ロックウール粒状綿を利用した養液栽培システムにおける 高糖度トマト生産(第1報) 水切り下における植物生体情報の測定と解析

仁科弘重・吉田 孝・長友亨治・三好正直*・橋本 康

愛媛大学農学部 790-8566 松山市樽味 3-5-7

*シーアイ化成(株) 520-3185 滋賀県甲賀郡石部町石部 3902

Production of Tomato Fruits with High Brix in Nutrient Solution Cultivation System with Granular Rockwool (Part 1) Measurement and Analysis of Physiological Information of Tomato Plants under Water Stress

Hiroshige NISHINA, Takashi YOSHIDA, Kouji NAGATOMO, Masanao MIYOSHI*
and Yasushi HASHIMOTO

College of Agriculture, Ehime University Tarumi, Matsuyama 790-8566, Japan

* *C. I. KASEI CO., Ltd. Ishibe, Ishibe-cho, Kouga-gun, Shiga 520-3185, Japan*

Abstract

The authors are making researches for production of tomato fruits with high Brix in nutrient solution cultivation system with granular rockwool. As the first step of the researches, physiological information of tomato plants under water stress was measured and analyzed.

Tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Hausu-Momotaro) were grown in the nutrient solution cultivation system with granular rockwool in a glasshouse in Ehime University. Measurements of water potential of leaf, transpiration rate, photosynthetic rate, stem diameter and leaf temperature of the tomato plants were made on December 3rd of 1996. It was sunny on the day and no nutrient solution supply was made from 0:00 of the day in the no irrigation treatment.

The water potential of leaf in the no irrigation treatment was lower than that in the control treatment. Difference between the two treatments of the water potential of upper leaf was 0.08 MPa and that of lower leaf was 0.7 MPa at 14:30. The transpiration rate in the no irrigation treatment was much lower than that in the control treatment after 10:30. While the stem diameter in the control treatment decreased by only 0.1 mm, the stem diameter in the no irrigation treatment decreased by 0.7 mm. The leaf temperature in the no irrigation treatment at 10:30 was 3.6°C higher than that in the control treatment. It was considered that this difference was caused by the difference of the transpiration rate.

Furthermore, relationships between the water potential of leaf and the other factors were analyzed. As the results, it was considered that the water potential of leaf could be estimated by the stem diameter or the accumulated solar radiation.

緒 言

温室、植物工場などの施設を利用した農業生産の発展に伴い、野菜の周年栽培が可能となり、トマトも1年中市場に出回るようになった。しかし、量から質の時代となり、消費者はより美味しいものを求めるようになった。現在、糖度の高いトマトは、「フルーツトマト」などの商品名で、これまでのトマトのイメージを超えた食味、甘さが人気を集めている。

現在、筆者らは、高糖度トマトの安定生産を目的として、ロックウール粒状綿を利用した養液栽培システムについて研究を行っている。ロックウール粒状綿は、従来のロックウールと比べると、水分の調節が容易であり、植物に水ストレスを付与しやすく、高糖度トマトを生産できる可能性が高い。しかし、水分の調節が容易であることは、過度の水ストレスが付与される可能性が高いことでもあり、植物の水分状態に応じた給液制御を確立する必要がある。

植物の水分状態の測定、評価に関しては、岩尾・高野^{1,2)}が茎径を中心として様々な測定方法を検討、報告した。トマトへの適用例としては、中原・井上³⁾は、ポット栽培のトマトを対象として、放射温度計、サーモグラフィなどによる測定を行い、赤外線放射测温が水ストレスを連続的に捉える手法として有効であることを示した。また、荒木⁴⁾は、体内水分状態(葉の水ポテンシャル)あるいは土壌水分状態(pF)に基づいてかん水されたトマトの生育について、検討した。さらに、大石・石田⁵⁾は、細粒綿ロックウール栽培によるトマトを対象として、茎径による萎れの評価を行い、茎径が水分管理指標として利用できる可能性を示した。しかし、この実験では、第2果房の上で摘心し、測定も第2果房開花期に行っているため、多段栽培の場合にも茎径が水分管理指標として有効であるかは、不明である。いずれにしても、実際の栽培に近い条件で、水ストレスを付与した時の水ポテンシャル、蒸散速度、光合成速度、茎径、熱画像を同時に測定した例はない。

そこで、筆者らは、研究の第一段階として、ロックウール粒状綿を利用した養液栽培システムで栽培された第5果房開花期のトマトに対して水切り処理を行い、その時の植物生体情報を測定、解析した。

栽培システムおよび栽培方法

実験は、愛媛大学農学部附属制御化農業実験実習施設

Fig. 1 Cross section of the bed of the nutrient solution cultivation system with granular rockwool.

