ 75 mL plant⁻¹ に適宜変更し、0 ~ 225 mL plant⁻¹ day⁻¹ の給液を行った。一方、ストレス培養液の給液樋への供給はタイムスイッチを用いて天候に関わらず 6 時から 17 時に行い、定植から 3 月 30 日までの供給量は 1 回当たり 24 L で供給回数は 1 日当たり 10 回 (総供給量: 240 L day⁻¹)、それ以降は 1 回当たり 48 L で供給回数は 1 日当たり 23 回 (総供給量: 1104 L day⁻¹) とした。ポットシステムの培養液は、KNO₃, KH₂PO₄, CaCl₂ · 2H₂O, MgSO₄ · 7H₂O, 微量元素 (大塚ハウス 5 号) を所定量添加することにより作成した (EC 4.0 dS m⁻¹, NO₃-N 10.3, P 4.0, K 11.6, Ca 18.2, Mg 8.4 me L⁻¹, Mn 0.77, Fe 2.85 ppm)。給液は、定植から 2 月 20 日までは天候や生育状況をみながら 1 回 50 mL で 1 日当たり 1 ~ 3 回行い、それ以降は布センサ¹⁶⁾を用いて給液回数を自動制御した (電極の高さ: 10 cm, 負荷抵抗: 0 ~ 65k Ω)。

キャピラリーシステムのストレス培養液 (タンク内) およびポットシステムにおける培地からの余剰排水 (排水タンクに回収) の EC および NO₃-N 濃度を、それぞれ電気伝導率計 (CM-21P, 東亜ディーケーケー製), RQ フレックス (Merck 製) により約 1 週間おきに測定した (15 時前後に調査)。この時、キャピラリーシステムではストレス培養液の EC が EC 処理区の設定値より 0.5 dS m⁻¹ 以上上昇していたらストレス培養液タンクへ水を補給し、EC を設定値まで低下させた。また、EC2 区では EC 調節後のストレス培養液が 50 L 以下に減少した場合には、栽培開始時の初期培養液を補給し 100 L に調節した。なお、EC6 区における EC 調節後の液量は 50 L 以下にならなかったため、初期培養液の補給は栽培期間を通じて行わなかった。

結果および考察

1. キャピラリーマット(CM)による給液特性

本栽培ベッドにおける CM を用いた給液特性について、給液樋上端への水の供給速度と水供給時 (5 分間) および供給停止後 (20 分間) を含めた RPB 当たりの総給液量との関係を Fig. 3 に示す。給液樋に対する水の供給速度を増加させると水供給時の RPB への給液量および総給液量は直線的に増加したが、供給速度を 2 L min⁻¹ から 12 L min⁻¹ の 6 倍に増加させても、総給液量は 1 回あたり 0.45 L から 0.70 L

Fig. 3 Relationship between the rate of water supply for the fertigation gutter and the amount of irrigation via the upper and lower capillary mat (CM) for the root protection bag (RPB).
○ : Amount of irrigation during 5 minutes' water supply for fertigation gutter per time, ● : Total amount of irrigation until 20 minutes after the end of the water supply for the fertigation gutter.

の 1.6 倍に増加しただけで、水の供給速度に対する給液量の変化は小さいことが示唆された。また、総給液量に対する水供給時の給液量の割合は、給液樋への水の供給速度に関わらず約 64% とほぼ一定であった。大石ら³⁾は本給液方式と同様に水が流れるパイプから長さとは異なる CM (厚さ 2 mm) を下垂させ、CM の下端からの滴下量を調査し、滴下量が下垂長 (≒水位差) および下垂幅 (≒断面積) と比例関係にあることを示している。本給液方式でも、給液樋内の水位と排水溝に延びた CM の下端までの高低差および CM の断面積などが水の移動量を規定すると考えられるが、給液樋内の水が栽培槽の傾斜に基づき自然流下する構造により水位変化が比較的小さいことが、水の供給速度による総給液量が変動しにくい要因と推察された。また、水供給時と供給停止後の給液量の割合がほぼ一定であることから、本給液方式では CM の毛管作用に依存した水供給時の給液と、給液樋内の水はなくなるがそれまでに CM に保水された水が重力により排水される供給停止後の給液とにより、安定的かつ再現性の高い給液特性を示すと考えられた。ただし、本給液方式では栽培ベッドが長くなるほど給液樋の下端側で水位が低下する可能性があるため、今後実用的な栽培ベッド長 (20 m 程度) における給液量や生育の位置による変動を把握する必要がある。なお、CM による水供給時の給液速度は、1 枚の RPB に 4 株の定植を想定すると 14 ~ 23 mL plant⁻¹ min⁻¹ と試算され、これは市販の点滴ノズルを用いた給液能力に匹敵すると考えられた。

Fig. 4 Effect of capillary mat (CM) number on the total amount of irrigation for the root protection bag (RPB).

