玉川大学農学部研究教育紀要　第 10 号：35–48（2025）
Bulletin of the College of Agriculture, Tamagawa University, 10, 35–48（2025）

【研究報告】

毛管水耕によるストレス栽培が トマトの栄養成長および果実品質に及ぼす影響

小原廣幸[1]・貝崎諒太[1]・山崎　慧[1]・森澤喜博[1]・佐藤咲夏[1]・鶴崎文也[1]・南雲亮太[1]・
大橋貴裕[1]・天野昇太[1]・半田敦也[1]

要　約

土壌水分センサーを用いて，培地内の水分量を把握し，植物のしおれを一定にした毛管水耕栽培装置を考案し，単独栽培装置と複数連結栽培装置による高糖度トマトの生産に関する研究を行った．この単独装置による水分制限によって，植物体の栄養成長，果実収量，果実品質に影響を与えることがわかった．底面灌水における給水用不織布の面積の関係では，面積が50％の底面灌水区で着果率が低かったことなどから強い水分ストレスがかかった状態であると判断された．不織布面積と培養液の濃度の関係では，栄養成長は培養液の濃度間に差がみられず，生体重ではEC 1.5区が最も重くEC 2.5区が軽くなった．土壌水分センサーはEC 1.5区が最も保水していることを示し，ルートマットの形成も最もよかった．果実サイズはEC 1.5区が最も大きく，糖度では第3花房以降で糖度8.0以上となりEC 1.5が適した濃度であったが，培養液槽内の濃度が高くなっていることが果実品質に影響していることが懸念された．複数連結した栽培装置の培養液槽内の養液の濃度は，全処理区で緩やかに上昇しEC 2.5区が2.5 mS/cm付近を推移したが，EC 3.0区では大きく上昇した．果実サイズは，上位の果房は小さくなり1果重も軽くなる傾向がみられた．糖度は，EC 2.5区が高く，生体重と乾物重は，EC 2.0区が高い傾向がみられ，EC 2.5区の糖度は3処理区の中で最も高くなった．この連結した毛管水耕栽培装置は，電力による給水に頼らない栽培が可能であることから環境に配慮した栽培装置であり，環境負荷低減にも寄与する可能性が示唆された．この毛管水耕栽培装置において培養液の濃度をEC 2.5 mS/cmで一定に保つことで，高糖度トマトの生産も可能であることが示唆された．

キーワード：養液栽培，毛管水耕栽培，培養液濃度，高糖度トマト，不織布

緒言

高糖度トマトの栽培方法は通常のトマト品種に水分や塩類によるストレスを付加し，トマトの糖度（糖含量）を上昇させる方法が一般的である．水耕栽培に対してトマトの生育や収量を調査する研究は数多くあり（山崎，1999），Shinohara et al.（1993）は吸い上げ式毛管水耕（CUT），湛液型水耕（DFT）や薄膜水耕（NFT）でのトマトの生育や収量を比較している．また，Terabayashi et al.（2004）は水耕栽培で施用する培養液の組成について，トマトの養分吸収率に基づいた適切な養分供給方法を検討している．

吸い上げ式毛管水耕（以下毛管水耕とする）は，下部の養液槽から不織布の毛管現象を利用して根に養液を供給する栽培システムである．このシステムはポンプを用いずに養液を供給することができるため，電力を必ずしも必要としない点が特徴である．そのため，電力の供給が不安定な地域や，土壌の塩害などによる耕作不適地においても，水と肥料があれば栽培が可能であると期待される．また，不織布を用いることで根が空気中から直接酸素を取り込むことができ，酸素不足を回避することができる利点がある．根が空気に触れることで根毛の発達が促進され，養分の吸収率が高まることも期待される．加えて，電気を使用しない簡易な構造であるため，装置のコストを抑えることができ，排液量も少なく環境負荷の低減にもつながる．

玉川大学農学部環境農学科持続的農学領域では，国内での毛管水耕栽培の可能性の検証と，糖度8.0以上の高糖度トマトを栽培するための研究を進めてきた．まずは，JT養液栽培システム「楽農太郎」の毛管水耕装置を用い，

[1] 玉川大学農学部環境農学科　東京都町田市玉川学園6–1–1
責任著者：小原廣幸　koharahi@agr.tamagawa.ac.jp

水分の吸収に制限を加えるしおれ処理をおこなった．しおれ処理は，週2回処理が葉面積などの植物体の生長を抑制し，糖度などの果実品質を向上し，明確なしおれ処理の影響がみられたが，糖度8.0以上の果実は得られなかった（小原ほか，2009）．JT養液栽培システムは1装置に20数本栽培することができたが，水分制限をかけることが難しかった．そこで1つのコンテナに1株植え付けし株ごとに水分制限がかかるようにした単独の装置を考案した．また，JT養液栽培システムで行った水分制限によるしおれ処理は，目視によって判断していたことから個人によりしおれの状態の判断が異なり，トマトへのストレスのかかり具合の判断が難しかったことから，土壌水分センサーなどによる制御が必要であった．

単独の栽培装置に設置した土壌水分センサーにより不織布内の養液が供給されていることは確認できたことから，不織布の面積によって水分制限の程度を調節できる可能性を検討した．本装置は苗を植える口から培養液を供給する構造であったが，植えつけた個体に対する給液が異なり作業が煩雑で，処理区内の生育環境を一定に保つことが困難であった．そこで底面給水方と養液の濃度の関係を検討した．

複数連結した栽培装置を用い，培養液槽の培養液の濃度上昇にともなう水分ストレスのかかりすぎを防ぐため，培養液槽の培養液の濃度と水分ストレスの関係を検討した．培養液濃度をEC 2.0 mS/cm，EC 2.5 mS/cmとEC 3.0 mS/cmの3種類に保持し，培養装置を複数連結し水圧平衡による給液管理の一元化により，給液の簡便化を図った培養装置による高糖度トマトの生産に関する研究を報告する．

材料および方法

植物材料・調査項目・管理方法

供試品種は，温室用の栽培品種として多く栽培されているハウス桃太郎およびウイルス耐病性品種である桃太郎ピース（タキイ交配）を使用し，玉川大学農学部農産研究センター第2農場花卉第2温室で行った．種子は，128セルトレイに湿らせたバーミキュライト（昭和バーミキュライト株式会社）を敷き詰め播種した後に，25℃に設定した発芽機（葉･友･器：昭和精拐工業株式会社）に入れ，発芽後には20℃に変更して育苗した．