のガラス温室で行った。

栽培ベッドの断面をFig. 1に示す。栽培ベッドは、発泡スチロール製で(外寸125 cm×37 cm×19 cm)、内部に、ビニールシート、吸水シート、簀の子、ロックウール粒状綿(日東紡績, 42RS, 厚さ約30 mm)を順に敷いた。粒状綿の上に、トマトを定植したロックウールキューブ(日東紡績, RF栽培用ポット, 100 mm×100 mm×100 mm)を置き、その両脇に小さな穴(直径0.5 mm以下)の開いた給液チューブを配置し、蓋をした。培養液は、ハンディポンプ(日立製作所, C-P30H)によって培養液タンクから栽培ベッドに給液されるが、余剰の培養液はタンクに戻り、再利用される。このシステムを2つ製作した。

1つの栽培ベッドでは、トマト(ハウス桃太郎, *Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Hausu-Momotaro)を5本栽培した。定植は10月31日であった。着果は第5果房まで、着果数は1果房につき4個とし、第5果房の上は2葉を残し摘心した。培養液は、大塚液肥1号と2号を3:2の割合で混合したものをを用い、ECは2.0 mS・cm⁻¹とし、4日毎に交換した。給液は、180分毎に10分間行った。

実験方法および測定システム

実験は、1996年12月3日(第5果房開花期)に行った。処理区として水切区と対照区を設け、水切区では12月3日0時から給液を停止し、対照区では通常の給液(180分毎に10分間)とした。また、温室内の日射分布を均一にするために、温室内に散光性フィルム(シーアイ化成, シーアイ農ビ(梨地))を展開した。

Fig. 2 Schematic diagram of the measuring system.

測定項目は、乾球・湿球温度、日射量、葉の水ポテンシャル、光合成・蒸散速度、莖径、熱画像である。測定システムの概要を Fig. 2 に示す。水ポテンシャル、光合成・蒸散速度は6時30分から18時30分まで2時間毎に、熱画像は30分毎に、その他の項目は1分毎に測定した。なお、水ポテンシャル、光合成・蒸散速度、莖径は、各栽培ベッドの5本の植物の両端を除いた3本の中の、それぞれ別の植物で測定した。別の植物で測定した理由としては、まず、水ポテンシャルの測定では、葉が採取されてしまうためである。また、光合成・蒸散速度の測定と莖径の測定を同一の植物で行った場合、光合成・蒸散速度測定時の植物の振動、揺れによって、莖径の測定位置にずれが生じるためである。

乾球・湿球温度は、直径0.32mmの銅-コンスタンタン熱電対で製作した乾球・湿球を、塩化ビニール製のパイプ(外径45mm、外側アルミ箔被覆)の中に配置し、パイプの一端にシロッコファンを取り付け、通風状態で測定した。また、温室内日射量は、太陽電池式日射計(英弘精機、MS-100)で測定した。葉の水ポテンシャルは、植物の上部、中部、下部から葉を2枚ずつ採取し、プレッシャーチャンバ(PMS instrument)で測定した。光合成・蒸散速度は、植物の上部、中部、下部の各2枚の葉について、携帯用光合成蒸散測定システム(LI-COR, LI-6400)を用いて測定した。熱画像は、サーモグラフィ(日本電気三栄、TH3102、測定範囲 $-50\sim 250^{\circ}\text{C}$ 、最小検知温度差 0.1°C 、測定精度 $\pm 0.5\%$ 、測定波長 $8\sim 13\mu\text{m}$)を、10本の植物全体が写る位置にセットし、測定した。莖径は、6組のレーザ式外径変位センサ(キーエンス、VG-300/VG-035、最小表示単位 $5\mu\text{m}$ 、光源波長670nm)を、両処理区の植物の上部(第4果房と第5果房の間)、中部(第2果房と第3果房の間)、下部(第1果房の下)にセットし、測定した。水ポテンシャル、光合成・蒸散速度、熱画像以外の測定は、汎用パーソナルコンピュータ(日本電気、PC-9801シリーズ)と、A/D変換とリレー出力ができる信号入出力装置(イー・エス・ディ、Green Kit 88)を用いて行った。測定プロ

