

クロロフィル蛍光画像計測ロボットによる高精度植物生体情報計測 ー太陽光植物工場の知能化にむけてー

高山弘太郎^{†1}

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る。SPA(Speaking Plant Approach)技術は、植物生体情報を計測し、それに基づいて栽培環境を最適に制御する一連の技術であり、太陽光植物工場の生産性最大化の切り札として世界的にも注目されている。本稿では、筆者らが開発を進めてきたクロロフィル蛍光画像計測システムによる光合成機能診断技術の太陽光植物工場への実装モデルについて紹介するとともに、高時間分解かつ高空間分解の植物生体情報に基づいた環境調節の知能化の可能性についても触れる。

Accurate Measurement of Plant Biological Information with a Chlorophyll Fluorescence Imaging Robot -For Establishment of an Intelligent Greenhouse-

KOTARO TAKAYAMA^{†1}

The Speaking Plant Approach (SPA) is regarded as a desirable concept for environmental control in highly sophisticated greenhouses. Sensor-based plant diagnosis techniques to monitor plant physiological status are important for the SPA. Chlorophyll fluorescence imaging technique is useful to evaluate the photosynthetic functions of plant without touching. In this report, the outline of the chlorophyll fluorescence imaging robot developed in the research center for high-technology greenhouse plant production of Ehime University is introduced. In addition, the possibility of an intelligent greenhouse based on the daily measurement of plant data would be mentioned.

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（栽培面積が1 haを超える）な農作物生産を行う施設であり、気温・湿度・CO₂・光強度などの様々な環境要因を制御するための設備を有している。オランダを中心とするヨーロッパの高緯度地域において発展した生産技術ではあるが、わが国においても競争力のある農作物生産システムとして注目されており、大企業の資本が投入されて建設が進められている（図1）[1]。



図1 わが国の太陽光植物工場におけるトマトの周年栽培

また、競争力強化を主目的として、さらなる大規模化が進行しており、太陽光植物工場先進国のオランダでは、栽培

面積が50 ha超の生産者数が増加している。さらに、わが国においても、栽培面積100 ha (1,000,000 m²)超のメガスケール植物工場構想（図2）が検討されている[2]。

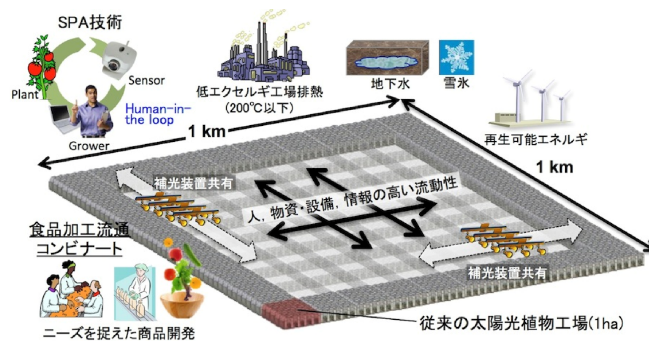


図2 メガスケール植物工場構想の概念図

太陽光植物工場は、コンピュータ化・情報化・自動化の先端技術を基盤とした統合情報食料生産システムとして確立されつつあるが、その環境調節は、コンピュータをベースにした自動制御システムが担ってこそのものである。各環境因子の制御目標値の設定は、依然として人間（栽培管理者）の目視による植物体の観察に基づいて行われており、自動制御システムの能力を十分に発揮できているとは言い難い。SPA (Speaking Plant Approach) 技術は、各種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最適に制御する一連の技術であり、太陽光植物工場の生産性最大化の切り札として世

界的にも注目されている[3][4].

本稿では、太陽光植物工場に実装可能なクロロフィル (Chl) 蛍光画像計測ロボットによる人間では把握不可能なレベルのわずかな植物の環境応答を検知する高精度植物生体情報計測技術について紹介し、高時間分解かつ高空間分解の次世代環境制御技術開発の可能性に触れる。

2. Chl 蛍光画像計測ロボットの概要

(1) Chl 蛍光発光と画像計測の基本原則

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 (図 3). 青色 LED 等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って励起された Chl 蛍光を発する. CCD カメラの前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 [5][6].