本実験の単独の毛管水耕装置（図1）は，プラスチック製のコンテナ（天馬株式会社）内に設置した土台に浮き板（スタイロホーム，厚さ50 mm，デュポン・スタイロ製）を置き，その上に保水用の不織布（厚み2 mm×幅100 cm×長さ50 m水耕用不織布，東洋紡製）と培養液槽から吸水するための不織布を被せた．装置内の不織布は，浮き板の面積（51×32 cm）の50 %（51×16 cm）の大きさで，給水用の不織布（51×16 cm）は培養液槽の培養液に十分に浸かるように配置した．浮き板の厚さは，不織布が培養液を吸い上げることが可能でトマトの生育が良好な5 cmとし，液槽内の貯水量は6 ℓとした．防根透水シート（厚み0.1 mm×幅125 cm×長さ100 m，東洋紡製）は給水用の不織布上に密着させるように被せ，トマトの根に培養液が不織布から間接的に供給されるように処置した．コンテナの蓋の中央部を正方形に切り抜き，植物体がこの正方形開口部の中心部から外部に伸長できるようにした．また，培養液槽での藻類の繁殖を防ぐために白黒マルチシートで毛管水耕装置を覆いった．培養液は大塚ハウスSA処方を用い，培養液濃度の保持するために給液管理専用のコンテナ内の培養液は，pHとECで1週間に1回調整した．ECの測定にはコンパクト電気伝導率計（B-771：HORIBA製，東京）を用い，pHの測定にはコンパクトpHメーター（B-71X：HORIBA製，東京）を用いた．

栽培管理としては，花房内の小花が咲いた時点で手による振動受粉を行った．また，適宜脇芽の除去行い，第5花房の上部2枚の葉を残し摘心する5段摘心とし，各花房に結実する果実数を5個以下にする摘果を行った．栽培期間中オンシツコナジラミ，サビダニ，ハモグリバエが複数回発生したため，発生が確認された時点でコロマイト乳剤，レピメクチン乳剤，アクテリック乳剤，ベストガード粒剤などの農薬を適宜複数回散布した．

調査項目として培養液についてはpH，EC，硝酸態窒素量はイオン電極式硝酸イオンメーター（N-2031：東亜DKK, 東京）で調査した．トマトの植物体については，生育調査では1週間に1回葉数と茎長を測定した．栽培終了時に最終生育調査として葉数，茎長，茎径，葉緑素含有量を測定した．茎径は各果房の直下の縦径（長径）と横径（短径）を計測した．葉の葉緑素含有量は，第3果房直下の小葉を葉緑素計（SPAD-502：コニカミノルタ株式会社，東京）3枚測定し平均した．各植物体部位（葉・茎・根）の生体重と乾燥重は送風定温乾燥機（WFO-601SD，WFO-520W：東京理化器械株式会社，東京）で85℃ 3日間乾燥させてから測定した．果実の品質調査については，果実の9割以上が赤くなった時に正常果数と障害果数，正常果の縦径と横径，1果重，果肉厚，硬度，糖度（Brix%）と酸度を測定した．果肉厚，硬度，

糖度と酸度は，各果房の第1果のみを測定した．硬度は，果実硬度計FR-5105（Lutron，GAS Japan）の先端部3 mmで赤道面を測定した．

糖度（Brix%）はデジタル屈折糖度計（ポケット糖度計PAL-1：アタゴ製，東京）で測定した．酸度は果実を切り冷凍保存した約20 gをホモジナイザー（AHG-160A：アズワン製，東京）でピューレ状にした果汁を遠心分離機H-19（株式会社コクサン製，東京）に3000 rpmで3分間かけた上澄みを2 mℓ三角フラスコに取り，0.01 Nの水酸化ナトリウム水溶液を用いて中和滴定を行い，クエン酸含有量として換算した．

実験1：土壌水分センサーを用いたしおれ処理

高糖度トマトの栽培方法の大部分は，灌水を抑えた低水分管理であり，特に，土耕栽培における低水分管理が一般的である．水分を制限することでトマトの植物体はしおれるが，しおれの程度を目視によって判断するのは困難である．そこで，土壌水分センサーを栽培装置に内蔵し，植物のしおれ具合を一定にするように栽培装置の改良を行い，培地内の水分量を把握することで水分制限の安定化を図った．2枚使用していた浮き板を1枚にして培養液を吸い上げやすくし，しおれを起こす電圧を測定した．この装置を用いて果実品質を維持したまま，収量を低下させない栽培方法について検討した．

しおれと電圧の関係を調査するために土壌水分センサー（EC-5：DECAGON，USA）を栽培装置内の不織布の間に設置し，ロックウールキューブ（75×75×75 mm CV日東紡製）で育苗したトマト1株を定植した．EC 1.0 mS/cm，pH 5.8に調整した培養液を300 mℓ与え，2013年4月16～29日までの約2週間観察した．植物体のしおれの状態と電圧を調査した．しおれの程度の判定は，植物体の先端が傾き，複葉の巻き込み，触感の柔らかさを基準とし，これらの状態と土壌水分センサーの電圧との関係を調査した．栽培試験として，2013年5月1日に栽培装置にトマトの本葉が4～5枚の苗を定植し，8月13日まで栽培を行った．植物体のしおれの状態と電圧の結果をもとにして，350 mV区，400 mV区，500 mV区の3処理区とした．給液管理は，土壌水分センサーの電圧が設定値を下回った時点で，EC 1.0 mS/cm，pH 5.8に調整した培養液を頭上灌水した．給液は栽培装置の蓋の開口部から行い，500 mV区ではほぼ毎日給水し飽和水分状態とした．

実験2：頭上灌水と底面灌水

本実験では，2017年1月26日～8月9日に今まで行った頭上灌水による給水ではなく，底面灌水のみとし，不織布50%区と100%区で高糖度トマトの生産について検討した．

栽培装置の蓋の角に穴をあけプラスチックのパイプを刺し，底面給水できるようにした．土壌水分センサーは，不織布と不織布の間に設置した．トマト苗は，不織布の面積が50%（25.5×16 cm）と100%（25.5×32 cm）の装置に1本植えとした．それぞれを頭上灌水区と底面灌水区に分け，合計4処理区とし，各処理区10個体ずつとした．定植から活着するまでのECは0.7 mS/cmにし，その後1.0 mS/cmから始め，第1花房が開花した時にECは1.2 mS/cm，第3花房がつき始めたら1.4 mS/cmにした．頭上灌水の給水は栽培装置の蓋の開口部から入れ下部に培養液を約3ℓためるようにした．

実験3：培養液の濃度

培養装置の不織布の面積は，トマトの安定した栽培が可能な50%にし，2021年2月8日～7月31日に培養液の濃度をEC 1.0 mS/cmから段階的に増加させた3処理区を設け，糖度8.0以上の高糖度トマトの栽培の培養液濃度について検討した．