グラムは、マイクロソフト社のQuick BASICで作成した。

なお、レーザ式外径変位センサによる莖径の測定では、測定前に、植物の茎に生えている毛をカミソリで剃った。予備実験として、毛が生えたままの状態では莖径の測定を行ったが、測定値が全く安定せず、測定不可能であった。さらに、光源の波長(670nm)が日射に含まれているため、発光面、受光面の両方に筒状の日射よけを取り付けた。

実験結果および解析

12月3日の水切区と対照区の、水ポテンシャル、蒸散速度、光合成速度の経時変化を Fig. 3-a に、莖径、葉温、気温、日射量の経時変化を Fig. 3-b に示す。水ポテンシャル、蒸散速度、光合成速度、莖径については、図の見やすさを優先して上部と下部の値のみを示したが、中部の値は上部と下部の間となることがほとんどであった。また、葉温は、熱画像上の葉が写っている点の温度として求め、両処理区の差の大きい上部の値のみを示した。

水切区の植物の外観については、8時30分までは萎れは見られなかった。10時30分には上部で萎れが見え始め、12時30分には中部でも萎れが始まり、14時30分には中部でもかなりの萎れが見られた。植物の萎れは、日射量、気温の低下に伴い、中部は16時30分に回復し、18時30分には上部も含めて完全に回復した。なお、対照区の植物では、萎れは見られなかった。

1. 水ポテンシャル

水切区の水ポテンシャルは、10時30分以降、対照区の水ポテンシャルと差がみられた。また、14時30分の両処理区の水ポテンシャルの差は、下部の葉では0.7MPaであったのに対し、上部の葉では0.08MPaしかなかった。日射量、気温の低下に伴い、対照区が大きく回復したのに対し、水切区の回復は小さかった。

堅い細胞壁をもつ細胞(成熟した細胞で、ここでは下部の葉)は、伸張性のある細胞壁をもつ細胞(若い細胞で、ここでは上部の葉)よりも、細胞容積や含水量が減少すると、圧ポテンシャルの低下が著しいことは知られている⁶⁾。言い換えれば、伸張性のある細胞壁をもつ細胞では、細胞容積や含水量が減少しても、圧ポテンシャルはそれほど低下しない。水ポテンシャルは、圧ポテンシャルと浸透ポテンシャルの和で考えられるので、水ポテンシャルもそれほど低下しない。水切区の上部の葉では、蒸散による水の損失が吸水を上回り、細胞容積や含水量

Fig. 3-a Diurnal changes in water potential of leaf, transpiration rate and photosynthetic rate of the tomato plants.

が減少し、著しい萎れが起こるが、上述のメカニズムにより、水ポテンシャルはあまり低下せず、対照区との差も大きくならなかった(0.08 MPa)と考えられる。これに対して、下部の葉では、細胞容積や含水量の減少の僅かな差が、水ポテンシャルとしては、大きい差になった(0.7 MPa)と考えられる。

さらに、水切区では、上部の葉の水ポテンシャルはあまり低下せず、結果として下部の葉より高く経過しているが、このことも、上述のメカニズムによるものと考えられる。

2. 蒸散速度、光合成速度

水切区と対照区の蒸散速度は、8時30分まではほとんど同じであったが、10時30分以降、顕著な差がみられた。また、対照区では上部の蒸散速度が下部より大きいものに対して、水切区では上部の蒸散速度の方が小さか

Fig. 3-b Diurnal changes in stem diameter and leaf temperature of the tomato plants and air temperature and solar radiation in the greenhouse.

った。

水切区と対照区の光合成速度の差は、上部では10時30分からみられた。下部では12時30分以降みられ、上部の方が応答が速いことがわかる。

3. 茎 径

両処理区とも日中は収縮がみられたが、対照区の上部が約0.1 mmしか収縮しなかったのに対し、水切区の上部は約0.7 mm収縮した。茎の膨潤した柔細胞には、有効水が多量に存在する。また、茎の柔細胞から葉の細胞までの水の移動に対する抵抗は、根を通過して植物体内に入る抵抗に比べてかなり小さいのが普通である⁷⁾。そのため、蒸散によって水ポテンシャルの低下した葉の細胞に向かって、まず、茎の柔細胞から水の移動が起こる。その結果として、日中、茎径は減少する。夕方からは、蒸散がほとんどなくなり、茎の柔細胞から葉の細胞に向

かつての水の移動は低下するが、根から茎の柔細胞への水の移動が続くために、柔細胞は再び膨潤状態に戻り、茎径も回復すると考えられる。

また、水切区でも、上部は0.7mmも収縮しているが、下部は0.2mmしか収縮しておらず、水ストレスの指標として茎径を利用する場合、上部で茎径を測定する必要があると考えられる。