* Total amount of irrigation was the amount of irrigation during 5 minutes' water supply for fertigation gutter per time and the amount of irrigation until 20 minutes after the end of the water supply. Data indicate the means of 3 replicates $\pm$ SE.

次に、CMの設置枚数が根域への給液量に及ぼす影響をFig. 4に示す。上・下層マット区の総給液量は下層マット区に比べて水供給速度 6 L min^{-1} で2倍、 12 L min^{-1} で1.8倍に増加した。これは、本給液方式における上層のCMの幅長は下層に比べて排水溝部分の各約4 cmだけ短いものの、上・下層マット区におけるCMの平均断面積が下層マット区の約1.9倍に増加したため、水の移動量が増加したと考えられた。CMを用いた給液方式は、すでにトマトやキュウリの養液栽培における培養液供給手段として用いられているが^{5,9)}、そのほとんどはCMにより培養液を吸い上げて根域の下面(底面)のみから給液する方式であり、特に蒸散量の多い果菜類ではCMによる水の供給量が吸水量に追いつかず生育が抑制される場合があるため^{9,10)}、その他の給液手段との併用⁵⁾や根の部分的な湛液化¹⁷⁾など養水分の供給量を増加させる仕組みが付加されている。一方、CMにより培養液を吸い下げる給液方式も提案されており、吸い上げ方式に比べて根域への給液量が増加するため、果菜類であっても著しい生育抑制が起こりにくいとされる^{3,9)}。本システムでは、給液樋から延ばした上層および下層の2枚のCMで培養液を吸い下げる給液方式をとることにより、RPBへの給液量を増加させることに成功した。また、上層および下層のCMの間にRPBを挟み込む構造により根域の上下から培養液を供給できることから、底面のみからの給液方式に比べて根域への養水分供給量の増加や保湿効果による根域環境の安定化が期待される。

2. 循環キャピラリー栽培システムとかけ流しポット栽培システムの比較

(1) トマトの栽培特性

キャピラリーシステムを用いたトマトの栽培方法および生育の状況をFig. 5に示す。本システムでは栽培ベッドの側面からセル苗をRPBに定植するため(Fig. 5-A)、定植直後の苗は垂れ下がるが、翌日には成長点付近が上方に起き上がり、葉のしおれなどの活着不良はみられなかった(Fig. 5-B)。また、栽培過程を通じて葉の黄化などの生理障害も観察されることなく、順調に収穫期に達した(Fig. 5-C)。収穫終了時のRPB内には厚さ10 mm程度のルートマットが形成されていた(Fig. 5-D)。また、ルートマットの上面および下面に白色の分枝根が広がり(Fig. 5-D)、分枝根の表面に根毛が密生している状況が観察された。

両システムにおける収穫期(5月2日)の地上部生体重、乾物重、葉面積をTable 1に示す。キャピラリーシステムでは、いずれの生育指標ともEC6区がEC2区に比べて小さく、ストレス培養液のECを上昇させることにより生育が抑制された。一方、ポットシステムは、いずれの生育指標ともキャピラリーシステムのEC6区より大きく、EC2区との比較では葉面積は大きい。地上部生体重、乾物重に差はみられなかった。

可販果収量および収穫果房別の果実糖度をTable 2に示す。キャピラリーシステムでは、収穫果数はEC処理による差はみられないが、収穫果重、平均果重はEC6区がEC2区より小さかった。また、果実糖度(Brix)はEC6区が9.5～10.0%で、EC2区の8.9～9.1%よりやや高かった。一方、ポットシステムの収穫果重はキャピラリーシステムのEC6区より大

Fig. 5 Cultivation method and growth of tomato plants using the recirculating capillary culture system.
A: Tomato seedlings were planted in root protection bags (RPB) from side of the bed.
B: Growth of tomato plants in EC2 at the flowering first truss (Mar. 6).
C: Growth of tomato plants in EC2 in the harvesting stage (May. 6).
D: After cultivation, the root mat formed in the root protection bag (RPB) was easily pulled from the bag. Many root hairs were observed in the root.