培養装置に定植後の施肥濃度をEC 1.0 mS/cmに，第1花房の開花後からEC 1.5 mS/cmに，第3花房開花後に各処理区に応じEC 1.5 mS/cmとEC 2.0 mS/cm，EC 2.5 mS/cmに変化させた．栽培期間は2021年3月15日から8月6日までとした．本実験の栽培装置（図1）は，不織布が培養液を吸い上げることが可能な10.0 cmとし，培養液の貯水量が5ℓ以上とした．給液用の不織布上に，密着させるように防根透水シートを被せ，培養液が間接的に供給されるようにした．その上にバーミキュライトを取り除いた植物体を直接置き，乾燥防止のためにビニールシートを根に被せた．不織布は，浮き板の面積（25.5×32.0 cm）を100%と50%（25.5×16 cm）のものと，浮き板上に保水用不織布を敷き，給水用不織布（51.0×16 cm）を重ねて設置した．培養液濃度が，EC 1.5 mS/cmのEC 1.5区，EC 2.0 mS/cmのEC 2.5区，EC 2.5 mS/cmのEC 2.5区の3処理区とし，各処理区10個体ずつとした．定植後は，EC 1.0 mS/cmで管理し，第1花房の開花後EC 1.5 mS/cmに調整した．第2果房の開花が確認された4月25日以降，ほぼすべての個体で第2花房の開花が確認されたため，各処理区をEC 1.5 mS/cmとEC 2.0 mS/cm，EC 2.5 mS/cmに変更した．

実験４：連結した栽培装置と培養液濃度

培養液槽の濃度が栽培後期に上昇し上位果房の果実糖度が上昇に影響しているものと考えられた．培養液の濃度を一定に保ち，栽培装置を複数連結した栽培装置を用いた（図2）．2023年2月14日～8月2日に培養液濃度をEC 2.0 mS/cm，EC 2.5 mS/cmとEC 3.0 mS/cmに保持したEC 2.0区，EC 2.5区，EC 3.0区の3処理区とし，培養液の変化と生育の関係を検討した．

連結のために栽培装置に穴を空け，塩化ビニル管とチューブによって各装置を連結し，水圧平衡による給液管理を一元化した．給液管理は，1週間に1回各装置内の液槽が上限の6ℓで管理した．2023年3月10日に栽培装置の防根シートの上にバーミキュライトを取り除いて本葉2～3枚の苗を定植し，乾燥防止のため白黒マルチシートを根圏に被せた．重石として人工芝とポリ袋に入れた砂を白黒マルチシート上にのせた．各処理区の10個体ずつ栽培した．定植後はEC 1.0 mS/cm，pH 5.8で管理し，第1花房開花後（2023年5月2日）に各処理区に応じて培養液濃度を調整した．培養装置を連結することにより個々の装置の培養液の濃度が異なることが懸念されたので，培養液のpH，EC，硝酸態窒素量について調査した．各処理区の栽培装置列内で給水用のコンテナから2番目，5番目，9番目の培養装置から液槽から駒込ピペットで吸い取りサンプリングした．サンプルは1週間に1回採取し前述の機器を用いて測定した．

結果

実験１：土壌水分センサーを用いたしおれ処理

2014年4月16日～4月29日に土壌水分センサーを用いて水分制限を行ったトマトの状態は，500～400 mV時には葉が展開し硬化していた．400 mV～300 mV時には，茎長部が傾き，複葉の巻き込み，触感が柔らかくなった（図3）．電圧が300 mV以下になるとさらにしおれが強くなり，さらに270 mVを下回ると下位の葉が緑色から黄色になり，やがて枯れた．不織布に培養液を含ませ，水分が飽和状態の電圧は500 mVで，植物体でしおれが始まるのが350 mVであった．

2014年4月22日の灌水以降から電圧が低下し，それぞれの処理区の設定電圧以下になった日から全調査株の収穫が終わる8月13日まで土壌水分センサーによるしおれ処理を行った．350 mV区と400 mV区は，1週間に1～2回それぞれ350 mVと400 mVを下回ったときに灌水した．しかし，電圧が急激に低下して強いしおれを引き起こすとされた270 mV以下になってしまったこともあった．500 mV区ではほぼ毎日灌水を行い，飽和水分状態を常に保つようにした．

葉の生体重および乾物重，茎の生体重，根の乾物重において，350 mV区および400 mV区よりも500 mV区が1.6～2.5倍重くなった（表1）．果実品質に関して，糖度は水分制限が強い350 mV区が上位果房で約1度高くなったが，果房ごとに糖度のばらつきがみられた（表2）．

実験２：頭上灌水と底面灌水

栽培終了後の装置内の根を目視で観察したところ，不織布の形に沿って根が張っていた（図4）．細かい根がマット状に広がり防根シートが見えなく程度の厚みのあるルートマットは，頭上灌水区で厚く形成され，底面灌水区は防根シートが見える程度であった．100％底面灌水区は根の太さも50％区と比べて太かったが，隙間が多かった．100％頭上灌水区は根の太さもあり，全体に細かい根が厚く広がっているルートマットを形成していた．

果実品質に関して，第3果房以上の着果が不良であったが，1果重と横径では差がなかった（表3）．縦径では第4花房において100％頭上灌水区が41 mmで最も高くなった．糖度はすべての処理区のいずれにも差がみられなかった（表4）．酸度は，第1花房の50％頭上灌水区が0.69 g/100 mlと高くなった．

実験３：培養液の濃度

生体重は葉，茎ともにEC 2.5区が高いEC 1.5区の0.5～0.7倍と軽くなった（表5）．しかし，EC 1.5区は栽培終了まで多くが生存していたのに対し，EC 2.5区は7月中旬，EC 2.0区は7月下旬から枯れ始めた．乾燥重は葉，茎，根ともに各処理区間での差がなかった．ルートマットの形成具合は，根の乾燥重が最も小さかったEC 2.5区が防根透水シート上に細かい根が密集していた（図4）．根の乾燥重が重いEC 1.5区のルートマットは，不織布が接地していない部分にも太めの根が多く分布していた．

果実品質に関して，果実サイズの縦径と横径では，ECが高い処理区ほど小さくなった．糖度は，第1花房ではEC 2.5区が1度高かった（表6）．EC 1.5区，EC 2.5区は第2花房以降，EC 2.0区は第3花房以降，高糖度トマトの基準である糖度8.0以上となった．酸度は，第3花房以外の処理区間で差がみられ，施肥濃度の増加とともに酸度が増加しEC 2.5区の第5果房で最も高く1.13

g/100 mlであった.

