

# 太陽光利用型植物工場による企業的農産物生産を支えるスピーキング・プラント・アプローチ技術

愛媛大学農学部講師

高山弘太郎



## 1. はじめに

高齢化と新規就農者不足による農業就業人口の漸減等により、わが国の農産物生産力の低下は底が見えない。さらに、TPP等にもみるワールドワイドな農産物流通を念頭に置いた場合、ごく一部のブランド化に成功した生産者を除き、わが国の農産物生産の国際競争力の欠如は明白である。この問題を解決し、わが国が21世紀後半においても豊かな国であり続けるために、長期的展望に立脚した国際競争力のある農産物生産システムの涵養が急務である。

太陽光利用型植物工場は、太陽光エネルギーを最大限に活用して大規模な農産物生産を行う施設であり、気温・湿度・CO<sub>2</sub>濃度・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。この太陽光利用型植物工場は、冬季の暖房が主目的であるハウス・温室の単なる発展型ではなく、人工光型植物工場で得られた最適栽培環境に関する知見をも最大限に活用して、環境条件が時々刻々と変化する太陽光下においても、人工光型と同様の4定（定時・定量・定質・定価格）さらには3適（適時・適量・適品質）の農産物生産を目指すものである（図-1）。このような生産を実現するためには、環境情報だけでなく、植物生体情報をも高度に利用したスピーキング・プラント・アプローチ（Speaking Plant

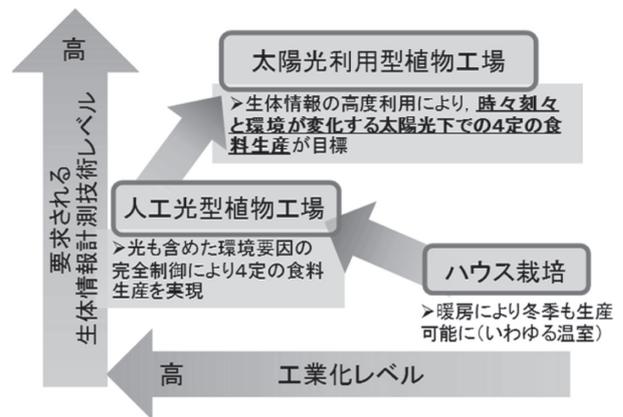


図-1 太陽光利用型植物工場の位置づけと生体情報計測の必要性

Approach: 以降, SPA) 型環境制御が必須である<sup>1,2)</sup>。SPA コンセプトは、様々なセンサを用いて植物の生体情報を計測して生育状態を診断し、それに基づいて生育環境を適切に制御するというものである<sup>3,4)</sup>。本稿では、愛媛大学植物工場研究センターにおける筆者らの取組の一部を紹介したい。さらに、国際競争力のある農産物生産システムとして、統合情報を駆使したメガスケール植物工場構想についてもご紹介する。

## 2. 植物診断に利用可能な画像計測技術

画像計測技術は、非破壊かつ非接触にて対象物の情報

### 引用文献

- 1) 仁科弘重, 田中道男, 石川勝美, 松岡孝尚. 知能的太陽光植物工場の新展開 [3] 植物工場研究開発拠点の先行例と技術形成・人材育成. 農業および園芸 85 (3) : 388-396. 2010.
- 2) 高山弘太郎, 野並 浩. 知能的太陽光植物工場の新展開 [5] 生理生態の計測と新展開. 農業および園芸 85 (5) : 563-571. 2010.
- 3) Udink ten Cate, A.J., Bot, G.P.A., van Dixhoorn J.J. Computer control of greenhouse climates. ActaHorticulturae 87: 265-272. 1978.
- 4) Hashimoto Y. Recent strategies of optimal growth regulation by the speaking plant concept. ActaHorticulturae 260. 115-121. 1989.

