連載記事

「本学会のパラダイムと学術用語」 (第七回)

地下部環境制御による高付加価値植物の生産

彦坂晶子

(理事長補佐, 千葉大学大学院園芸学研究院 准教授)

Production of High Value-added Plant by Controlling the Root-zone Environment

Shoko HIKOSAKA

(Graduate School of Horticulture, Chiba University)

1. はじめに

植物の地上部 (above ground part) をとりまく物理環境要因 (physical environmental factors) には, 光, 温度, 水, ガスがあり, このうち光以外は地下部 (root zone) にも当てはまる。光合成を行う地上部と, 水や無機成分 (mineral nutrition) を吸収する地下部は連続しており, 地下部環境の制御によって地上部の成長速度や物質生産能力は変化する。従って, 地下部環境を好適な範囲に制御することで, 植物全体の成長を促進し, 収穫部位のバイオマスを増やすことができる。他方, 地下部環境を一時的に好適でない条件に制御することで, 植物体に環境ストレスを付与し, 目的とする一次・二次代謝物質濃度が高まる事例が報告されている。本記事では, 植物の生育や代謝物に影響する地下部環境に着目し, 地下部環境ストレスを利用した高付加価値植物の生産・研究事例を紹介する。

2. 制御可能な地下部環境条件

一般に, 植物生産に用いられる培地 (substrate) には, 土壌, ロックウール, 有機質培地 (organic substrate), 培養液 (nutrient solution) などがある。江口 (2021) は本誌の記事¹⁾で, 固形培地耕と水耕の種類, およびそれぞれの物理特性などを詳細に紹介し, 制御可能な地下部環境として, 温度, 培養液組成・濃度, 通気性, 根域を挙げている。また, 養液栽培の最適化ついて, 吉田 (2018) は本誌記事²⁾で, 培養液の電気伝導度 (electrical

conductivity, EC) および酸性度 (pH) の制御の必要性, エアレーション (aeration) による溶存酸素 (dissolved oxygen) の付加やファインバブル (fine bubble) の利用などを紹介している。いずれの記事も地下部環境を理解するための基本情報や, 植物の成長促進のために地下部環境を好適範囲に制御することの重要性を記しているため, 本記事と合わせて参照されたい。

本記事では, 植物体にストレスを付与することを前提としているため, 以下に挙げた地下部環境条件には, 通常の生産では考慮しない項目も含まれる。

- 培地・培養液温度 (substrate / nutrient solution temperature) /
- 含水率 (water content ratio)
- 浸透圧 (osmotic pressure), 水ポテンシャル (water potential)
- 無機成分 (mineral nutrition)
- 電気伝導度 (EC)
- 酸性度 (pH)
- 溶存酸素濃度 (DO), ファインバブル (fine bubble, micro-nanobubble)
- 化合物 (chemical compound) など

これらの項目のうち, 本記事では, 研究報告や実用事例の多い地下部環境ストレスとして「培地・培養液温度」と, 含水率と浸透圧をまとめた「吸水」を取り上げ, これらの制御方法と研究事例や実用事例について紹介する。

3. 培地・培養液温度ストレス

地下部の温度は、根の呼吸速度や代謝に直接影響する。地下部温度が高いほど根の呼吸速度 (respiration) は高くなることから、地上部の光合成速度が一定であったとしても、全体での成長速度 (growth rate) は低下する。また、地上部と地下部は常に熱交換 (heat exchange) をしているため、培地や培養液量が少ないほど気温の影響を受けやすい。植物工場では、薄膜水耕 (nutrient film technique, NFT) の方が湛液水耕 (deep flow technique, DFT) よりも気温の影響を受けやすく、明期の培養液温が気温と同等になることがある。

通常の栽培期間中に根が遭遇する温度は 20 ~ 25 °C であり、これを大きく逸脱する温度が続く場合を温度ストレスと考える。ただし、植物種によっては 15 °C、あるいは 30 °C でも良好な生育を示すものもあるので、高付加価値植物を生産するためには、まず、生育や目的物質濃度が変化する温度域を植物種ごとに確認する必要がある。

【培地耕】培地の温度制御には、温湯・冷却水を流す管を培地に埋設する方法があるが、培地内での温度ムラが生じることや、設備やランニング費用がかかることから、導入は限られており、イチゴなど局所的な加温・冷却装置として利用されている。培地内の温度は培地内の水分分布や含水率の影響を受けるため、平均的な温度を測定するためには、熱電対 (thermocouple) などでの多点計測が必要である。

