

学会賞受賞研究
ロボット化された生体情報計測による
SPA コンセプトの実装に関する国際的研究開発

高山 弘太郎*

Kotaro TAKAYAMA:

International Collaborative Research and Development on Practical Use of SPA Concept for
Agricultural Production in Greenhouse Using Plant Diagnosis Robot

Abstract

As a highly-sophisticated strategy for environmental control in greenhouses, the concept of speaking plant approach (SPA) has attracted a great deal of attention. The first and most important step in the SPA concept is to obtain physiological information from a living plant and then to judge whether the plant is healthy. Chlorophyll fluorescence (CF) imaging technique provides information on photosynthetic performance without destruction of or contact with the living plant. The CF is an emission of red light from chlorophyll a pigment that can be used to assess photosynthetic functions, thereby allowing for plant health monitoring. A robotized CF imaging system that evaluates daily changes in photosynthetic function of tomato canopy has been developed in our previous studies and came onto the market in 2015. To prove the usefulness of the CF imaging robot, a verification test was started in a tomato production commercial greenhouse in the Netherlands as a collaborative research involving Wageningen UR, Ehime University, and Japanese and Dutch companies in 2016. Such an international research and development got an award of “Academic prize of Japanese Society of Agricultural Biological and Environmental Engineers and Scientists” in September 2017. In this report, the outline of the award-winning our research and development would be introduced.

Key words: Environmental control, greenhouse, plant diagnosis, robot

1. 日本生物環境工学会学術賞受賞の経緯

平成 29 年 8 月 30 日 (水) ~ 9 月 3 日 (日) に愛媛大学農学部で開催された「日本生物環境工学会 2017 年松山大会」において、日本生物環境工学会学術賞 (第 14 号) を受賞した。受賞課題の研究開発は、愛媛大学社会連携推進機構植物工場研究センター (仁科弘重センター長) を中心とした活動である。当センターの教職員の皆様には、本研究開発の遂行について多大なるご支援とご指導を頂いており、心より感謝申し上げます。また、日頃より支援を頂いている諸先生方、本研究課

題の推進にご協力頂いている国内外の共同研究者・研究協力者、および、一緒に研究を進めている学生諸氏にも深く感謝申し上げます。

2. はじめに

2.1. 背景

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

2017 年 11 月 19 日受領

2017 年 11 月 19 日受理

*愛媛大学大学院農学研究科 緑化環境工学教育分野

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。つまり、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。このことが、太陽光植物工場における農作物生産に残された克服すべき弱点として顕在化しつつある。

2.2. 問題解決のためのスピーキング・プラント・アプローチ

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 (Udink ten Cate et al., 1978; Hashimoto, 1980; Hashimoto, 1989) 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 (van Straten et al., 2010; 橋本, 2013)。さらに、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として位置づけられている。平成21年度に創設された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研究開発を推進している。

3. 研究開発の概要

これまで、筆者らは、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きた。具体的には、①植物診断に有効な生体情報計測技術の開発、②植物生体情報に基づいた環境制御技術の開発、③太陽光植物工場

内の作物個体群の光合成機能解析がある。①については、小型植物体、個葉、個体および個体群を対象とした光合成機能診断が可能なクロロフィル (以降、Chl) 蛍光画像計測システムを開発した。また、2007年度のワグeningen大学 (オランダ) への留学を機に、植物が発する匂い成分 (揮発性有機化合物) モニタリングによる植物診断に関する研究に着手した。②については、デジタルカメラを用いて水ストレスを数値評価する技術を応用し、高糖度トマト生産のための自動給液システムを開発した。③については、個葉光合成特性評価プロトコルを考案し、トマト個体群の光合成機能の空間分布の解析とモデル化、パプリカの光合成機能解析を行った。

本稿では、受賞タイトルである「ロボット化された生体情報計測によるSPAコンセプトの実装に関する国際的研究開発」の概要について報告する。

4. 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

4.1. ロボットの概略

図2は、筆者らが開発した基礎技術を応用し、井関農機 (株) より市販されたChl蛍光画像計測ロボット (PD6C) である。本ロボットは、太陽光植物工場内の1レーンを夜間に自動走行し、トマト個体群の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 (高山・仁科, 2008; Takayama et al., 2013)。

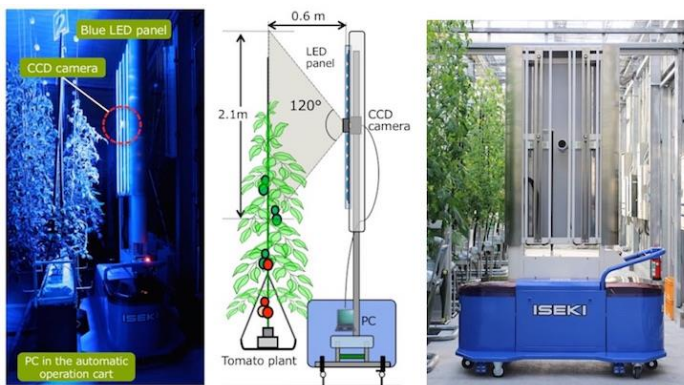


図2 愛媛大学植物工場研究センターの研究成果として井関農機 (株) より市販されたクロロフィル蛍光画像計測ロボット

2.2. 光合成機能の計測

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) 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 (Takayama et al., 2012) 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。