実験4：連結した栽培装置の培養液濃度

栽培装置における培養液のECは6月14日まで緩やかに上昇した（図5）．6月14日以降では，EC 2.0区は2.0 mS/cm付近を，EC 2.5区は2.5 mS/cm付近を推移した．一方，EC 3.0区では，6月14日以降上昇し続けたEC 3.0区のECは，7月12日には最大EC 10.0 mS/cmに達した．このため6月21日にEC 0.7 mS/cmの培養液を，6月28日以降は水道水のみを給水したところ一時的に下降したが，8月2日には再びEC 10.0 mS/cm付近まで上昇した．

植物体の生育に関して，生体重と乾燥重には，全植物体部位で処理区間に差はみられなかった（表6）．果実品質について，糖度の高い方から順にEC 2.5区，EC 3.0区，EC 2.0区であった（表7）．第1果房であっても糖度8.9となり，第2果房より上位であっても糖度9.0以上となり，EC 2.5 区の第4房が最も高く糖度10.2であった．酸度では第1～4果房でEC 2.0区が最も高く0.74～0.81 g/100 mlで，第5花房では，EC 2.5区が高くなった．

考察

実験1：土壌水分センサーを用いたしおれ処理

トマトにおけるしおれと電圧の関係は，400 mV～300 mV付近でしおれ始め，270 mVを下回ると下位の葉が黄色になり，やがて枯れた．300 mV付近でしおれ始め，270 mVを下回ると強くしおれることが分かった．

茎長は，常に500 mV区が最も大きく，次いで400 mV区，350 mV区の順で生長した．これは土壌水分を制限すると，茎長の発達が抑えられる報告（圖師・松添，1998）と同様であった．また，茎長の生育初期には大きな差はみられず，水分ストレスの影響は生育初期に小さいという報告（小原ほか，2009）とも一致した．主茎の長径は，全ての区で上位の果房になるにつれて主茎が細くなる傾向がみられ，また，水分制限が強いほど主茎が細くなった．生体重および乾物重について，350 mV区と500 mV区間ですべての調査項目において差がみられ，350 mV区と500 mV区から，しおれ処理による水分制限は，葉と茎の生育に影響していると考えられる．

結実数と着果率は各処理区間で差がみられず，一定の傾向もみられなかったが，着果率はいずれの処理区においても，第1花房が最も高かった．本実験の350 mVの水分制限の範囲であれば茎長や葉数，着果することないと考えられる．しかし，270 mV付近の水分制限では，過度なストレスとなり開花や結実に影響し過度なストレスであると考えられる．

果実サイズに関して，第1花房の横径では350 mV区と500 mV区間で，第2花房では350 mV区，400 mV区と500 mV区間で，それぞれ差がみられ，水分制限を与えると生育は抑えられ，果実の肥大が劣るという報告（青木，1998）と一致している．縦径と1果重については，第1花房および第2花房で350 mV区，400 mV区と500 mV区間で差がみられ，しおれによる水分制限が強いほど1果重は小さくなり，水分制限を与えると果実が小玉になり，収量が低下するという報告（宍戸，1991）と同様であった．

果実品質の糖度に関して，第2花房および第3花房において350 mV区と400 mV区間で差がみられ，水分制限を与えると糖度が高くなるという報告（青木，1998）と同様であった．Vittum et al.（1962）は，灌水の処理によって糖度および酸度が低下するのは果実の水分含有率の増加による希釈効果としている．塩ストレスによるトマトの小型化や糖度上昇は，濃縮効果によるものとされている．一方，濃縮効果のみでは説明がつかないこともあり，塩ストレスによるトマト果実の糖含量増加には，濃縮効果だけでなく果実に積極的に糖を蓄積するメカニズムがあることが示唆されている（斎藤，2016）．

本実験の最大糖度を見てみると，350 mV区では10.8%，400 mV区では9.2%，500 mV区では11.2%であったことから，水分の飽和状態であるとした500 mV区においても高糖度トマトの栽培が可能であることが示唆された．しかし，個体間での糖度はばらつきが多く，安定した高糖度トマトの生産には課題が残った．酸度について，第1花房および第3花房で，350 mV区と500 mV区間で差がみられ，350 mV区で酸度が高い傾向にあった．土壌水分の制限により酸が増加するという報告（圖師・松添，1998）と一致している．酸度0.35以上のトマトは，消費者に好まれる傾向があり（石上・堀内，1993），本実験ではこの条件を満たしていた．

実験2：頭上灌水と底面灌水

養液管理においての給液の判断は，全ての区が300 mVでしおれたことから，土壌水分センサーの電圧で不織布内の水位分状態を把握できていた．しかし，50%底面灌水区では給液はできていたが，根が広がらず，根腐れを起こしていたことから，土壌水分センサーの電圧で水分制限をすることは難しいと考えられる．

100%区は不織布に水分を充分に保持できることから

根を充分に広げることができ，根量の厚さからも不織布の水分の保持量が多いと推測される．葉数，葉の重量，生体重，乾物重から100％区が50％区よりも多かった．50％底面灌水区は，1果重が小さく小玉になり収量が低下していたことから50％底面灌水区ではストレスが強くかかっていたと考えられる．

本実験により，頭上灌水をともなわない底面灌水で栽培をすることが確認できた．土壌水分センサーを不織布の間に挟むことによって，安定して給水していることが確認することができた．これはルートマット自体が水分を保持できるようになったためと推測した．しかし，土壌水分センサーによる電圧の下降による植物体の水分ストレスを判断することはきなかった．土壌水分センサーは不織布による給水状態を把握する手がかかりとなると考えられる．

実験3：培養液の濃度

底面給水を行った栽培装置の土壌水分センサーの電圧は，EC 1.5区がEC 2.0区よりも高く維持していた．茎長は，すべての処理区で栽培期間中同様に伸長していた．トマトの初期生育の苗は，不織布からの給液される培養液量が十分にあったことから水分ストレスがかからず順調に伸長できると考えられる．

植物体の茎径や生体重に関して，EC 2.5区は，EC 1.5区よりも水分ストレスが強かったので，生育が抑制されたと考えられる．また，根の乾燥重はEC 1.5区が重い傾向がみられ，ルートマットの形成には，EC 1.5区が最も発達していることが示唆された．すべての処理区で浮き板の面積の50％不織布を用いて給水しているため，不織布から吸い上げられる給水量は同一と推測する．ルートマットは培養液の水分保持にも貢献しているものと考えられる．

果実品質の果実の縦径，横径に関しては，EC 1.5区，EC 2.0区，EC 2.5区の順に小さくなった．果実重は第1花房と第5果房でEC 1.5区が最も重い傾向がみられた．EC 1.5区とEC 2.5区は第2果房以降，EC 2.0区は第3花房以降で高糖度化し，酸度はEC 2.5区が最も高く，EC 2.0区，EC 1.5区の順に低下していた．水分ストレスが強くかかると果実の生重が減少し糖度および糖含量が増加し（早田ほか，1998），酸度は，上部の花房ほど高まる傾向がみられ，熟度の進行および花房段位の上昇に伴って糖度と酸度が増加することが報告されている（寺沢ほか，2008）．本学において2020年に行った実験では不織布の上にビニールシートをかけることによって水分ストレスのかかりすぎを防ぐことができることを報告している（小原・山田，2024）．

毛管水耕栽培装置を使用した高糖度トマトの生産において，強い水分ストレスによる生理障害が発生せず，糖度8.0以上の高糖度化が図れたことから，EC 1.5が最適な施肥濃度である考えられたが，培養液槽の養液の濃度が，供給している培養液の濃度の2～5倍になっていることが観察された．今まで，この単独の栽培装置での栽培では，上位の果房の糖度が高くなることと同時に果実のサイズが小さくなっていた．培養液槽の培養液の濃度上昇が，高糖度化に影響していることが示唆された．