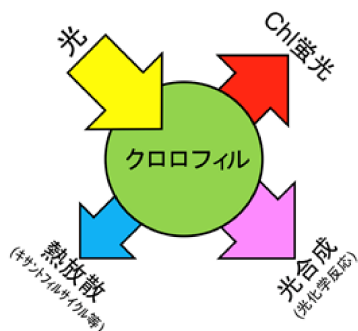


図 3 吸収した光エネルギーと Chl 蛍光発光の関係

(2) インダクション法による光合成機能診断

暗条件におかれた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る[7]。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 (図 4)、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, M/S, P/ave(S:M)等)を用いることで光合成機能診断が可能となる[1][A.1].

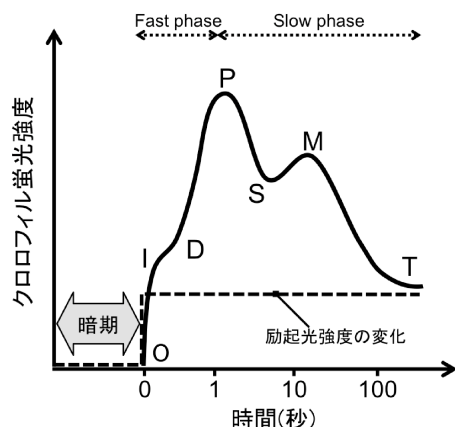


図 4 インダクションカーブの形状と特徴点の名称

(3) 実装型 Chl 蛍光画像計測ロボット

図 5 は、トマト群落を対象とした光合成機能診断を行うために作製した実装型 Chl 蛍光画像計測ロボットである[1]. 1.5 m [H]×0.6 m [W]の青色 LED パネル ($\lambda < 500$ nm) から照射される光の強度は、パネル面から 0.6 m の距離にある植物体に明確な特徴点を持つインダクション現象を起こさせるように最適化されている。ロングパスフィルタを内蔵した広角レンズを装着したカメラには防水加工が施されており、カメラから 0.6 m の距離にある 2.1 m [H] × 1.2 m [W]の範囲の撮影が可能である。電動カートは、4 個のタイマー (①~④) により動作が制御され、各タイマーは、①自動計測開始までの待ち時間 (計測開始時刻設定)、②直進走行時間 (走行速度は 10 m min⁻¹)、③一時停止後 LED 点灯までの待ち時間、④LED 点灯時間 (インダクション現象の画像計測時間) を決めている。また、カート前後端の接触センサによりレーン端を検知して前進後進の切替えを行う。

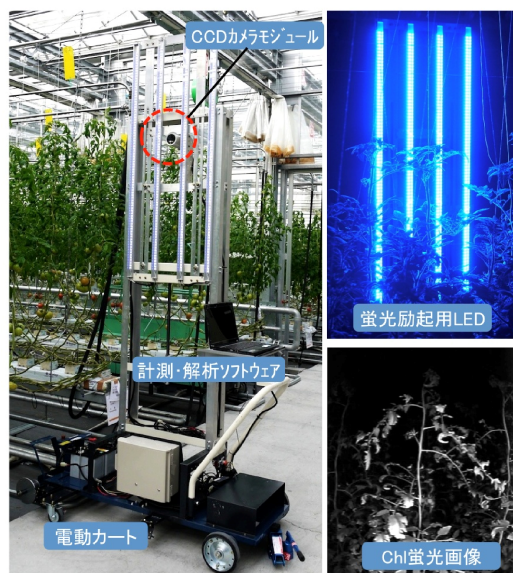


図 5 実装型 Chl 蛍光画像計測ロボット Ver. 2013

(左: 全体写真, 右上: 発光中の LED, 右下: Chl 蛍光画像)

(4) 想定される時間分解能と空間分解能

Chl 蛍光画像計測は、暗条件となる夜間に行うため、得られる生体情報の時間分解能は 1 日となる。この時間分解能は、比較的静的な植物応答や生育状態変化のモニタリングには十分な時間分解能であると考えている。また、実装型 Chl 蛍光画像計測ロボット (図 5) はレーン間を移動する機能を持たないため、「導入台数=計測対象栽培レーン数」となり、これが栽培レーンに直交する方向の空間分解能を決めることになる。主に環境要因や栽培管理に起因する生育ムラを把握する目的であれば、10 m×10 m 程度の空間分解能で十分である。この場合、栽培面積が 1 ha (100 m×100 m)の一般的なトマト生産植物工場を想定すると 10 台の Chl 蛍光画像計測ロボットを導入することになる (図 6)。