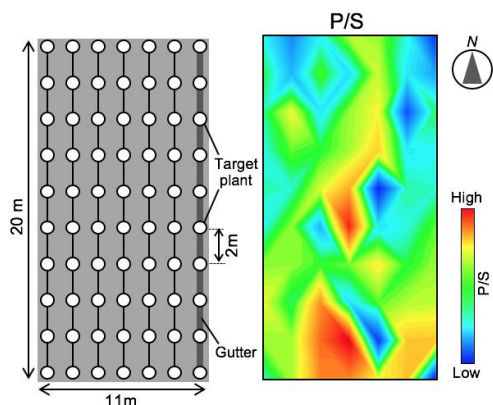


図 3 実験用太陽光植物工場内のトマト個体群の光合成機能マップ

4.3. 成長量の計測

Chl 蛍光画像計測ロボット (図 2) は、青色 LED を点灯した状態で 1 レーン全体を走行することによりトマト個体群をスキャンする形で連続的な Chl 蛍光画像を取得することができる。筆者らは、この Chl 蛍光画像のなかから植物個体を正面 (中央) に捉えた画像を抽出するアルゴリズムを開発 (図 4-左) し、1 回の計測で 30 個体以上を対象とした茎頂高 (背の高さ) の計測を可能にした (誤検出率 0%)。なお、このようにして得られる茎頂高値は正規分布しており、その平均値

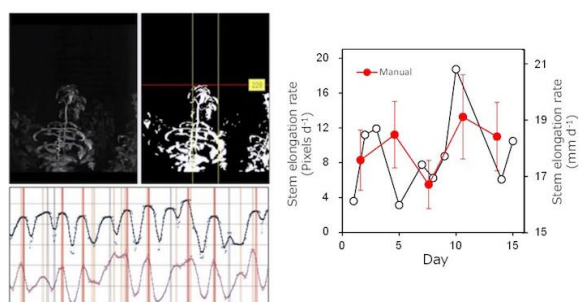


図 4 トマト個体群の Chl 蛍光スキャン画像の解析(左)と日単位の茎伸長計測の例(右)

は個体群全体の平均値とみなすことができる。つまり、前日と当日との茎頂高の差をこの間の茎伸長量と考えることができるため、1 日単位 (毎日) のわずかな成長の変化の把握が可能となる。図 4-右に、本アルゴリズムを用いて計測した 15 日間の茎伸長量の変化の様子 (○) を示す。●は 10 個体を対象として 3 日間隔での手計測により求めた茎伸長量の変化である。本システムを用いることで毎日の茎伸長量の変化を正確に捉えることができる可能性を示唆している。

5. SPA コンセプトの実装に向けた国内外での展開

このような技術的進展を背景に、日本学術会議においては、SPA コンセプトを前提とした国際競争力を有する農作物生産システムとして従来の 20~100 倍の栽培面積 (20~100 ha) を有するメガスケール植物工場構想 (図 5) を筆者が中心となって提案 (高山, 2014 ; 高山, 2017) し、その社会実装のために必要となる技術的要素や社会基盤整備について、日本学術会議農業情報システム学術分科会を中心に産学が密に連携した議論を始めた。また、国際的な産学官協働を通じて太陽光植物工場と人工光植物工場を網羅した研究開発を推進するために、筆者が幹事を務める日本学術会議 CIGR 分科会 (野口 伸 委員長) が中心となって、国際農業工学会 (CIGR) に新たなワーキンググループ (Plant factory and intelligent greenhouse WG; Chair: 福田和弘 [大阪府立大], Vice-chair: Esteban José Baeza Romero [Wageningen UR], Secretary: 筆者, 高橋憲子 [愛媛大学], 遠藤良輔 [大阪府立大]) を設置し、日本・オランダ・中国・韓国の研究者をステアリングメンバーとして活動を開始し、2017 年 9 月 2~3 日に国際ワークショップ (Innovative but feasible technologies for plant factory and intelligent greenhouse -Plant Factory Conference 2017-) を愛媛大学にて開催 (日本生物環境工学会 2017 松山大会と併催) した。