実験4：連結した栽培装置の培養液濃度

連結した栽培装置の培養液のECは，EC 3.0区では他2処理区より大きく変動しEC 10.0 mS/cmまで上昇した．循環型の毛管水耕システム上で栽培期間中の培養液のECの上昇程度は，EC 6.0 dS/mの方がEC 2.0 dS/mより大きく，培養液の成分濃縮が主な要因とし，添加した肥料成分の濃縮により栽培過程のECが上昇するとの報告がある（大石，2002；岡ほか，2004；大石・守谷，2008）．本学においても2022年に行った単独の本装置で確認し報告している（小原・加藤，2025）．また，養液栽培の培養液のECは，高くなるほどトマトへの吸水量が減少し，光合成や蒸散が抑制されるとしている（北条ほか，1996）．

連結した栽培装置でのEC 3.0区での培養液の成分濃縮は，高いECによって植物の生理機能が抑制され，培養液成分の吸収率が低下したためと考えられる．EC 3.0区は，他2処理区より培養液の成分濃縮が強くなりECが変動しやすい環境であったと考えられる．EC 2.0区とEC 2.5区の培養液の硝酸態窒素量は，始終緩やかに増加し，EC 3.0区では他2処理区より大きく増加した．大石・守谷（2008）は，EC 2.0区とEC 6.0区の両区で植物体に吸収されなかった硝酸態窒素が培養液中を循環し増加したと報告している．根域における養液のECの上昇は，吸水抑制による果実糖度を高める効果があり，栄養成長や果実肥大が抑制されるとの報告がある（細川ほか，2005）．また，大石・守谷（2008）では，EC 6.0区はEC 2.0区に比べて収穫果重と平均果重が軽く，糖度が上昇しており，EC上昇による強い水分ストレスが付与されたためと報告している．

独立した栽培装置では，EC 1.5 mS/cmの培養液を供給し続けることでトマトを生産することができた．しかし，高糖度化については，上位の果房では達成すること

ができたが，低段の果房では達成できなかった．これを改善するために，培養液槽の濃度を一定に保つように制御するように養液を管理すると，培養液槽の濃度濃縮がなくなることがわかった．低段の果房の糖度を上げるために栽培初期から濃度を上げて栽培することで糖度8.0以上のトマトを生産することが可能となった．連結した本栽培装置の培養液をEC 2.5で管理すれば水分ストレスによる高糖度化を高めるとともに障害果の抑制を両立できると考えられる．

まとめ

土壌水分センサーを栽培装置に内蔵した毛管水耕栽培装置は，水分制限によって，植物体の茎長および葉数，茎径栄養成長，果実収量，果実品質に影響を与えることがわかった．土壌水分センサーによる水分ストレスを制御するのは困難であったが，不織布に培養液が供給されていることの確認は有効であると考えられる．培養液槽から不織布の栽培面までの距離は，品質や収量に影響しないことから，給水用不織布の面積によって水分ストレスを制御する必要であった．不織布の面積を50％にし底面灌水によって高い水ストレスをかけることができることがわかった．このときの培養液の濃度はEC 1.5 mS/cmが不織布上に最も多く保水していることがわかり，不織布上にルートマットの形成もよく，果実も大きく糖度8.0以上となった．栽培管理および養液管理を容易にし，高糖度トマトを生産するために，栽培装置を複数連結し，培養液の濃度を制御して調査した．培養液層の濃度は，EC 2.5 mS/cmに保つように制御することで，適度な水分ストレスがかかり植物体の生体重や乾物重が大きく，果実サイズも小さくなり糖度も高い高糖度トマトを生産することができた．

この連結した毛管水耕栽培装置は，装置が独立した装置よりも給液の労力が削減されること，チューブで培養装置を連結することによって，個別の培養装置に供給される養液濃度の均一化を図ることができる．湛液型水耕装置を設置する場合の高精度の水平化をする必要がないことから容易に設置することが可能である．また，ポンプなどを稼働させて給液するための電力を必要としない栽培も可能であることから，環境に配慮した栽培装置であり環境負荷低減にも寄与する可能性が示唆される．加えて，不織布面積25.5×16 cm（浮き板の50％）にし，培養液濃度をEC 2.5 mS/cmに保持することよって高品質の高糖度トマトを生産できるものと考えられる．

謝辞

本研究を遂行するにあたり，多くの学生の卒業研究従事し，多大なるデータを収集してくれた学生諸氏に感謝いたします．また，この実験をスタートするにあたって玉川大学農学部農場の有山浩司，山路利英技術指導員には大変お世話になり，ここに感謝申し上げます．総合生物環境コース，生物環境システム学科，持続的農学領域の学生ならびに教員のみなさまには，常に協力いただいたことに厚くお礼申し上げます．

引用文献

青木宏史．1998．改訂／トマト生理と栽培技術．誠文堂新光社．東京．2–164.

早田保義，田部敏子，近藤悟，井上興一．1998．水分ストレスがミニトマト果実の発育と糖および窒素含量に及ぼす影響．園芸學會雜誌 67(5)：759–766.

細川卓也，小松秀雄，吉田徹志，福元康文．2005．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果実の収量・品質に及ぼす影響．植物環境工学 17(1)：26–33.

北条雅章，伊東正，田中晶子．1996．生育段階に応じてEC値を変えて栽培したNFTトマトの生育,収量,品質および生理的特性．生物環境調節 34(2)：129–134.

石上清，堀内正美．1993．栽培養液における高糖度トマトの生産技術．農耕と園芸 48(5)：83–85.

小原廣幸，加藤弘太，鷲見紗耶香，荒巻恵，衛藤麻衣子，有山浩二．2009．毛管水耕栽培におけるしおれ処理がトマトの生育および果実品質に及ぼす影響．農業生産技術管理学会 16（別1）：55–56.

小原廣幸，山田理子．2024．毛管水耕栽培における給水用不織布の違いとビニールシートの有無がトマトの生育および果実品質に及ぼす影響．農業生産技術管理学会 31（別冊）：44–45.

小原廣幸，加藤なずな．2025．毛管水耕栽培装置における液槽内の濃度の違いがトマトの生育に与える影響．農業生産技術管理学会 32（別冊）：15–16.

村松安男．1992．高品質・高糖度のトマトつくり―低水分管理のしくみと実際―.農山漁村文化協会．pp. 13–47.

大石直記．2002．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量に基づく給液制御―．生物環境調節 40(3)：301–310.

大石直記，守谷栄樹．2008．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．植物環境工学 20(3)：165–175.

岡一郎，末紀夫，高橋久幸．2004．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．園芸学研究 3(2)：149–154.