Table 1 Growth characteristics of triple-truss tomato plant cultivated with the capillary and the pot system at harvesting stage.

Hydroponic system		Top freshweight (g plant ⁻¹)	Top dry weight (g plant ⁻¹)	Leaf area (cm ² plant ⁻¹)
Capillary	EC 2	323±28	46.7±3.1	5032±463
	EC 6	248±22	37.9±3.6	4152±413
Pot	—	352±7	49.8±1.1	5829±131

Values are the mean of 4 plants ± SE on May 2.

Table 2 Yield and quality characteristics of tomato fruits produced in triple-truss cultivation using the capillary and pot systems.

Hydroponic system		Marketable yield			Brix of the fruits		
		No. of fruit (plant ⁻¹)	Fruit weight (g plant ⁻¹)	Average fruit weight (g)	First truss (%)	Second truss (%)	Third truss (%)
Capillary	EC 2	11.0 ± 0.4	1142 ± 44	105 ± 5	9.1 ± 0.1	9.1 ± 0.4	9.0 ± 0.2
	EC 6	11.3 ± 0.3	927 ± 45	81 ± 3	9.5 ± 0.1	9.4 ± 0.1	10.0 ± 0.2
Pot	—	10.0 ± 0.6	1186 ± 79	119 ± 5	9.5 ± 0.1	9.5 ± 0.2	9.0 ± 0.1

Values of yield and quality are the mean of 6 plants and 6 fruits per truss ± SE, respectively.

きく、EC2区と同等であった。また、果実糖度は9.0～9.5%でキャピラリーシステムとの差はみられなかった。

根域におけるECの上昇は、浸透ポテンシャルの低下による吸水抑制により果実糖度を高める効果があるが、その一方で栄養成長や果実肥大が抑制されることが報告されている^{6,11)}。キャピラリーシステムにおいてもEC6区はEC2区に比べて地上部生体重、葉面積、収穫果重、平均果重が小さく果実糖度が上昇したが、これはECの上昇により強い水分ストレスが付与されたためと推察された。また、本試験のキャピラリーシステムは、ポットシステムの約2倍の密植条件での栽培であり株当たりの受光環境としては不利であったが、生育、収量および果実糖度はポットシステムとほぼ同等であった。このことから、キャピラリーシステムの給液・循環方式に起因する栽培上の支障はなく、ポットシステム並みの高糖度トマト生産が可能と考えられた。

養液栽培では根毛の発生状況が根域環境を反映するとされ、低水分の根域では根毛発生数の多い湿気中根が発達する¹⁷⁾。キャピラリーシステムでは湿気中根が発達していたことから、今回の給液条件におけるRPBの内部は低水分に維持され、水分ストレスが生じやすい根域環境となっていることが示唆された。なお、RPB内に形成されたルートマットは、栽培終了時にRPBから極めて容易に取り出すことができ、残根除去作業の効率化が可能と思われた。

(2) 培養液管理とNO₃-N濃度およびECの変化

キャピラリーシステムにおける基本培養液の給液量およびNO₃-Nの供給量、ストレス培養液のECおよびNO₃-N濃度の変化をFig. 6に示す。本試験ではトマトの生育状況やストレス培養液のNO₃-N濃度を考慮しながら、基本培養液の給液量を0～225 mL plant⁻¹ day⁻¹の範囲で変更し (Fig.

6-A), NO₃-Nの供給量を調節した (Fig. 6-B)。すなわち、定植から1段花房開花前の2月下旬までにNO₃-Nの供給量を1.4 me plant⁻¹ day⁻¹まで増加させたため、吸収されなかった余剰NO₃-Nがストレス培養液として循環し、NO₃-N濃度は両EC区とも約6 me L⁻¹まで増加した。その後、1段花房開花期後の3月中旬にストレス培養液のNO₃-N濃度に低下傾向がみられたため (Fig. 6-C), NO₃-Nの供給量を2.7 me plant⁻¹ day⁻¹まで増加させた (3月26日～4月4日)。第2段果房収穫期の5月12日以降は基本培養液の給液を停止したため、ストレス培養液のNO₃-N濃度は急激に低下し、3段果房の収穫が終了した6月上旬に1 me L⁻¹以下まで低下した。なお、栽培期間中に給液した合計のNO₃-N量は185 me plant⁻¹であった。寺林ら¹⁸⁾は、大玉トマトの水耕栽培におけるNO₃-Nの平均吸収量は、秋冬作で1週間当たり35 me plant⁻¹ (= 5 me plant⁻¹ day⁻¹)、春夏作で1週間当たり50 me plant⁻¹ (= 7 me plant⁻¹ day⁻¹)としているが、本試験ではこれらの吸収量より少ないNO₃-Nの供給量であったにも関わらず、窒素欠乏の症状は観察されず、果実糖度の向上が可能であった。NO₃-Nの吸収量は、株の生育量や収穫果重が大きいほど多いことから¹⁹⁾、水分ストレスにより地上部生体重や収穫果重が抑制された今回の高糖度トマト栽培ではNO₃-Nの要求量が小さく、欠乏症が発生しなかったと推察された。