他方、2016 年度より国際共同研究加速基金 (国際共同研究強化) に基づいた日蘭国際共同研究を開始し、

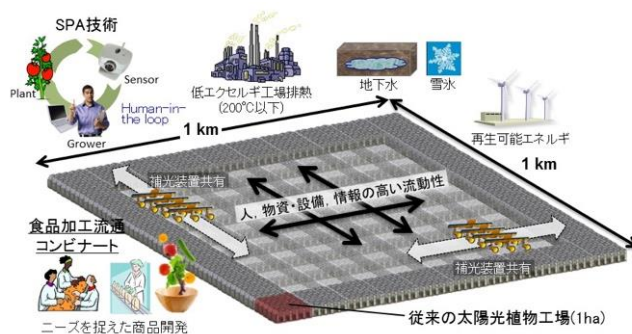


図 5 メガスケール太陽光植物工場の構想概念図

オランダの商業的トマト生産太陽光植物工場に Chl 蛍光画像計測ロボットを導入して、毎日の高精度植物生体情報 (Daily plant data) の取得に着手しており、愛媛大学・Wageningen UR および日蘭の複数の企業が参画する国際的産学連携プロジェクトを実施している (高山, 2017a; 高山, 2017b; 高山, 2017c)。

6. おわりに

本受賞は、2010 年に第 1 号として受賞した日本生物環境工学会国際学術賞「植物性体情報計測技術及び生体情報に基づく栽培環境制御技術の開発」の国際展開として位置づけられる。当時、筆者は「植物診断装置としてのコスト面の検討はこれから詳細に行う必要がありますが、(中略) 数年以内に栽培現場 (栽培面積が数 ha の太陽光植物工場が対象) に導入可能な Chl 蛍光画像計測による植物診断装置の開発が可能であると考えています。」と述べたが、その後の展開はまさにこの通りであった。今後も、愛媛大学植物工場研究センターにおける私共の研究開発成果の有用性を国内外に広く御理解頂き、国際的な社会実装が促進されるための研究開発を推進して行く所存である。

引用文献

- Hashimoto, Y. (1980) Computer control of short term plant growth by monitoring leaf temperature. *Acta Horticulturae* 106: 139-146.
- Hashimoto, Y. (1989) Recent strategies of optimal growth regulation by the speaking plant concept. *Acta Horticulturae* 260: 115-121.
- 橋本 康 (2013) : 太陽光植物工場における俯瞰的科学技術の流れ-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.
- Omasa, K., Shimazaki, K., Aiga, I., Larcher, W., and Onoe, M. (1987) Image analysis of chlorophyll fluorescence transients for diagnosing the photosynthetic system of attached leaves. *Plant Physiology* 84: 748-752.
- 高山弘太郎・仁科弘重 (2008) : 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.
- Takayama, K., Miguchi, Y., Manabe, Y., Takahashi, N., and Nishina, H. (2012) Analysis of Φ PSII and NPQ during the slow phase of the chlorophyll fluorescence induction phenomenon in tomato leaves. *Environmental Control in Biology* 50: 181-187.
- Takayama, K., King, D., Robinson, S.A., and Osmond, B. (2013) Integrating transient heterogeneity of non-photochemical quenching in shade-grown heterobaric leaves of Avocado (*Persea americana* L.): Responses to CO₂ concentration, stomatal occlusion, dehydration and relative humidity. *Plant Cell Physiology* 54: 1852-1866.
- 高山弘太郎 (2014) : 統合情報を駆使したメガスケール植物工場による国際競争力のある農産物生産. 科学者委員会 学術の大型研究計画検討分科会: 提言第 22 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 2014). 日本学術会議, 東京, 198-199.
- 高山弘太郎 (2017) : 統合情報を駆使したスマート・メガスケール植物工場ネットワークによる国際競争力のある農作物生産. 科学者委員会 学術の大型研究計画検討分科会: 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). 日本学術会議, 東京, 215-216.
- 高山弘太郎 (2017a) : 2016-2017 日蘭国際共同研究を通じて見えるもの [1] オランダの現状と日蘭国際共同研究の概略. *農業および園芸* 92:232-242.
- 高山弘太郎 (2017b) : 2016-2017 日蘭国際共同研究を通じて見えるもの [2] 収穫量増大に貢献する環境制御技術: オランダと日本で異なるアプローチ. *農業および園芸* 92:458-464.
- 高山弘太郎 (2017c) : 2016-2017 日蘭国際共同研究を通じて見えるもの [3] オランダ型の労務管理: 栽培管理作業・オートメーション・日本との違い. *農業および園芸* 92:505-512.
- Udink ten Cate, A.J., Bot, G.P.A., and van Dixhoorn, J.J. (1978) Computer control of greenhouse climates. *Acta Horticulturae* 87: 265-272.
- van Straten, G., van Willigenburg, G., van Henten, E., and van Ooteghem, R. (2010) Optimal control of greenhouse cultivation. CRC Press, Boca Raton, FL. 1-305.