斎藤岳士．2016．塩ストレスがトマト果実品質に及ぼす効果．

農業および園芸 91(5)：507–510.
Shinohara, Y., Maruo, T. and Ito, T. 1993. Effects of Capillary Hydroponic System on the Growth, Yield and Quality of Tomato and Cucumber. The Technical Bulletin of Faculty of Horticulture, Chiba University 47: 1–8.
宍戸良洋. 1991. トマトの葉ごとの養分の流れ先と水管理. 施設園芸 33(12)：15–18.
Terabayashi, S., I. Muramatsu, S. Tokutani, M. Ando, E. Kitagawa, T. Shigemori, S. Date and Y. Fujime. 2004. Relationship between the weekly nutrient uptake rate during fruiting stages and fruit weight of tomato (Lycopersicon esculentum Mill.) grown hydroponically. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science 73: 324–329.
寺沢なお子, 今井希美, 野阪皆水, 鯨幸夫. 2008. 果房段位, 熟度および根域制限水ストレスがトマトの品質およびラジカル消去活性に及ぼす影響. 日本食品科学工学会誌 55(3)：109–116.
Vittum M. T., W. B. Robinson and G. A. Marx. 1962. Raw-product Quality of Vine-ripened Processing Tomatoes as Influenced by Irrigation, Fertility Level and Variety. Proceedings of the American Society for Horticultural Science 80: 535–543.
山崎龍一. 1999. 防根透水シートを利用した高糖度トマトの生産. 高知県農業技術センター研究報告 8：13–21.
圖師一文, 松添直隆. 1998. 土壌水分制限が大果系トマトのビタミンC, 糖, 有機酸, アミノ酸およびカロテン含量に与える影響. 園芸学会誌 67(6)：927–933.