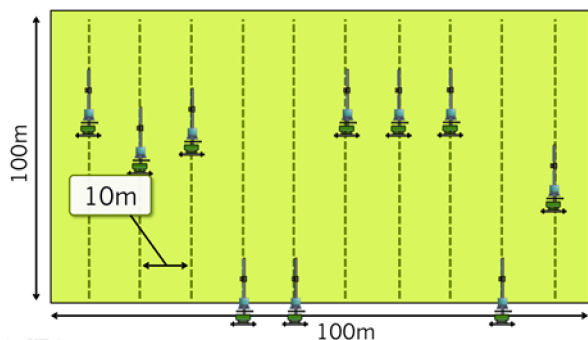


図 6 Chl 蛍光画像計測ロボットの導入シナリオ
(最多で 1ha あたり 10 台程度)

3. 太陽光植物工場のトマト群落を対象とした光合成機能評価

(1) 大規模太陽光植物工場における光合成活性分布

図 7 は、商業的トマト生産太陽光植物工場（約 1.3 ha）における光合成活性（P/S：光合成電子伝達系の初期段階の電子伝達活性の高さを示す指標）[6]の分布図である。このときの計測データの空間分解能は 10 m (N-S)×20 m (E-W) (均等間隔に 70 箇所)であった。西側中央部に光合成活性の高い領域（赤線楕円）、中央部に光合成活性の低い領域（青線楕円）が認められる。このような光合成活性の不均一分布は、人間の目では認識することができない生体情報である。なお、本計測は冬季に行ったものであるため、この不均一分布の主たる要因は、夜間気温の分布であると考えられたが、これ以外の栽培管理や養液供給などの不均一性の影響についても検討する必要がある。

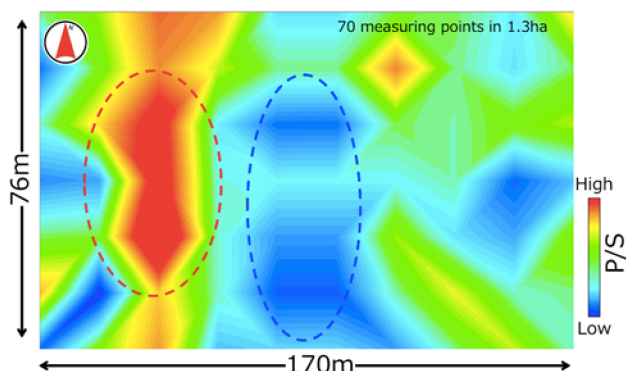


図 7 トマト生産太陽光植物工場における光合成活性分布

(2) トマト群落の光合成活性の経日変化

図 8 は、愛媛大学植物工場研究センターで栽培されているトマト個体群 ($n > 30$) の 15 日間（2014 年 2 月に計測実施）の光合成活性（P/S）(○)と前日の日積算日射量（●）の変化を表している。Chl 蛍光画像計測は夜明け直前に行っているため、前日の日射の影響（光ストレス等）は十分に解消されていると考えられる。Day 0 から Day 8 にかけては、P/S と日積算日射量が同様の変化を示したが、Day 9 以

降は両者に明確な対応関係が認められなくなった。このような日単位での光合成活性の変化をモニタリングすることにより、人間の目では不可能なレベルの作物の健康状態のわずかな変化を検知可能になると考えられる。さらに、このような高時間分解の群落光合成機能指標と日射・気温・CO₂ 濃度などの環境要因との関係を解析することで、環境調節の最適化に向けた知見が得られるものと期待される。