一方、キャピラリーシステムのストレス培養液におけるEC調節前のECは、両EC処理区とも1段花房開花期の3月上旬までは変動が小さかったが、それ以降は上昇傾向を示し、その上昇程度はEC6区がEC2区に比べて大きかった (Fig. 6-D)。なお、CMを通じて排出された培養液のみのECとタンク内のストレス培養液のECの差は0.5 dS m⁻¹以内であった

Fig. 6 Changes in the amount of irrigation (A) and NO₃-N supply (B) as basic nutrient solution, NO₃-N concentration (C) and EC (D) in stress nutrient solution with the recirculating capillary culture system.

ことから、ストレス培養液の EC により CM 内の EC を推定できると考えられた (結果省略)。高濃度培養液を用いたトマトの養液栽培では、本結果と同様に培養液の EC が上昇しやすく^{4-6,12)}、その原因として Ca, Mg, Na などの濃縮が関係しているとされている。本試験の栽培開始時におけるストレス培養液 (100 L) の Ca および Mg の初期添加量は、寺林ら¹⁹⁾ による平均吸収量 (Ca: $20 \text{ me}^{-1} \text{ plant}^{-1} \text{ day}^{-1}$, Mg: $10 \text{ me}^{-1} \text{ plant}^{-1} \text{ day}^{-1}$) を本試験との収穫果重の比率で補正した平均吸収量 (推定値) から試算すると、Ca では EC2 区が 50 日分、EC6 区が 147 日分、同様に Mg では EC2 区が 58 日分、EC6 区が 177 日分に相当した。また、EC6 区では栽培期間中に肥料成分を一切追加しなくても Ca, Mg の欠乏症状はみられなかった。本試験ではストレス培養液における $\text{NO}_3\text{-N}$ 以外の肥料成分の分析を行わなかったが、上記のとおりストレス培養液には Mg, Ca などが多量に添加されていること、ストレス培養液における EC の上昇程度は EC6 区が EC2 区より大きいこと、ストレス培養液の EC は基本培養液に由来する $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と異なるパターンを示し、しかも基本培養液の給液を停止した後に EC の上昇程度が増加したことから、栽培開始時に添加したストレス培養液の成分の濃縮が EC 上昇の主な原因であることが推察された。なお、本試験におけるストレス培養液の EC 調節は約 1 週間おきに行ったが、EC や肥料成分の濃度は培養液量の変動や EC 調節の頻度により異なると考えられる。したがって、今後は培養液タンクへの水および肥料原液の自動補給による EC 制御システムを構築し、栽培期間中の培養液量、EC、培養液成分の変動特性を詳細に把握する必要がある。

ポットシステムにおける給液量および $\text{NO}_3\text{-N}$ の供給量、培地排水の EC および $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の変化を Fig. 7 に示す。本