を得ることができるため、太陽光利用型植物工場における植物生体情報計測技術としてきわめて有効である。画像計測の最大の特徴は、ある1点の平均値のみを取得するスポット計測とは対照的に、広い領域の同時計測が可能であるという点である。なお、画像を構成している1画素単位での詳細な解析も可能であり、対象物との距離やレンズ系を変えることで、細胞から群落までのあらゆるレベルでの生体情報計測が可能である。ここでは、太陽光利用型植物工場において利用が期待されるデジタルカラー画像計測技術とクロロフィル蛍光画像計測技術を紹介する。

1) デジタルカラー画像計測：市販のデジタルカメラ（数千円～）を用いることで、安価であっても100万画素以上の十分な空間分解能を持つ画像計測システムの構築が可能である。図-2は、直上部から撮影したトマト個体のデジタルカラー画像を用いて“しおれ（水ストレス）”を数値評価する技術である<sup>5,6)</sup>。この技術を利用したSPA環境制御の例が、「高糖度トマト生産のための水ストレス付与機能付き自動給液システム」<sup>7)</sup>である（図-3）。撮影したデジタルカラー画像からの植物体領域の抽出、投影面積および投影面積比の算出、給液タイミングの判定、給液制御のすべてが自動化されている。

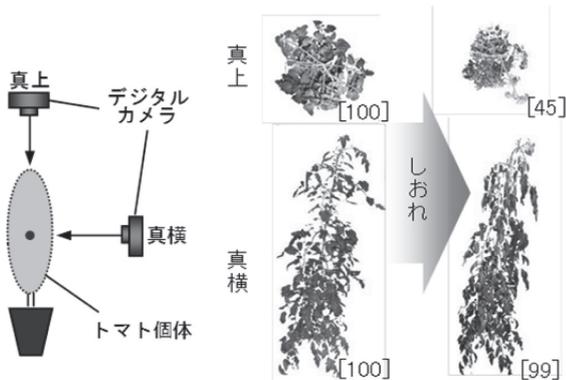


図-2 しおれによるトマト個体の投影面積変化  
[数値] は、しおれ前の投影面積を100としたときの相対値

投影面積比の算出には、給液と連動した独自のアルゴリズムを採用し、“投影面積比＝直前の給液以降の投影面積の最大値を100%としたときの相対値”と定義した<sup>7)</sup>。このアルゴリズムにより、葉かき（老化した葉の除去）などの人為的な栽培管理作業によって投影面積比が一時的に低下しても、一度の給液によりその影響を速やかに除去することができる。

2) クロロフィル蛍光画像計測：クロロフィル（以降、Chl）から発せられる蛍光を画像計測することで、光合成機能を数値評価する技術である<sup>8)</sup>。本技術は、特に精力的に研究開発を進めている技術であるため、詳しく紹介する。

### (1) クロロフィル蛍光発光とその画像計測

Chlが吸収した光エネルギーのすべてが光合成に利用されるわけではなく、光合成に使われずに余ったエネルギーの一部は赤色光として捨てられている（図-4）。この赤色光がChl蛍光である。そのため、Chl蛍光を正確に計測することで、植物体に触れることなく光合成機能に関する生体情報を取得することができる。Chl蛍光の画像計測に必要な光学系は極めてシンプルである（図-5）。青色LED等を用いて植物葉に青色光を照射（励起光）すると、植物葉は励起光の反射光と光照射により

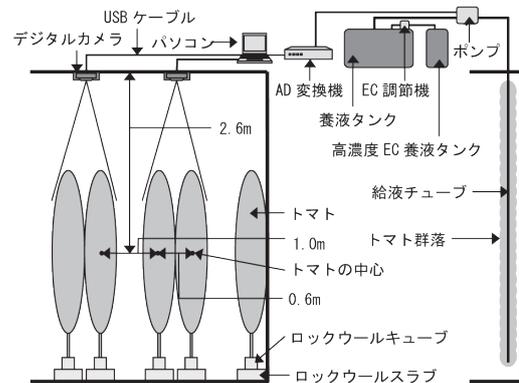


図-3 高糖度トマト生産のための水ストレス付与機能付き自動給液システムの模式図

### 引用文献

- 5) Takayama K, Nishina H. Early detection of water stress in tomato plants based on projected plant area. *Environment Control in Biology* 45 (4) : 241-249. 2007.
- 6) 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 (2) : 59-64. 2009.
- 7) 仁科弘重, 高山弘太郎, 羽藤堅治. 給液制御装置. 特開2007-306846. 2007.
- 8) 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 (3) : 143-151. 2008.



