

論壇

実装型植物生体情報計測技術による農学の農業への貢献

豊橋技術科学大学エレクトロニクス先端融合研究所教授

愛媛大学大学院農学研究科教授

高山弘太郎

はじめに

(1) わが国の情勢変化と新たな農業生産システムの必要性

わが国の農業は大きな転換期にある。農業生産の担い手の高齢化が極限に達し、次の段階である大離農のステージに移りつつある。農林水産省の統計によれば、基幹的農業従事者（仕事として主に自営農業に従事する者）の平均年齢が、2015年の67.0歳をピークに、2016年には66.8歳、2017年には66.6歳まで連続して低下した。これは、急激な農業生産人口の減少の始まりを意味する。つまり、これまでの農業の中心的担い手であった平均年齢よりも少し高齢の層（1926年～1934年世代）が急激に離農し始めたため、統計上、平均年齢が低下したものである¹。この傾向が続けば、2035年の農業就業者数は2010年と比較して2/3以下になるとの予測もある¹。一方、昨今の世帯構成の変化や女性の労働参加の高まり、さらには、中高年層の健康志向を受け、サラダ（加工された生鮮野菜）の購入金額が2009～2017年のわずか8年間で約1.6倍になっている²。このような情勢の中、今後もニーズの拡大が想定されるサラダ用生鮮野菜を安定的に供給する農業生産システムの構築が急務となっており、その有力な候補として、植物工場がその栽培面積を拡大している^{3, 4}。

(2) 植物工場の現状

植物工場は、人間が環境を制御して農作物生産を行うシステムであり、人工光（型）植物工場と太陽光（型）植物工場に大別される。人工光植物工場は、LED等の人工光源を用いて光合成を行わせるため、光の強度やスペクトルを含めた高度な環境制御が可能な生産システムであり、コンビニエンスストアチェーンや外食産業への葉菜類の安定供給源として急速に普及しつつある。一方、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（栽培面積が1 ha以上）な農作物生産を行う施設であり、高度な環境制御技術により、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。実用化されている環境制御技術としては、セミクローズド温室に一定の到達点をみる（図1）。セミクローズド温室は、換気（温室内外の空気の入れ換え）と室内の空気循環をほぼ完全に制御することで栽培環境の安定化と最適化（高CO₂濃度かつ適切湿度）を極めて高いレベルで実現し、わが国においても70 kg m⁻²超のトマト生産（一般的な温室の4～5倍の生産性）を達成している。

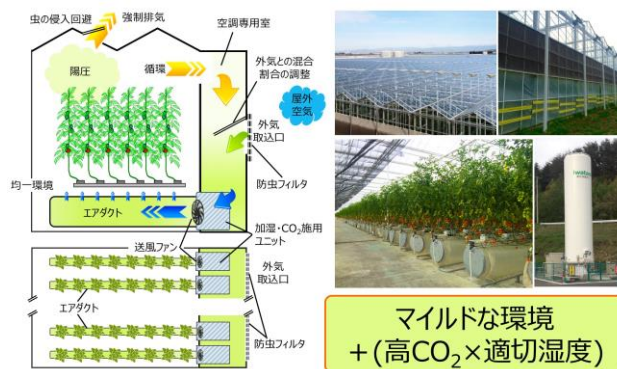


図1 セミクローズド温室の環境制御の特徴

(3) 植物工場環境制御に不可欠なスピーキング・プラント・アプローチ

最新の植物工場に導入される高度な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り、「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。近年のセンシングデバイスの低廉化とIoTの普及により、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。

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^{5,6}であり、植物工場の生産性を最大化させるための切り札として世界的に注目されている⁷。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おり、今後3～5年間の「人間（栽培管理者）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」として生産現場に実装されるフェーズを経て、5～10年後には、「人間の代わりに環境制御に関する判断を行う技術」として環境制御システムに組み込まれることが想定される。

本稿では、筆者が研究代表者をつとめる農林水産省人工知能未来農業創造プロジェクト「AIを活用した栽培・労務管理の最適化技術の開発」（2017～2021年度）の研究開発の成果物として商業的植物工場への実装が進みつつある光合成蒸散リアルタイムモニタリングシステムとクロロフィル（以降、Ch1）蛍光画像計測ロボットについて概説し、実装型植物生体情報計測技術による農学の農業への貢献について展望する。