試験における布センサに基づく給液は、定植以降徐々に増加し、4 月以降は天候により大きく変動したがほぼ最大となり、収穫開始期の 5 月以降は減少傾向を示した (Fig. 7-A)。 $\text{NO}_3\text{-N}$ の供給量は給液量と同様に変化し、栽培期間中に供給された $\text{NO}_3\text{-N}$ 量は合計 $508 \text{ me plant}^{-1}$ で、キャピラリーシステムより多かった (Fig. 7-B)。また、培地排水の EC は定植後に急激な上昇傾向を示し、収穫終了時まで約 30 dS m^{-1} に達した (Fig. 7-C)。一方、培地排水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は栽培中に大きく変動したが、栽培後半の 4 月上旬以降は給液濃度 (10.3 me L^{-1}) より常に高い値で推移し、培地内で $\text{NO}_3\text{-N}$ が濃縮していると考えられた。なお、栽培期間中の平均排水率 (排水量/給液量 $\times 100$) は 13% であった (結果省略)。ポットシステムにおける培地内の肥料成分の挙動については、給液後の数時間で EC および $\text{NO}_3\text{-N}$, Mg, Ca などの成分濃度が上昇すると思われる (未発表)。これは、もともと高濃度培養液に添加された作物の吸収量以上の肥料成分 (主に、Ca, Mg など) が残存しやすいことや給液制限により培地内を低水分で管理するため、残存成分が濃縮しやすいことが関係すると考えられる。この培地内 EC の上昇は、キャピラリーシステムと同様に根域の浸透ポテンシャルの低下に基づく吸水抑制により、果実糖度の上昇に寄与していると推察される。しかし、ポットシステムでは通常の培地耕に比べて排水量は少ないものの、培地から排出される余剰培養液は高濃度に濃縮しているため、余剰培養液や肥料成分の蓄積した使用済み培地をそのまま再利用することは困難と考えられた。

総合考察

今回試作したキャピラリーシステムでは、作物体に適度な

Fig. 7 Changes in the amount of irrigation (A) and $\text{NO}_3\text{-N}$ supply (B), EC (C) and $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration (D) in drainage nutrient solution with the pot system.

水分ストレスを付与するため、RPBにより根域を制限するとともに、CMにより根域の上下から培養液を供給する給液方式を基本構造とした。また、水分ストレスの付与を目的としたストレス培養液と作物の養分吸収に応じて給液する基本培養液とを、それぞれCMと点滴チューブで給液し、根域からの排液はストレス培養液として循環・再利用することとした。本試験の結果、キャピラリーシステムの生育、収量、果実糖度は、既に実用化されているポットシステムと同等であることから、高糖度トマト生産のために有効と考えられた。しかし、培養液のEC管理に着目すると、ポットシステムではEC 4 dS m⁻¹の高濃度培養液を培地水分に応じて給液し、栽培期間を通じて培地内が10 dS m⁻¹以上の高ECで推移するのに対し、キャピラリーシステム(EC2区)ではEC 2～3 dS m⁻¹のストレス培養液を天候に関わらず多頻度で給液しても果実糖度が上昇し、根域の水分環境に相違があると考えられた。すなわち、キャピラリーシステムではRPBにより根域が制限され、遮根シートを介してCMから根域へ培養液が少しずつ供給されることが、比較的ECの低い培養液を給液しても果実糖度の上昇を可能にする要因と考えられた。また、本システムではストレス培養液のECにより、葉面積などの生育、収量(平均果重)、果実糖度を調節できる可能性が示された。

一方、ポットシステムで用いた高濃度培養液は、作物の吸収量に合わせて調整された成分と水分ストレスを付与するために作物の吸収量以上に添加・増量された成分とが混在するため、栽培過程を通じて両者の成分バランスが崩れやすい欠点を持つ⁵⁾。また、ECのみを指標として水希釈を繰り返しながら余剰培養液の循環・再利用を行うと、前者の成分が過度に希釈されることにより欠乏症が発生する可能性がある¹³⁾。したがって、培地の有無に関わらず肥料成分の変動を抑制しながら高濃度培養液の循環・再利用を継続的に行うためには、栽培期間を通じて培養液成分の定期的な調節が不可欠と思われる。さらに、高濃度に濃縮した培養液のECおよび成分調節の過程ではその一部を循環系外に廃棄せざるを得ない場合が想定される。これまで、高濃度培養液を用いた高糖度トマト生産に関する研究は多いが^{4,5,20,21)}、培養液の継続的な再利用を前提とした培養液管理法に言及した報告はみあたらない。キャピラリーシステムでは、作物に吸収されなかった基本培養液の成分はストレス培養液として循環する可能性があるが、ストレス培養液の定期的なEC調節だけで高糖度トマト栽培として適切な生育、収量、果実糖度を維持しながら培養液の完全再利用が可能となった。また、3段階摘心栽培の収穫後半から基本培養液の給液を停止することにより、それまでに流出した基本培養液の成分を作物体に吸収させストレス培養液から除去することが可能なため、次作の培養液管理にも大きな支障はないものと推察された。すな