図-4 クロロフィル蛍光発光の概念図

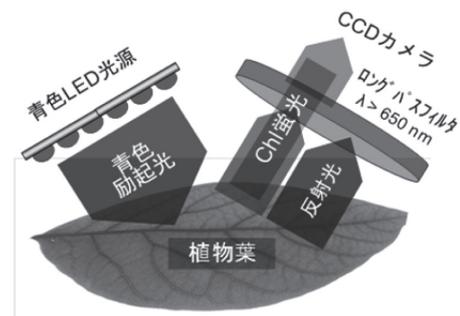


図-5 蛍光画像計測の光学系

励起された Chl 蛍光を発する。CCD カメラの前部に青色フィルタ（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<sup>8,9)</sup>。

### (2) トマト群落の健康状態モニタリングのためのクロロフィル蛍光画像計測システム

図-6は、植物工場内で栽培されている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 Chl 蛍光画像計測システムの模式図（A および B）と植物工場内での計測の様子（C：右下は成長点付近の蛍光画像）である。本システムは、励起光照射用の60cm×60cmの大型 LED パネル光源（ $\lambda < 650\text{nm}$ ）とロングパスフィルタ（ $\lambda > 700\text{nm}$ ）を装着した CCD カメラからなるクロロフィル蛍光画像計測部、トマト群落の高さに合わせて画像計測部を昇降させる駆動部、計測した蛍光画像

を解析して植物診断を行う解析・診断部（PC）、および、これらを搭載して植物工場内の通路を移動するための走行部（カート）で構成されている。

### (3) クロロフィル蛍光画像計測による光合成機能診断の事例

#### ① 夜間気温の違いが光合成機能に及ぼす影響の検知

図-7は、2009年1月に計測された太陽光利用型植物工場（愛媛大学農学部、トマト1000株、栽培面積20m×20m）内のトマト群落の光合成機能指標マップである。この計測以前の約1ヶ月間、植物工場西側では夜間暖房を行っておらず、この間の夜間平均気温は8～10℃（東側より2～4℃低い）であった。図-7の光合成機能指標の偏在（東側が高く、西側が低い）は、夜間気温の違いにより生じた光合成機能の差異を検知し

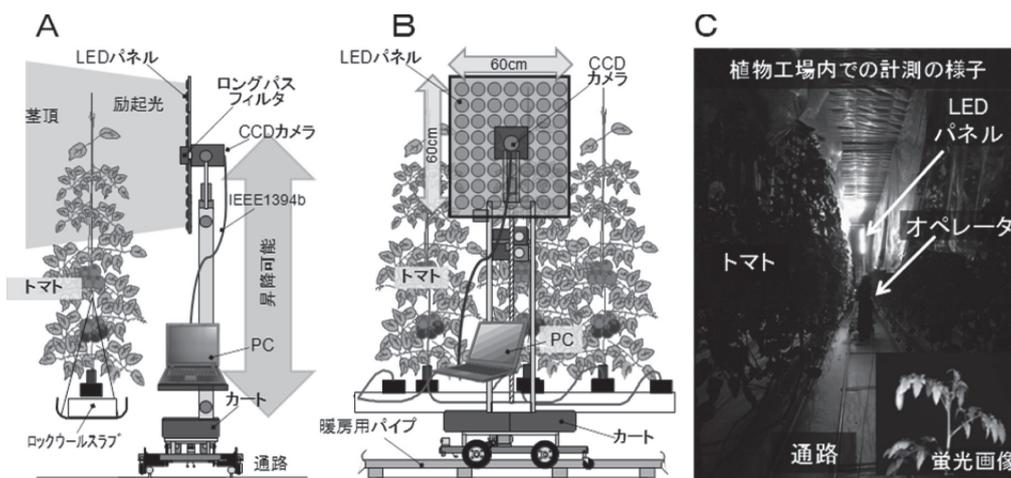


図-6 トマト群落を対象とした Chl 蛍光画像計測システムの模式図（A：側面，B：正面）と植物工場内での画像計測の様子（C：右下は成長点付近の蛍光画像）

#### 引用文献

9) 高山弘太郎．光合成活性評価プログラムおよび光合成活性評価装置．特願2009-101126. 2009.