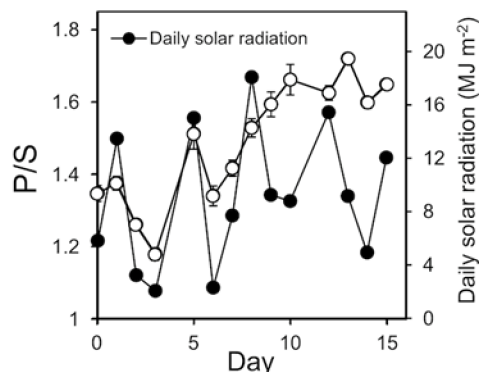


図 8 トマト群落の光合成活性と日積算日射量の経日変化

4. まとめと展望

(1) 高空間分解の生体情報の活用

太陽光植物工場における作物の生育状態の把握は、栽培管理者の目視での観察により行われるのが一般的である。しかし、広大な栽培面積を有する太陽光植物工場において、生育状態の不均一性を目視による観察のみで把握するのは困難である。実装型 Chl 蛍光画像計測ロボットを適切な密度（最大 10 台 ha⁻¹ 程度）で導入することにより、十分な空間分解能の生育状態把握が可能となる。たとえば、生育の鈍化や光合成活性の低下が検知された領域と夜間気温が低い領域（環境情報計測用の各種センサの搭載も可能）とが合致した場合、この領域の夜間気温を上げるための設備投資を検討することになる。このように、太陽光植物工場を生産システムとして完全に把握し、生産性の最大化を図るためには、生育状態の空間分布把握が必要不可欠となる。

(2) 高時間分解の生体情報の活用

太陽光植物工場の環境調節に用いることを目的とした生体情報計測の例としては、1 週間間隔での生育指標（茎伸長速度、茎径、葉面積など）のマニュアル計測が挙げられる。ノギスやテープメジャーといった安価な器具で計測を行えるのがメリットだが、1 週間という計測間隔の長さが「現在の生育状態を表す指標」としての有用性を低下させているため、実際の環境調節戦略策定に活用される例が少ない。

実装型 Chl 蛍光画像計測ロボット（図 5）により、これらの生育指標や光合成活性の毎日のわずかな変化を把握できるようになれば、これまでに無い「日単位の生体情報に基づいた環境調節」が可能になる。たとえば、茎伸長量を適切な大きさにコントロールするために、前日の茎伸長量

に応じて翌日の夜間気温設定を変更するといった太陽光植物工場のハードウェアをフル活用した環境調節も想定される。もちろん、この設定変更に対する作物の応答についても翌日には数値評価することができる。さらに、このプロセスの全てをデータベースに記録することで、生体情報に基づいた環境調節の知能化が早々に達成されると期待される。

(3) 知能的環境調節の実装に向けて

上述した高時間分解の生育指標計測技術が確立されれば、これから 1~2 年の短期間で知能的環境調節技術の基礎が完成するものと考えられる。もちろん、利用者（生産者）の新技術の受入れ体制の整備も課題となるが、乗用車の運転支援システムの例をみると、①何を、②どの程度の精度で計測し、③（とりあえず）どのような対策を講じればよいのかが明白な場合については、受け入れが容易な技術であると言える。

生体情報計測技術は生産性最大化に必須の技術ではあるが、導入しさえすれば必ず増益をもたらすというものではない。ハード面（調節可能な環境要因、環境調節の時間・空間分解能等）との適合性は言うまでもないが、栽培管理スキルの熟達度によっても導入に適した生体情報計測技術が大きく異なる。たとえば、トマトの生産性を長期にわたって高く維持するためには、茎・葉・果実の良好なバランス（光合成産物の適正分配）の維持が必須であり、これが環境調節の効果を最大化させるための必要条件となることを忘れてはならない。

参考文献

- 1) 高山弘太郎: 第 2 世代の SPA とその実装, 植物環境工学, Vol.25, pp.165-174 (2013).
- 2) 日本学術会議 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 (2014).
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-t188-1.pdf>
- 3) 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, Vol.25, pp.57-64 (2013).
- 4) van Straten G. et al.: Optimal control of greenhouse cultivation, CRC Press, Boca Raton (2010).
- 5) 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, Vol.20, No.3, pp.143-151 (2008).
- 6) Takayama, K. et al.: 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, Vol.54, No.11, pp.1852-1866 (2013).
- 7) Omasa, K. et al.: Image analysis of chlorophyll fluorescence transients for diagnosing the photosynthetic system of attached leaves, Plant Physiology, Vol.84, pp.748-752 (1987).
- 8) Takayama, K. et al.: Analysis of Φ_{PSII} and NPQ during the slow phase of the chlorophyll fluorescence induction phenomenon in tomato leaves, Environment Control in Biology, Vol.50, No.2, 181-187 (2012).

付録

付録 A.1 光合成反応（光化学反応と電子伝達反応）とインダクションカーブの関係