わち、高濃度培養液を構成する肥料成分の残存程度を考慮した分割利用と残存しやすい肥料成分を中心とした給液・循環方式により、残存しやすい成分のEC調節だけで循環培養液の成分変動を栽培上支障のない範囲に抑制でき、煩雑な肥料成分の調節を省略できる可能性が示唆された。今後は、栽培過程においてストレス培養液の成分の変動特性を把握するとともに、培養液の継続的な再利用により栽培実証を図る必要がある。

肥料成分の異なる2種類の培養液を独立した給液手段により給液する本方式について、これまで植物の栄養生理学的な実験手法としてECの異なる培養液を分割した根域に給液する事例はみられるが²²⁾、トマトの実用栽培を目的としたものはみあたらない。作物体に所定量の肥料成分を供給するだけであれば、給液系統を分けなくてストレス培養液に基本培養液の成分を適宜添加する給液・循環方式も可能と考えられる。しかし、本システムではCMにより根域に少しずつ給液するストレス培養液のECや給液回数を調節することにより作物体に所定の水分ストレスを付与する必要があるため、肥料成分の供給を目的とする基本培養液はストレス培養液とは独立した給液制御を行うことにより、様々な栽培条件に応じた合理的な養水分管理が可能になると考えられる。

また、最近トマトの養液栽培では、ECを指標とする従来の「濃度管理法」ではなく、必要な肥料成分量を生育の状況に応じて根域に給液することにより収量と品質の両立や肥料の有効利用を目指す、「量的管理法」が注目されている¹⁸⁾。高糖度トマトの低段密植栽培についても、高密度条件下において品質を低下させずに収量を増加させるための草姿管理技術として、量的管理法は極めて有効と考えられる。キャピラリーシステムではNO₃-Nを含む基本培養液を根域に直接給液し、肥料成分の供給量を単独で調節できることから、量的管理法を効率的に行うための機能を有していると考えられる。今後、基本培養液およびストレス培養液のECや肥料組成および給液量によるトマトの生育反応を解析することにより、両培養液の適切な給液条件を明らかにするとともに、天候や生育ステージに応じた給液制御法を開発することにより、肥料成分を循環系外に一切廃棄しなくても高糖度トマトの閉鎖式養液栽培システムの構築と生育制御の最適化による品質と収量の両立への寄与が期待される。

摘 要

高濃度培養液を用いた高糖度トマトの養液栽培における培養液の循環・再利用を図るため、新たな循環キャピラリー栽培システムを開発し、その基本特性を明らかにした。本システムは、点滴チューブによる給液方式と給液樋から延びた2

枚重ねのキャピラリーマット (CM) による給液方式とを有する。遮根シートを袋状に加工した遮根バッグ (RPB) を上層および下層の CM の間に挿入し、トマトの根域を制限する。CM による給液量は、給液樋への水の供給量を $2 \sim 12 \text{ L min}^{-1}$ に変えても、 $0.45 \sim 0.70 \text{ L RPB}^{-1}$ (5 分間) しか変化しなかった。高濃度培養液の肥料成分のうち、作物の生育ステージに応じて給液する基本培養液 ($\text{NO}_3\text{-N}$, P, K, 微量要素, $\text{EC} 1.8 \text{ dS m}^{-1}$) と水分ストレスを付与するためのストレス培養液 (Mg, Ca, Na など) を分割し、両培養液はそれぞれ点滴チューブおよび CM により給液する。CM による余剰排液はストレス培養液のタンクに回収し、EC を定期的に調節しながら循環・再利用を行う。キャピラリーシステム (ストレス培養液: $\text{EC} 2.6 \text{ dS m}^{-1}$) およびポットシステムによりトマトを 3 段階心栽培した。キャピラリーシステムにより余剰培養液を循環・再利用しながら Brix 9% の高糖度トマトが生産できた。ただし、EC6 区における地上部の生体重、乾物重、葉面積、収穫果重は EC2 区より小さく、果実糖度は EC2 区より高かった。ポットシステムの生育、収穫果重はキャピラリーシステムの EC2 区と同程度であり、果実糖度にも差はみられなかった。