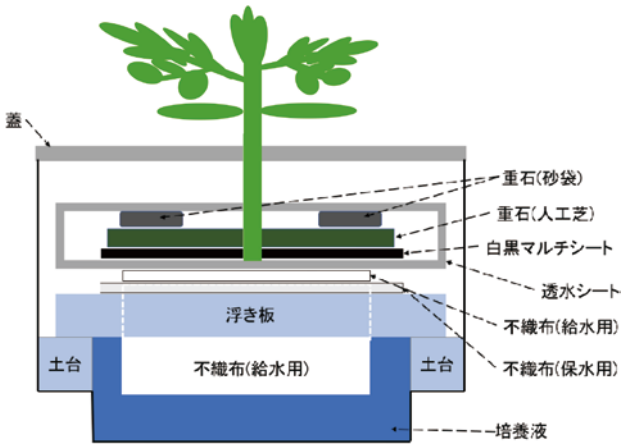


図1　毛管水耕栽培装置の模式図

トマトの苗は本用2～3枚で定植，培養液は大塚SA処方
浮き板の厚さは5 cm，培養液槽容量は6 L

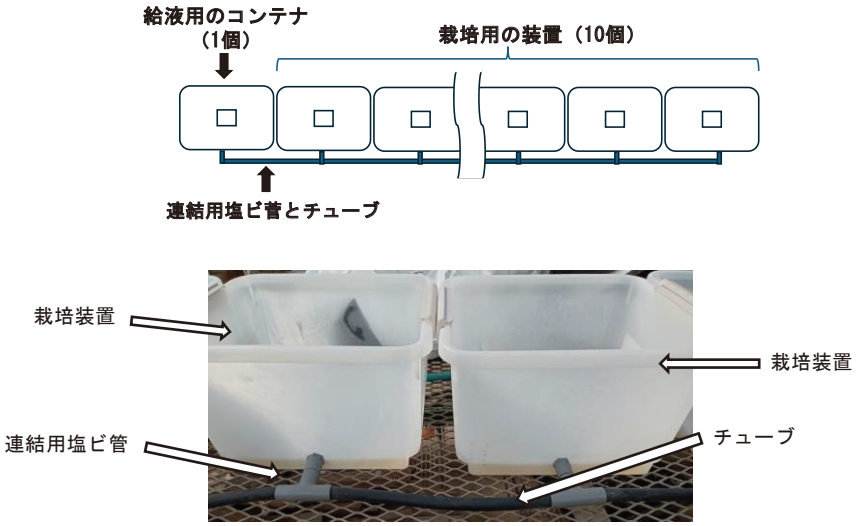


図2　連結された栽培装置

上部：上から見た栽培装置
下部：栽培装置の連結部分

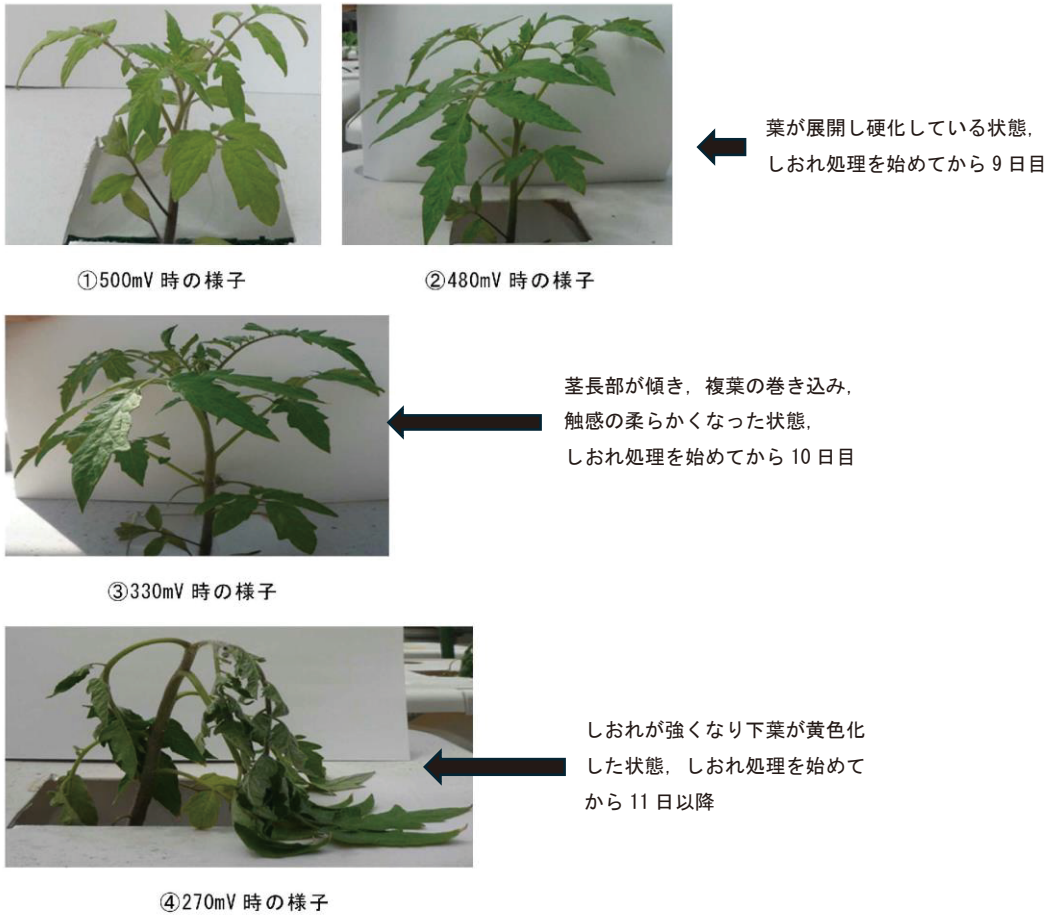


図3　しおれの検討：土壌水分センサーを用いた各電圧時のトマトの様子調査期間：2014年4月16日～29日

品種：ハウス桃太郎，ロックウールで育苗し本葉8～9枚の苗

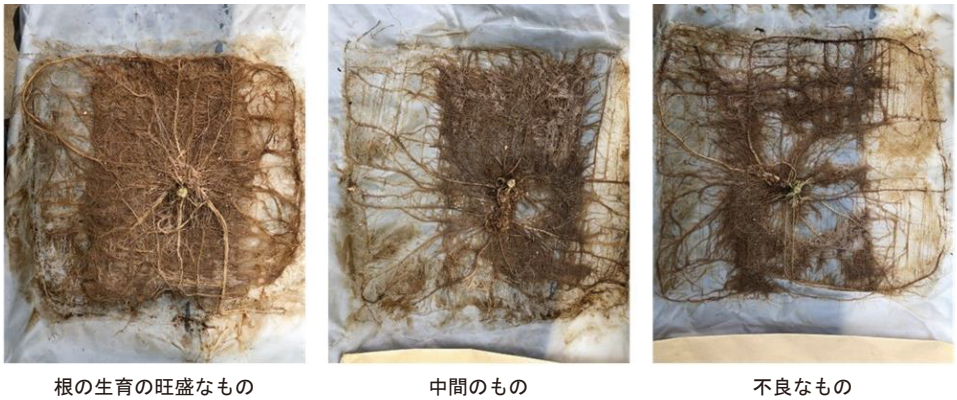


図4　栽培終了時のルートマットの状態

2021年8月最終終了調査時野根の様子，栽培品種はハウス桃太郎
3処理区の中で根の生育の旺盛なもの，中間のもの，不良なものの状態を示した旺盛なもののルートマットは不織布と接地している面に形成されていた．

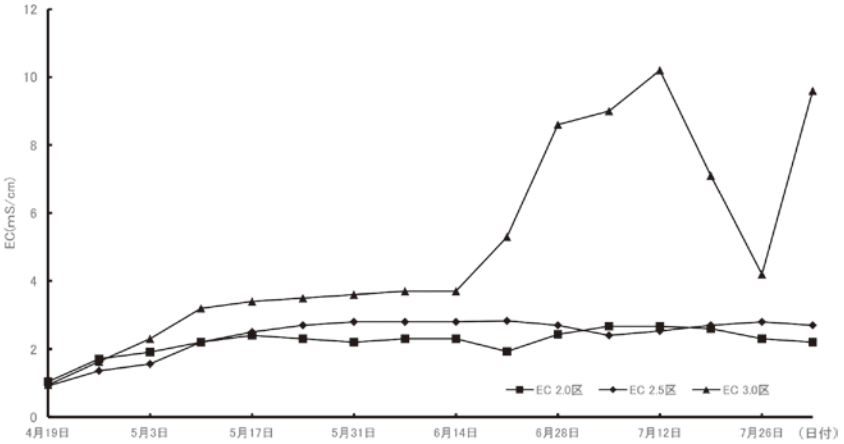


図5　連結した毛管水耕装置における液槽の培養液のECの変化（2023年4～8月，n=3）

表1　土壌水分センサーを用いたしおれ処理がトマトの生体重およびトマトの生体重および乾物重に及ぼす影響

処理区	生体重（g）		乾物重（g）		
	葉	茎	葉	茎	根
350 mV区	23.77 b*	40.56 b	11.08 b	9.25 b	3.14 b
400 mV区	22.91 b	47.66 b	9.95 b	11.21 ab	2.23 b
500 mV区	59.16 a	81.92 a	18.8 a	16.92 a	3.50 a

各処理区10個体とし，栽培期間は2014年3月～8月
*Tukeyの多重検定により異なるアルファベット間には5%水準で有意差あり

表2　土壌水分センサーを用いたしおれ処理がトマトの果実品質に及ぼす影響

	処理区	第1果房	第2果房	第3果房	第4果房	第5果房
糖度（Brix%）	350 mV区	5.1 a*	5.7 a	7.0 a	7.4 a	9.9 a
	400 mV区	5.5 a	4.5 b	5.8 b	7.5 a	8.2 a
	500 mV区	5.2 a	5.0 ab	6.4 ab	7.5 a	8.2 a
硬度（kg）	350 mV区	0.71 a	0.63 a	0.64 a	0.64 a	0.64 a
	400 mV区	0.66 a	0.56 b	0.61 a	0.71 a	0.68 a
	500 mV区	0.85 a	0.57 ab	0.66 a	0.65 a	0.68 a
果肉厚（mm）	350 mV区	5.3 a	5.6 a	5.9 a	5.4 a	3.2 a
	400 mV区	5.1 a	6.5 a	7.7 a	4.5 a	6.0 a
	500 mV区	6.2 a	5.9 a	5.5 a	4.2 a	4.7 a
酸度（g/100 ml）	350 mV区	0.66 a	0.60 a	0.78 a	0.88 a	1.10 a
	400 mV区	0.63 ab	0.48 a	0.57 ab	0.83 a	0.84 a
	500 mV区	0.52 b	0.52 a	0.53 b	0.99 a	0.79 a

各処理区10個体とし，栽培期間は2014年3月～8月
*Tukeyの多重検定により異なるアルファベット間には5%水準で有意差あり

表3　給水用不織布の面積と灌水の違いが果重，縦径，横径に及ぼす影響

	処理区	第1果房	第2果房	第3果房	第4果房
1果重（g）	100%底面	66.0 a*	61.2 a	77.3	29.0 a
	100%頭上	67.6 a	50.1 a	8.0	48.8 a
	50%底面	60.2 a	60.8 a	28.3	20.7 a
	50%頭上	66.5 a	58.9 a	— **	—
縦径（mm）	100%底面	44.4 a	43.1 a	46.1	31.6 b
	100%頭上	45.2 a	40.2 a	18.3	41.1 a
	50%底面	41.3 a	44.1 a	35.1	29.4 b
	50%頭上	44.3 a	42.5 a	—	—
横径（mm）	100%底面	50.0 a	48.6 a	52.5	38.0 a
	100%頭上	50.2 a	45.6 a	25.6	44.5 a
	50%底面	47.9 a	48.1 a	37.1	32.8 a
	50%頭上	48.1 a	48.0 a	—	—

各処理区10個体とし，栽培期間は2017年3月～8月
*Tukeyの多重検定により異なるアルファベット間には5%水準で有意差あり
**植物体の枯死，第3花房は果実数が少ないため検定をしてない