生産現場に実装されつつある植物生体情報計測技術

(1) 光合成蒸散リアルタイムモニタリングシステム

図2は、筆者らが開発したトマト個体群を対象とした光合成蒸散リアルタイムモニタリングシステムの模式図と写真である^{8,9}。本システムは、下部が開放されているチャンバ（透明なプラスチックバッグ）に、栽培されている状態のトマト2個体を内包する。上部のファンによりチャンバ内空気を継続的に排気し、チャンバ下部の開口部からチャンバ内に流入す

る空気 (Inflow air) とチャンバから排出される空気 (Outflow air) の CO₂ 濃度差および H₂O 濃度差を計測することにより (開放型同化箱法)、光合成速度と蒸散速度のリアルタイムモニタリングを可能にする。なお、本システムは、安価な CO₂ 濃度センサ・H₂O 濃度センサを用いているにもかかわらず高精度な光合成蒸散計測を可能にした画期的なシステムであり、大学発ベンチャーの PLANT DATA(株)と協和(株)ハイポニカが共同で 2019 年 9 月に市販化を発表した。

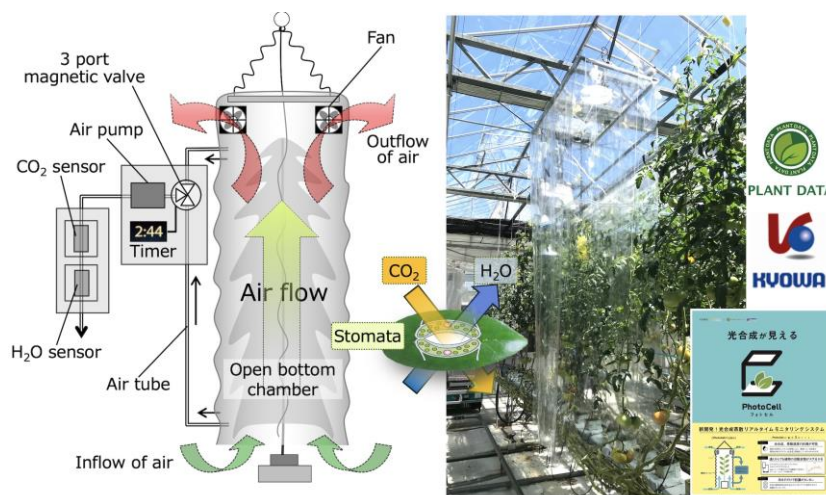


図 2 光合成蒸散リアルタイムモニタリングシステムの模式図(左)と写真(右)

図 3 は、PLANT DATA(株)が開発した光合成蒸散リアルタイムモニタリングシステム用ウェブアプリの UI 例である。約 5 分間隔で光合成速度・蒸散速度・総コンダクタンスの変化をモニタリングでき、全データを CSV 形式でダウンロードすることも可能である。環境データも同時に取得しているので、ウェブアプリ内で簡単な環境応答解析 (当該日の光-光合成曲線の作成など) も可能である。



図 3 光合成・蒸散・コンダクタンスのモニタリングが可能なウェブアプリの概略 (右下: 計測データを用いた光-光合成曲線)

(2) クロロフィル蛍光画像計測ロボットによる光合成機能診断

図 4 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、Ch1) 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 Ch1 蛍光画像を計測する。Ch1 蛍光は、Ch1 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 Ch1 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、Ch1 蛍光画像の撮像が可能となる¹⁰。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、Ch1 蛍光強度が経時的に変化する現象が確認されるが、この現象はインダクション現象とよばれ、大政謙次東大名誉教授により 1987 年に世界で初めて画像計測された¹¹。なお、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、カーブの形状指標を用いることで光合成機能診断が可能となる¹²。図 5 は、Ch1 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。

