

太陽光植物工場に実装可能な植物診断技術 -BVOC 計測×光合成機能診断ロボット-

○高山弘太郎

愛媛大学大学院農学研究科・植物工場研究センター

1. はじめに

太陽光植物工場は、太陽光エネルギーを最大限に活用して大規模な農作物生産を行う施設であり、二酸化炭素・気温・湿度等を対象とした環境制御技術と ICT・自動化・機械化等の先端工業技術との融合により、地域における農作物生産の効率を最大化するシステムとして確立されつつある(図1)。また、太陽光植物工場先進国のオランダでは、競争力強化を目的とした超大規模化(経営・生産規模の拡大)が進行しており、栽培面積が数十 ha に達する生産者も出現している。さらに、このような大規模生産における増収・計画安定生産・高品質化を目的とした環境制御技術の高度化・ICT 化の流れは年々加速している。



図1 わが国の太陽光植物工場におけるトマト生産

一方、このように高度化した環境制御技術の性能を十分に発揮させるためには、植物の生育状態に合わせて環境制御の設定値を適切に更新し続ける必要があるだけでなく、病虫害の早期検知と即座の対処は必須である。つまり、病虫害の早期検知を含めた植物の生育状態の見極め能力の高低が生産性の高低に直結することになるが、この「植物の生育状態の見極め」は、いまだに栽培管理者の目視による観察と経験に基づいた主観的判断に委ねられており、毎日の植物の生育状態を評価するための信頼できる数値データが存在しない。他方、近年のセンシングデバイスの低廉化と IoT の普及により、太陽光植物工場に実装可能な植物生体情報計測(フェノタイピング)技術が提案されつつあり、ビッグデータ解析技術や AI 技術との連携を通じて「植物の生育状態の見極めの数値化」が現実味を帯びてきている。

2. スピーキング・プラント・アプローチにおける植物診断

スピーキング・プラント・アプローチ(SPA: Speaking Plant Approach)コンセプトは、様々なセンサを用いて植物生体情報を計測して生育状態を診断し、その診断結果に基づいて栽培環境を適切に制御するというもの¹⁻³⁾であり、太陽光植物工場の生産性を向上させるための切り札として世界的に注目されている^{4,5)}。そして、非破壊・非接触タイプの植物生体情報計測技術は、SPA における最重要技術に位置づけられている。平成 21 年度に創設された愛媛大学植物工場研究センターでは、太陽光植物工場に実装可能な植物生体情報計測技術の開発を推進しており、これまでに、太陽光植物工場で栽培されている作物を対象とした高精度生体情報計測が可能な各種計測システムを提案している。本稿では、われわれの研究開発成果として商業的太陽光植物工場に実装が可能な植物生体情報計測技術を紹介する。

3. クロロフィル蛍光画像計測ロボットによる高精度生体情報計測

図2は、筆者らが基盤技術を開発し、井関農機(株)より市販されたクロロフィル(以降、Chl)蛍光画像計測ロボット(PD6C)である。本装置は太陽光植物工場内の1レーンを夜間に自動走行し、トマト个体群

のChl 蛍光画像を計測する。Chl 蛍光は、Chl が吸収した光エネルギーのうちで光合成に使われずに余ったエネルギーの一部が赤色光として捨てられたものである。青色LEDを用いて植物葉に青色光を照射(励起光)すると、植物葉は照射光の反射光と光照射により励起されたChl 蛍光を発する。CCDカメラの前部にロングパスフィルタ等を配置して青色の反射光成分を除去することで、Chl 蛍光画像の撮像が可能となる⁶⁾。

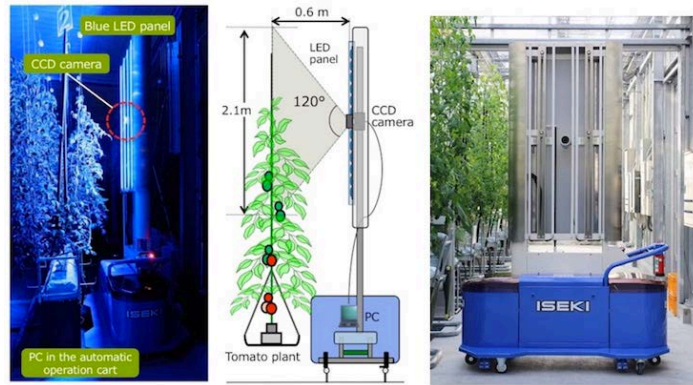


図2 愛媛大学植物工場研究センターの研究成果として井関農機(株)より市販されたクロロフィル蛍光画像計測ロボット

暗条件におかれた植物葉に一定の強さの励起光照射を開始すると、Chl 蛍光強度が経時的に変化する現象が確認される。この現象はインダクション現象とよばれ、Omasa et al. (1987)⁷⁾により世界で初めて画像計測された。インダクション現象中の蛍光強度変化を表す曲線をインダクションカーブとよび、その形状は葉の光合成能力の高低や種々のストレスの影響を受けて変化するため、カーブの形状指標(P/SやM/Sなど)