表4　給水用不織布の面積と灌水の違いが糖度，酸度に及ぼす影響

	処理区	第1果房	第2果房	第3果房	第4果房
糖度（Brix%）	100%底面	4.5 a*	4.9 a	6.3	6.2 a
	100%頭上	4.5 a	5.0 a	8.8	6.2 a
	50%底面	5.4 a	5.1 a	7.3	8.6 a
	50%頭上	4.3 a	4.9 a	— **	—
酸度（g/100 ml）	100%底面	0.50 b	0.59 a	0.51	1.07 a
	100%頭上	0.52 b	0.51 a	0.59	0.57 a
	50%底面	0.69 a	0.61 a	0.61	0.41 a
	50%頭上	0.46 b	0.51 a	—	—

各処理区10個体とし，栽培期間は2017年3月～8月
*Tukeyの多重検定により異なるアルファベット間には5%水準で有意差あり
**植物体の枯死，第3花房は個体が少ないため検定をしてない

表5　毛管水耕栽培における施肥濃度の違いがトマトの生体重および乾燥重に及ぼす影響

処理区	生体重（g）		乾燥重（g）		
	葉	茎	葉	茎	根
EC 1.5	447.8 a*	213.6 a	66.3 a	33.8 a	20.0 a
EC 2.0	335.9 ab	190.8 ab	64.0 a	34.7 a	17.2 a
EC 2.5	234.5 b	162.2 b	51.9 a	31.1 a	14.5 a

各処理区10個体とし，栽培期間は2014年3月～8月
*Tukeyの多重検定により異なるアルファベット間には5%水準で有意差あり

表6　連結した栽培装置における培養液濃度の違いがトマトの生体重と乾燥重に及ぼす影響

処理区	生体重（g）		乾燥重（g）		
	葉	茎	葉	茎	根
EC 2.0	109.8 a*	88.6 a	51.7 a	30.8 a	12.8 a
EC 2.5	62.9 a	65.4 a	32.7 a	25.3 a	11.3 a
EC 3.0	73.8 a	90.0 a	38.8 a	29.3 a	11.7 a

*Tukeyの多重検定により異なるアルファベット間には5%水準で有意差あり

表7　連結した毛管水耕装置における培養液濃度の違いがトマトの糖度と酸度に及ぼす影響

	処理区	第1果房	第2果房	第3果房	第4果房	第5果房
糖度（Brix%）	EC 2.0	6.2 c*	7.4 c	7.9 c	7.3 c	7.0 c
	EC 2.5	8.9 a	9.2 a	9.6 a	10.2 a	9.9 a
	EC 3.0	8.5 b	8.9 b	9.2 b	9.1 b	8.7 b
酸度（g/100 ml）	EC 2.0	0.74 a**	0.80 a	0.79 a	0.81 a	0.72 c
	EC 2.5	0.68 b	0.74 b	0.76 ab	0.83 a	0.83 a
	EC 3.0	0.67 b	0.70 b	0.76 b	0.81 a	0.78 b

各処理区10個体とし，栽培期間は2021年3月～8月
*Tukeyの多重検定により異なるアルファベット間には5%水準で有意差あり

The Effect of Stress Cultivation in Capillary Hydroponics on the Vegetative Growth and Fruit Quality of Tomatoes

Hiroyuki Kohara[1], Ryouta Kaozaki[1], Kei Yamazaki[1], Yoshihiro Morisawa[1], Sakika Satou[1], Humita Tsurusaki[1], Ryouta Nagumo[1], Takahiro Oohashi[1], Shouta Amano[1], Atsuta Handa[1]

Abstract

The cultivation method for high-sugar tomatoes typically involves low water management in soil-based cultivation. However, restricting water causes the tomato plants to wilt, assessing the degree of wilting is difficult. Therefore, soil moisture sensors were used to monitor the moisture within the capillary hydroponic cultivation system. This system was devised to maintain consistent plant wilting, and research was conducted on the production of high-sugar tomatoes. It was found that water restricting the supply water by this device affects the vegetative growth of plants, fruit yield, and fruit quality. The difference in non-woven fabric area under bottom irrigation indicated that the 50% bottom irrigation experienced severe water stress, as evidenced by low fruit set rates. In both the 100% bottom irrigation and the 100% overhead irrigation zone, harvesting was possible up to the fourth fruit cluster. In the 50% bottom irrigation, only one fruit could be harvested from the fourth fruit cluster, while in the 50% overhead irrigation, only the second fruit cluster yielded fruit. No difference was observed in live weight. The dry weight of the nutritive organs was heaviest in the 100% bottom-irrigated plots, being 1.8 to 1.9 times that of the lightest 50% overhead-irrigated plots. Following cultivation, the roots in the overhead irrigation had formed a thick root mat, with fine roots spreading out in a matted pattern. Regarding the relationship between non-woven fabric area and nutrient solution concentration, no difference in vegetative growth was observed between nutrient solution concentrations. Furthermore, in terms of fresh weight, the EC 1.5 plots yielded the heaviest harvest, while the EC 2.5 plots yielded the lightest. The soil moisture sensor indicated that EC 1.5 plots retained the most water, and EC 1.5 plots also showed the best root mat formation. In terms of fruit quality, EC 1.5 showed the most significant effect, while sugar content reached 8.0 or above from the third flower cluster onwards, suggesting that EC 1.5 is the optimal fertiliser concentration. Interconnected cultivation units were interconnected to centralise nutrient solution management via hydraulic equilibrium. Using this system, tomato cultivation was compared at EC levels of 2.0 mS/cm, 2.5 mS/cm, and 3.0 mS/cm. The EC of the culture medium within the culture medium tank gradually increased across all treatment areas. The EC 2.5 plots fluctuated around 2.5 mS/cm. In EC 3.0 plots, there was a significant increase. Leaf number remained similar, but stem length increased as EC levels rose. Fruit size showed a tendency for upper clusters to become smaller and individual fruit weight to decrease. Sugar content was highest in the EC 2.5 plot. Fresh weight and dry weight tended to be higher in the EC 2.0 plot. Sugar content in the EC 2.5 plot was the highest among the three treatment plots. This interconnected capillary hydroponic cultivation system offers the advantages of reduced labour for solution supply compared to independent cultivation units. It offers the advantage of uniform nutrient solution concentration. This cultivation system is environmentally considerate as it enables cultivation without relying on electricity-powered water supply using pumps or similar equipment. Furthermore, it has been suggested that it may also contribute to reducing environmental impact. This capillary hydroponic system suggests that maintaining the nutrient solution concentration at a constant EC of 2.5 mS/cm enables the production of high-sugar tomatoes.

Keywords: Hydroponics, Capillary hydroponics, Nutrient solution concentration, High-sugar tomatoes, Non-woven fabric

[1] Department of Agri-environmental Sciences, College of Agriculture, Tamagawa University, 6−1−1 Tamagawagakuen, Machida, Tokyo, 194−8610, Japan