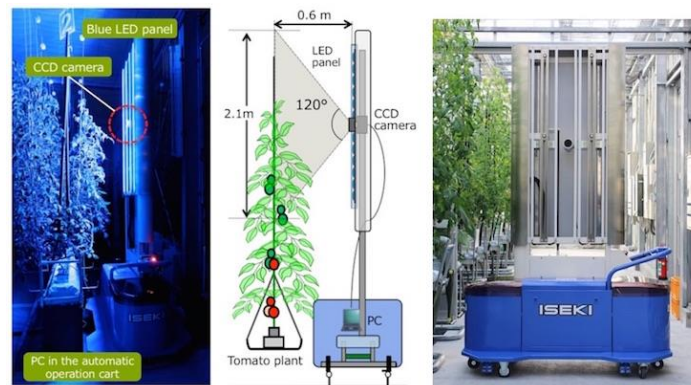


図 4 愛媛大学植物工場研究センターの研究成果として井関農機(株)より市販されたクロロフィル蛍光画像計測ロボット

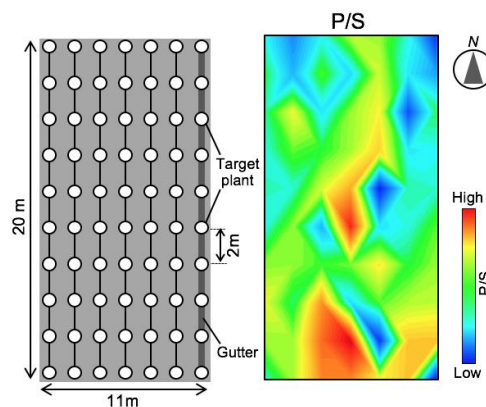


図 5 実験用太陽光植物工場内のトマト个体群の光合成機能マップ

さらに、筆者らの最近の研究開発においては、従来型の小・中規模のビニルハウスにも導入可能な安価かつ小型の「つり下げ型の多角的植物生体画像情報計測ロボット」を提案している^{13, 14} (図 6 左)。本ロボットは、Ch1 蛍光画像計測に加えてカラー画像・NDVI 画像の計測が可能であり、自動充電・自動計測機能、さらには、自動昇降機能により、植物体上部の葉・茎頂領域だけでなく、植物体下部の果実領域を対象とした画像計測を可能とした。

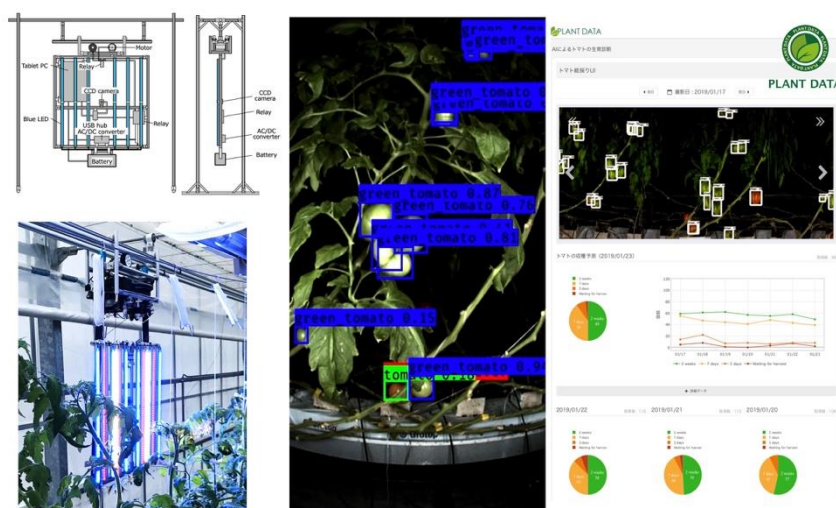


図 6 開発中のつり下げ型植物生体画像情報計測ロボット (左) とディープラーニング技術によるトマト果実の自動検知 (中央) と直近の収穫量予測 UI (右)

大学発ベンチャー企業による農業生産への円滑な実装

前出の愛媛大学発ベンチャーの PLANT DATA(株)では、先端的な植物環境工学 (愛媛大学植物工場研究センター) と先端エレクトロニクス (豊橋技術科学大学エレクトロニクス先端融合研究所) を融合することで、植物の植物生育状態の見極めを自動化するための植物生体情報活用プラットフォームを提案している。このような大学発ベンチャーを窓口として多様化する農業生産のステークホルダーに直接アプローチすることで、植物生体情報を基盤としたスマート農業技術の円滑な社会実装が促されるものと期待される。なお、大学発ベンチャー企業の創出促進は、内閣府の第 5 期科学技術基本計画 (平成 28~令和 2 年度)¹⁵ に謳われているだけでなく、次期科学技術基本計画の策定に向けた「統合イノベーション戦略 2019」¹⁶ においても、“大学等発ベンチャー設立数・研究開発法人発ベンチャー設立数を 2016 年度実績から倍増”と記述されており、今後、農学分野においても大学発ベンチャーが増大するものと考えられる。