を用いることで光合成機能診断が可能⁸⁾となる。図3は、Chl 蛍光画像計測ロボットを用いて計測した研究用太陽光植物工場(愛媛大学植物工場研究センター)の1区画(20 m × 11 m)の光合成機能マップである。中央南側の植物体の光合成電子伝達活性が高いことが分かる。

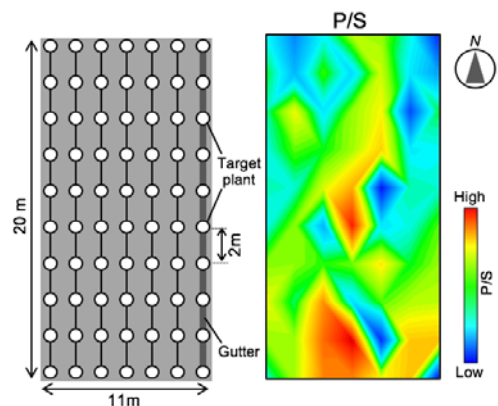


図3 実験用太陽光植物工場内のトマト个体群の光合成機能マップ

4. 匂い成分計測システムによるストレス早期検知技術

植物は、多種多様な揮発性有機化合物(BVOC)を合成して大気中に放出しているが、様々なストレスの影響を受けてその放出量(匂いの強さ)や質(匂い成分の構成比)が変化することが知られている。このことは、植物が発する匂い成分をモニタリングすることで、植物の健康状態の把握が可能であることを意味する^{9,10)}。ここでは、匂い成分計測による植物診断の一例として、携帯型匂い成分分析装置(zNose[®])を用いたトマトの水ストレスの早期検知例を紹介する。

zNose (Model 4300, EST, USA)は、植物工場におけるOn-siteでの匂い成分分析が可能な装置であり、空気に含まれる匂い成分の濃縮捕集(エアサンプリング)、捕集物質の加熱脱着とガスクロマトグラフィによる分離、SAW(Surface acoustic waves)センサによる分離物質の定量を行う。わずか2分間の計測時

間で ppb レベルの匂い成分の定量検知が可能である。なお、本実験では、葉の表面をブラシで優しくブラッシングして匂い成分放出を促進した直後に計測を行った(図4)。

図5は、毎日給液を行っている対照区(Healthy)と給液停止後7日目の水ストレス区(Stress)を対象として zNose を用いて計測したクロマトグラムである。いずれのピーク(Peak-1, 2:モノテルペン, Peak-3, 4:セスキテルペン)についても水ストレス区が対照区よりも大きくなっており、水ストレスにより匂いが強くなるのが分かる。また、各匂い成分の放出比を求めたところ、モノテルペン同士の比(Peak-1/Peak-2)およびセスキテルペン同士の比(Peak-3/Peak-4)が対照区と水ストレス区で変化していないにも関わらず、モノテルペンに対するセスキテルペンの比(Peak-3/Peak-1, Peak-3/Peak-2)が水ストレス区(Stress)で有意に大きくなっていった。このことは、水ストレスによって匂いの質も変化することを示唆している。



図4 zNoseによる匂い成分計測の様子(ブラッシング処理と on-siteでの空気サンプリング)

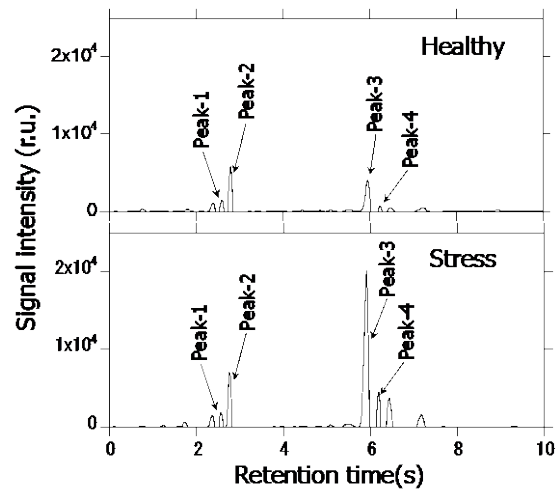


図5 水ストレスがテルペン類の放出に及ぼす影響 (Peak-1・2:モノテルペン, Peak-3・4:セスキテルペン)