【水耕】研究目的で培養液を加温・冷却するには、一般に、培養液中に加温用ヒータと冷却管を投入し、温度調節器で制御する。培養液をエアレーションや水中ポンプなどでよく攪拌することで培養液温度が均一になり、再現性の高い研究が行える。ただし、比熱の大きい培養液を加温・冷却するには多大なエネルギーが必要である。特に DFT では水量が多いほど温度制御にエネルギーが必要であり、現状では商業的な利用はコスト面で難しいと考えられる。これは余談だが、培養液温度の研究では極端な低・高培養液温が設定されることが多く、DFT コンテナからの蒸発やコンテナ周りの結露が発生することに注意が必要である。特に植物工場では、結露水が漏電事故につながる可能性があり、コンテナ内の培養液温度を一定に保つためにも、保温カバーやマットが必要である。

【研究・生産事例】培養液温度による高付加価値植物生産の事例では、高培養液温の例は少なく、多くは低培養液温処理である。北野ら (2008)³⁾ は、収穫 2 週間前のホウレンソウを 5 °C で 1 週間栽培した後、20 °C で 1 週間栽培することで、高糖度・高アスコルビン酸となり、高付加価値野菜が生産できたと報告した。また薬用赤ジソ⁴⁾ では、10 °C で 6 日間

の培養液温処理により、薬用成分でフェニルプロパノイド (phenylpropanoids) の一種であるロスマリン酸 (rosmarinic acid) と、フラボノイド (flavonoids) の一種であるルテオリン (luteolin) 濃度が 15 °C および 20 °C より増加した。地上部および地下部環境ストレスによる植物の二次代謝物の増加事例については、後藤 (2019) が本誌記事⁵⁾ で詳細に紹介しているので、ここでは割愛する。

低培養液温処理を開始すると、植物体が一時的に萎れることがある。この萎れは間もなく回復することから、急激な地下部温度の変化で吸水ストレスが生じ、一時的な気孔閉鎖や吸水の回復などが短時間で起きていと推察される。既往研究の多くでは、数日間に及ぶ低培養液温処理で二次代謝物の増加がみられることから、この処理開始直後の一時的な萎れは、その後の二次代謝の変化には直接関連しないと考えられる。しかし、低培養液温処理の際、植物体を定植してから徐々に培養液温を下げていく方法と、設定した温度になってから植物体を定植する方法とでは、植物の馴化 (acclimatization, acclimation) 状態が異なる可能性がある。短期処理の場合は注意する必要がある。

4. 吸水ストレス

植物体の生育や構造維持に欠かせない水分は、そのほとんど全てが根からの吸収で賄われる。この吸水を抑制する環境ストレスとして、含水率、浸透圧、培養液温などがある。このうち、ストレスとして定量的に制御しやすいのは浸透圧である。

水の移動経路は SPAC (soil-plant-atmosphere continuum) という概念で説明され、これは土壤から吸収された水が植物を経由して、蒸散という形で大気に至るまでの連続体として理解されている。蒸散の駆動力 (driving force) は飽差 (vapor pressure deficit) であり、SPAC 中の水はすべて水ポテンシャル (water potential) 勾配に沿って移動し、この勾配が消失すると植物体内での水移動がなくなる。例えば、飽差が大きいかも関わらず培地が水分欠乏 (water deficit) になると、地上部への水分供給が低下し、体内の水損失を防ぐために気孔が閉鎖することで光合成速度が低下する。さらに吸水ができない状態でクチクラ (cuticle, cuticula) 蒸散が続くと、植物は萎れてやがて枯死する。つまり、吸水抑制は、SPAC の入口に大きな抵抗 (resistance) を付与することで植物体全体の含水率および葉内水ポテンシャルを低下させるストレスである。

【培地耕】培地耕の場合、地上部の飽差を大きくし、蒸散速度を高めるほど速く培地内の含水率が低下する。この方法はかん水量を制限するだけなので、容易かつ低コストで吸水

ストレスを付与できる。ただし、含水率は蒸散に応じて徐々に低下するため、天候や時刻ごとに変化し、一定値に制御することはできない。培地中の含水率が低下すると培地中の水分分布は不均一になるため、土壌水分センサーでは位置によって値が異なり、正確な水分制御はできない。そこで、定期的なかん水によって萎れと回復をくり返す植物地上部の情報を利用し、茎径 (stem diameter) 計測やロードセル (load cell) による重量計測⁶⁾、画像計測 (image analysis)⁷⁾などで萎れ度 (wilting degree) を数値化する手法が提案されている。