本実験では、日中茎径が0.7mm収縮しても、夕方には回復することが示された。給液制御の設定値については、どの程度の水ストレスを付与し、どの程度の糖度のトマトを生産するかによって決定されるべきであろう。

4. 葉温(熱画像)

8時30分までは両処理区とも差がみられないが、10時30分には水切区の葉温は対照区よりも3.6℃高くなった。これは、水切区では蒸散速度が10時30分には低下しており、蒸散による葉の冷却作用が小さくなったためと考えられる。また、気温との関係を見ると、対照区ではほぼ気温と同じ変化を示したのに対し、水切区では、12時30分～14時30分には葉温は気温よりも3～4℃高く経過した。15時以降、日射量の低下に伴い、両処理区ともほぼ気温と同じ値となった。

5. 生体情報および環境情報と水ポテンシャルの関係

連続測定可能な生体情報、環境情報(茎径、葉温、気温、日射量)と、水ポテンシャルの間の相関の有無について、検討を行った。

まず、葉温については、水ポテンシャルとの間には相関がみられなかった。この理由としては、Fig. 3-bからもわかるように葉温は(主に気温に追従して)変動が大きいのに対し、水ポテンシャルは、その時刻までの水収支の結果として現れているものであることが考えられる。本質的には、水ポテンシャル、蒸散速度、茎径、葉温の間には関係があると考えられる。しかし、環境要因(日射量、気温)に対する応答が遅い水ポテンシャルや茎径と、応答が非常に速い葉温との相関を解析するためには、システム同定などのデータ処理が必要である。

次に、茎径(上)の減少(6時30分を基準とした)と水ポテンシャル(上)の関係を、Fig. 4に示す。日射による水ストレスが大きい14時30分までのデータについて、一次、二次、指数、対数の関係を仮定し、回帰式と R^2 値を求めた。その結果、指数関係を仮定した場合が、最も高い相関が得られた。

また、積算日射量(0時から)と水ポテンシャル(上)の関係について検討した。日射による水ストレスが大きい14時30分までのデータについて、回帰式と R^2 値を

Fig. 4 Relationship between the stem diameter and the water potential of leaf of the tomato plants.

求めた結果、高い相関が得られた。

これらの結果から、水ポテンシャルを推測する指標として、茎径および積算日射量が有効であると考えられる。現在、茎径、積算日射量を指標とした給液制御による栽培実験を行っており、糖度8以上の果実が得られている。これについては今後報告したい。

謝 辞

本実験を行うにあたって多大な協力をいただいた、愛媛大学農学部施設生産機械学講座卒論生の阿部一博君に感謝の意を表す。本実験を行うにあたって施設の使用を快諾下さった、愛媛大学農学部附属制御化農業実験実習施設長の増井典良助教授に感謝の意を表す。トマトの病害防止にあたって種々のご助言を賜った、愛媛大学農学部植物病理学研究室の松本 勲助教授に感謝の意を表す。また、測定システムなどに関してご助言を賜った、ミック電子工業(株)松山工場の松本耕二氏にも謝意を表す。なお、本実験で用いたサーモグラフィと携帯用光合成蒸散測定システムは、愛媛大学地域共同研究センターの備品をお借りした。関係諸氏に謝意を表す。

引用文献

- 1) 岩尾憲三・高野泰吉: 植物生体情報の計測手法の開発とその応用に関する研究(第1報)植物体内水分の非破壊連続測定法の開発, 生物環境調節, 26(3): 139-145(1988)
- 2) 岩尾憲三・高野泰吉: 植物生体情報の計測手法の開発とその応用に関する研究(第2報)植物体内水分動態の諸特性, 生物環境調節, 26(4): 163-170(1988)

- 3) 中原正一・井上吉雄：赤外線放射測温によるトマトの水ストレス反応の検出，農業気象，53(3)：191-199(1997)
- 4) 荒木陽一：体内水分状態あるいは土壌水分状態に基づいてかん水された施設栽培トマトの生育，園学雑，63(1)：91-97(1994)
- 5) 大石直記・石田伸治：トマトの茎径測定によるしおれの評価，園学雑，63 別 1：276-277(1994)
- 6) 田崎忠良：細胞の水関係，田崎忠良監修：水環境と植物，養賢堂，pp. 22-55(1986)
- 7) 石原 邦：水欠乏と植物の生長，田崎忠良監修：水環境と植物，養賢堂，pp. 351-403(1986)