引用文献

- 1) 栃木博美, 川里 宏. トマトの促成栽培における土壌水分が果実品質に及ぼす影響. 栃木農試研報 36: 15-24. 1989.
- 2) 石上 清, 堀内正美, 中寫輝子, 松浦英之. 根域を制限した循環式養液栽培装置による高糖度トマト生産. 静岡農試研報 38: 61-72. 1994.
- 3) 大石直記, 岡谷美紀, 小山保徳. 高糖度トマト低段密植生産のための養液栽培装置の開発. 静岡農試研報 41: 1-11. 1996.
- 4) 大川浩司, 林 悟朗. 親水性不織布を使用した養液栽培装置による高糖度トマト生産 (第 1 報) 装置の特性と高濃度培養液の施用効果. 愛知農総試研報 28: 117-126. 1996.
- 5) 岡 一郎, 末 紀夫, 高橋久幸. 培養液への塩類の添加が水耕栽培トマトの糖度と果実重量に及ぼす影響. 園学研 2: 149-154. 2004.
- 6) 細川卓也, 小松秀雄, 吉田徹志, 福本康文. トマトの養液栽培における培養液への海洋深層水の添加が生育および収量・品質に及ぼす影響. 植環工 17: 26-33. 2005.
- 7) 磯崎真英, 小西信幸, 黒木 誠, 野村保明, 田中一久. 培養液の廃棄を削減する余剰液再利用ロックワールシステムの生育および培養液成分濃度の推移. 園学雑 73: 354-363. 2004.
- 8) 石原良行, 人美秀康, 中山千知, 八巻良和. 非循環式の閉鎖型養液栽培システムを用いたトマト促成長期栽培における培養液濃度管理. 園学研 6: 399-404. 2007.
- 9) Shinohara Y, Maruo T, Ito T. Effect of capillaryhydroponics system on the growth, yield and quality of tomato and cucumber. Bull. Fac. Hort. Chiba Univ. (千葉大園学報) 47: 1-8. 1993.
- 10) 岩田 均, 時枝茂行. 毛管型水耕栽培における防根シートの材質の違いがトマトの生育, 収量, 品質に及ぼす影響. 兵庫農技研報 43: 97-100. 1995.
- 11) Romero-Aranda R, Soria T, Cuartero J. Tomato plant-water uptake and plant-water relationships under saline growth conditions. Plant Sci. 160: 265-272. 2001.
- 12) 大石直記. トマトの養液栽培における水分ストレスに応じた給液制御システムの開発 (4) 布センサを用いた培地水分に基づく給液制御. 生環調 40: 301-310. 2002.
- 13) 大石直記, 守谷栄樹. トマトの根域制限養液栽培における培養液循環システムの開発. In: 園芸学会東海支部講演要旨. 三重. 8月26日. 2005.
- 14) 大石直記, 守谷栄樹. 培養液循環の可能な根域制限養液栽培における $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度がトマトの生育, 収量および果実糖度に及ぼす影響. 園学雑 74(別 2): 410. 2005.
- 15) 大石直記. 養液栽培による高糖度トマトの低段密植周年栽培システム. 農業技術体系野菜編. 農文協, 東京. 2: 42-47(追録第 31 号). 2006.
- 16) 大石直記, 守谷栄樹. 高糖度トマトの根域制限式養液栽培における布センサを用いた生育制御. 園学雑 75(別 1): 410. 2006.
- 17) 坂本有加, 渡邊慎一, 岡野邦夫, 巽 二郎. 保水シート耕方式の養液栽培における根域の気相/液相比率がトマトの生育・収量に及ぼす影響. 園学雑 70: 622-628. 2001.
- 18) 寺林 敏, 浅香智孝, 戸祭 章, 伊達修一, 藤日幸廣. トマト水耕栽培における硝酸態窒素およびリンの定量施与が養分吸収および果実生産に及ぼす影響. 園学研 3: 195-200. 2004.
- 19) Terabayashi S, Marumatsu I, Tokutani S, M, Kitagawa E, Shigemori T, Date S, Fujime Y. Relationship between the weekly nutrient uptake rate during fruiting stage and fruit weight of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) grown hydroponically. J. Japan Soc. Hort. Sci. (園学雑) 73: 324-329. 2004.
- 20) 北条雅章. 培養液管理法からみた NFT トマトの高品質果実生産技術の開発. 千葉大園学報 55: 123-153. 2001.
- 21) 斎藤岳士, 福田直也, 西村繁夫. 塩ストレス, 栽植密度ならびに果房直下の側枝が NFT 栽培トマトの収量および糖度に及ぼす影響. 園学研 5: 415-419. 2006.
- 22) Sonneveld C, Voogt W. Response of tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) to an unequal distribution of nutrients in the root environment. Plant and Soil 124: 251-256 1990.