【水耕】水耕の場合、培養液中の無機成分全体の濃度を高める⁸⁾ (高 EC) ほか、NaCl や高分子のポリエチレングリコール (polyethylene-glycol, 以下 PEG) を添加することで培養液浸透圧を高め、吸水ストレスを付与する方法が利用されている。この場合、添加する塩類や PEG の費用、排液処理の問題などがあり、上述のかん水制限よりもコストがかかる。しかし、この手法では培養液中の浸透圧が制御しやすく、浸透圧計 (osmometer) やサイクロメーター (psychrometer) で実測できるため、再現性に優れた地下部環境ストレスと言える。

【研究・生産事例】吸水ストレスに対する応答は、地上部の光合成だけでなく、植物体内の代謝にも大きく影響する。例えば、地下部の浸透圧が上昇 (水ポテンシャルが低下) すると、植物体の根は高分子化合物を分解してプロリンなどの低分子化合物を多く含有することが知られている。また、乾燥、PEG、NaCl 添加などの吸水ストレスが多様な二次代謝物質を含むハーブ (herb) や薬用植物 (medicinal plant) の機能性成分 (functional compounds) や生理活性物質 (bioactive compounds) 濃度を高める報告は多い。近年、かん水制御や培養液中への NaCl 添加などで、高糖度トマト (high Brix tomato, high sugar tomato)³⁾ や高機能野菜の生産事例も増えている。今後、糖度や機能性成分など、目的とする物質濃度を予測・制御するためには、様々な手法で地下部・地上部の植物情報を取得し、吸水ストレスの程度、頻度、継続時間などをより精度良く制御できる技術開発が必要である。

5. おわりに

地上部の環境ストレスに対する植物応答については、これまで多くの研究がなされているが、可視化 (visualization) や数値化 (digitization) しにくい地下部の環境ストレスに関する研究は、地上部の研究ほど多くない。例えば、高糖度トマトのかん水制限などは、地域や気候によって吸水ストレスの再

現が難しいため理論化されておらず、現状、経験に基づいて生産されている。他にも、地下部の環境ストレスが植物の生育や一次・二次代謝に影響することは古くから知られているが、このメカニズムの解明はまだ研究途上である。

これまで養液栽培の普及と共に、地下部環境を積極的に制御する方法や技術が開発されてきた。本記事では割愛したが、最近では、培養液へのファインバブル添加など、地下部環境に新たな条件を与える技術開発も進んでおり、今後の展開が注目される。また、培養液への化合物添加によって、植物の二次代謝を変化させ、目的とする物質を効率的に高め、逆に、不必要な物質を低下させるような、二次代謝の生合成の制御技術の研究開発も進められている。今後さらに環境ストレスと代謝メカニズムの解明が進み、より精度よく地下部環境を制御する技術開発が進むことで、高付加価値植物の自動生産や目的物質の効率生産といった実用展開が期待される。

引用文献

- 1) 江口壽彦. 「植物環境工学の研究展望」 (第十二回) 養液栽培と環境調節. 植物環境工学. 33: 54–59. 2021.
- 2) 吉田敏. 「植物環境工学の研究展望」 (第二回) 栽培植物のイオン吸収と養液栽培技術. 30: 143–148. 2018.
- 3) 北野雅治, 日高功太, 圖師一文, 荒木卓哉. 養液栽培における根への環境ストレスの応用による野菜の高付加価値化. 植物環境工学. 20: 210–218. 2008.
- 4) Ogawa, E., Hikosaka, S., Goto, E. Effects of nutrient solution temperature on the concentration of major bioactive compounds in red perilla. Journal of Agricultural Meteorology. 74: 71–78, 2018.
- 5) 後藤英司. 「植物環境工学の研究展望」 (第四回) 環境ストレスと二次代謝. 植物環境工学. 31: 7–20. 2019.
- 6) 大石直記, 今原淳吾, 可児裕規. 高糖度トマト養液栽培におけるロードセルを用いた植物重量計測に基づく給液制御システムの開発. 植物環境工学. 30: 94–102. 2018.
- 7) 高山弘太郎, 仁科弘重, 山本展寛, 羽藤堅治, 有馬誠一. デジタルカメラを用いた投影面積モニタリングによるトマトの水ストレス早期診断. 植物環境工学. 21: 59–64. 2009.
- 8) Lee, J., Hiyama, M., Hikosaka, S., Goto, E. Effects of concentration and temperature of nutrient solution on growth and camptothecin accumulation of *Ophiorrhiza pumila*. Plants. 9. 793. 2020. doi:10.3390/plants9060793.

※ 用語のリストは日本生物環境工学会のホームページに掲載しています。次の URL を参照して下さい。

<http://jsabees.org/tterms>