5. まとめと展望

本稿で紹介した植物生体情報計測技術は、太陽光植物工場等の高度な環境制御機能を有する農業生産現場に「人間の判断をサポートするための植物生育状態の数値評価技術」として実装されることが期待されている。もちろん、計測システムの低コスト化や環境制御システムとの連携等、多数の課題はあるが、クロロフィル蛍光画像計測ロボットを用いた商業的太陽光植物工場での高精度生体情報の取得が始まったことは事実である。また、このような高精度生体情報をベースにしてAI技術により生産性を高めることを目標としたプロジェクト「AIを活用した栽培・労務管理の最適化技術の開発」(農林水産省「人工知能未来農業創造プロジェクト」, 筆者が研究代表者)も進められている(図6)。なお、生産現場では、過去の時系列データの解析に基づいた将来予測が求められるが、現時点において、ディープラーニングなどの先端AI技術をこのような目的で活用できるか否かは検討を要するところである。そこで、将来の本格的なAI活用に向けた第一ステップとして、高精度生体情報・高精度労務情報・環境制御情報を用いたルールベースモデルの構築を急ぐべきである。これにより環境制御や労務管理の効率化を実現

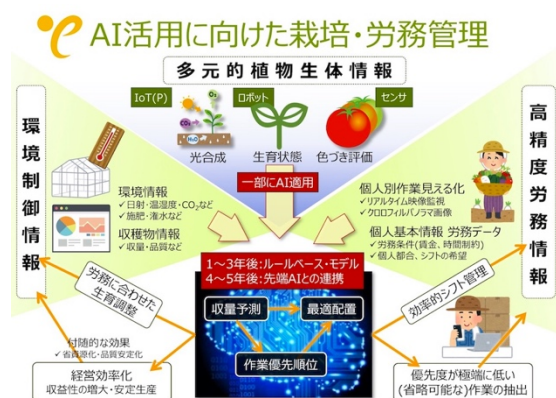


図6 AI活用に向けた高精度生体情報を中心とした管理

することで、高精度生体情報に基づいた農作物生産の社会実装が完了するとともに、蓄積されるデータは先端的AI技術活用のための学習に用いることができると期待される。

引用文献

- 1) Udink ten Cate AJ, Bot GPA, van Dixhoorn JJ. Computer control of greenhouse climates. *Acta Hort.* 87: 265-272. 1978.
- 2) Hashimoto Y. Computer control of short term plant growth by monitoring leaf temperature. *Acta Hort.* 106: 139-146. 1980.
- 3) Hashimoto Y. Recent strategies of optimal growth regulation by the speaking plant concept. *Acta Hort.* 260: 115-121. 1989.
- 4) 橋本 康. 太陽光植物工場における俯瞰的科学技术の流れ-植物生体情報(SPA:植物学)と栽培プロセスのシステム制御(工学)-. *植物環境工学.* 25: 57-64. 2013.
- 5) van Straten G, van Willigenburg G, van Henten E, van Ooteghem R. Optimal control of greenhouse cultivation. CRC Press, Boca Raton, FL. 1-305. 2010.
- 6) 高山弘太郎, 仁科弘重. 施設園芸における植物診断のためのクロロフィル蛍光画像計測. *植物環境工学.* 20: 143-151. 2008.
- 7) Omasa K, Shimazaki K, Aiga I, Larcher W, Onoe M. Image analysis of chlorophyll fluorescence transients for diagnosing the photosynthetic system of attached leaves. *Plant Physiol.* 84: 748-752. 1987.
- 8) Takayama K, Miguchi Y, Manabe Y, Takahashi N, Nishina H. Analysis of Φ PSII and NPQ during the slow phase of the chlorophyll fluorescence induction phenomenon in tomato leaves. *Environ. Control Biol.* 50: 181-187. 2012.
- 9) Jansen RMC, Hofstee JW, Wildt J, Verstappen FWA, Bouwmeester HJ, van Henten EJ. Induced plant volatiles allow sensitive monitoring of plant health status in greenhouses. *Plant Signaling Behav.* 4: 1-6. 2009.
- 10) Takayama K, Jansen RMC, van Henten EJ, Verstappen, FWA, Bouwmeester HJ, Nishina H. Emission index for evaluation of volatile organic compounds emitted from tomato plants in greenhouses. *Biosystems Eng.* 113: 220-228. 2012.

Plant diagnosis techniques for commercial greenhouse agricultural production -BVOC measurement technique and photosynthetic function monitoring robot-

Kotaro Takayama

Graduate School of Agriculture, Ehime University

Research center for high-technology greenhouse plant production, Ehime University