まとめと展望

本稿では、アグリテック (AGRIculture+TECHnology) 分野の研究成果の植物工場への実装のプロセスを例に、農学の農業への貢献の可能性をご紹介した。具体的には、植物生体情報計測技術を活用して作物の生育状態をリアルタイムかつ高精度に把握することで、生産性 (光合成や生育バランスが適切であること) が維持されていることを確認しつつ、肥料・水・熱

の投入量（投入資源コスト）を最小化した生産技術の確立が可能となる。これは、企業的農業生産において重要視される利益の底上げと SDGs の達成に同時に貢献するものであり、植物生体情報計測技術の実装を加速化させるものと期待している。

この流れは、農学と農業の関係にパラダイム・シフトを生じさせる可能性を秘めている。実装型植物生体情報計測技術は、農学研究者と農業生産者の“植物の生育状態の認識の仕方”に共通のものさしを与えるものであり、これによって農業環境・情報工学分野においてシチズンサイエンス¹⁷が急速に進展するものと期待される。このことは、農学研究者にとっても大きなメリットを与えることになり、大学等の研究機関において取得される厳密な実験データに加えて、生産現場において様々な条件で取得される同一フォーマットの植物生体情報を用いることで、植物成育（環境応答）モデルの高度化や最終的には基礎科学の新しい知見を見いだすことも可能かもしれない。もちろん、生産者の当該学術分野のリテラシーの向上は同時にすすめられるべきであり、生産現場における植物生体情報活用のための社会人を対象としたリカレント教育（人材育成プログラム）の実施は不可欠である。まさに、「農学栄えて農業栄える」時代が見えてきた。

引用文献

- 1 農林水産省. 人口構造の変化等が農業政策に与える影響と課題について. 2018.
- 2 農林水産省. 加工・業務用野菜をめぐる状況. 2019.
- 3 農林水産省. 施設園芸をめぐる情勢. 2019.
- 4 日本学術会議. 提言 第 23 期学術の大型研究計画に関するマスタープラン(マスタープラン 2017). 2017.
- 5 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.
- 6 高山弘太郎:第 2 世代の SPA とその実装, 植物環境工学 25, 165-174, 2013.
- 7 van Straten G, van Willigenburg G, van Henten E, van Ooteghem R. Optimal control of greenhouse cultivation. CRC Press, Boca Raton. 1-305. 2010.
- 8 下元耕太, 高山弘太郎, 高橋憲子, 仁科弘重. 光合成蒸散リアルタイムモニタリングシステムのための低コスト CO₂・H₂O 濃度差計測法の開発. 2014 生態工学会年次大会発表論文集. 17-18. 2014.
- 9 Shimomoto K, Takayama K, Takahashi N, Nishina H. Development of low-cost photosynthesis and transpiration real-time monitoring system. In: Program and Abstract of International Conference on Plant Factory (ICPF) Kyoto 2014. Kyoto. 10-12 November, 15. 2014.
- 10 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.

- 11 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.
- 12 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.
- 13 加納多佳留, 戸田清太郎, 高橋憲子, 仁科弘重, 高山弘太郎. つり下げ型 Chl 蛍光画像計測システムの開発. 農業環境工学関連学会 2018 年合同大会 講演要旨集. GS22-5. 2018.
- 14 加納多佳留, 高山弘太郎, 海野博也, 戸田清太郎, 高橋憲子, 仁科弘重. つり下げ型植物生体画像情報計測ロボットの開発. 日本生物環境工学会 2019 年千葉大会 講演要旨集. 2019. In press.
- 15 内閣府. 第 5 期科学技術基本計画. 2016.
- 16 内閣府. 統合イノベーション戦略 2019. 2019.
- 17 林 和弘. オープンサイエンスをめぐる新しい潮流 (その 5) オープンな情報流通が促進するシチズンサイエンス (市民科学) の可能性. *科学技術動向.* 150, 21-25. 2015.