たものと考えられる。

### ② トマトサビダニ害の早期検知

トマトサビダニは、施設栽培では一年中発生する害虫である。一部の株で発生した後、急速に拡大するが、農薬に対する感受性が高いため、発生初期にスポット的に少量の農薬を散布することで比較的容易に防除できる。図-8は、2009年8月に太陽光利用型植物工場が発生したトマトサビダニ害を発生初期の段階で検知した例である。このような病虫害の早期検知が可能になれば、早期の対策が可能となり、被害を最小限に抑えられるだけでなく、農薬使用量の低減にも寄与する。

### 3. 愛媛県における国際競争力のある農産物生産のためのメガスケール植物工場構想

前述した通り、太陽光利用型植物工場は栽培面積が1ha以上の大規模な農産物生産システムであり、欧米諸国では既に商業的成功を収めている。わが国においても、平成21年度の補正予算により整備された研究拠点（愛媛大学、千葉大学、大阪府立大学など）により基礎的生産技術が確立されつつある。しかしながら、1ha程度の生産規模では、従来の個人経営レベルの延長線上に過ぎず、わが国の農業生産の国際競争力のベースアップへの寄与は小さい。ここでは、国際競争力のある農産物生産を可能にする栽培面積が1,000,000㎡（100ha）以上のメガスケール植物工場構想についてご紹介するとともに、実証モデル地域としての西条市の優位性について触れたい。

図-9に統合情報を駆使したメガスケール植物工場の概略を示す。栽培面積は約1km<sup>2</sup>（従来型太陽光利用型

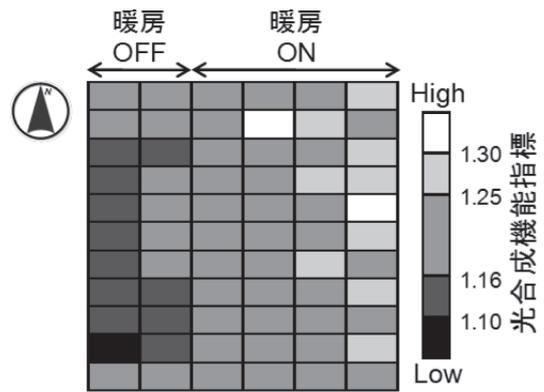


図-7 植物工場内の光合成機能マップ

植物工場の約100倍)で、耐風柵等の設置により本体構造を簡素化し、建設コストを大幅に削減する。これには、気流工学と構造力学さらには防災学（シェルター機能付作業台車の開発等）の融合が必要となる。メガスケール植物工場の内部は1～2haの小室に区分されており、小室毎に環境調節（光・温度・CO<sub>2</sub>等）が行われ、様々な品目を多様な作型で周年生産する。労働力（人材）、物資（養分・水・熱・ガス成分等）、設備は小室間で共有され、植物工場のベネフィット（コミュニティ毎に異なる）を最大化するように統合情報システムにより一定時間（数分～数週間）間隔で再配置される。

メガスケール植物工場のベネフィットを最大化するには、生産統合情報（図-9-A）、栽培流通統合情報（図-9-B）、エネルギー資源統合情報（図-9-C）を駆使する必要がある。生産統合情報については、Speaking Plant Approach (SPA) (A-①)とTalking Plant Concept (TPC: 植物-植物および植物-昆虫間の揮発性有機化合物を用いたコミュニケーション) (A-

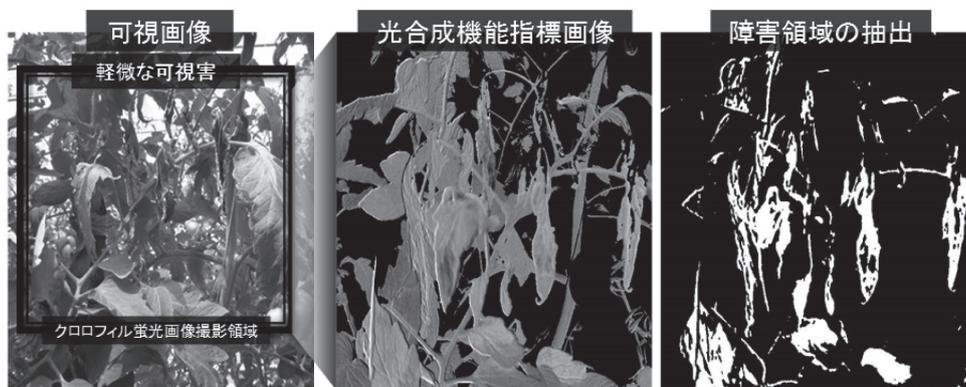


図-8 トマト群落を対象とした個葉レベルでのトマトサビダニ害の検知

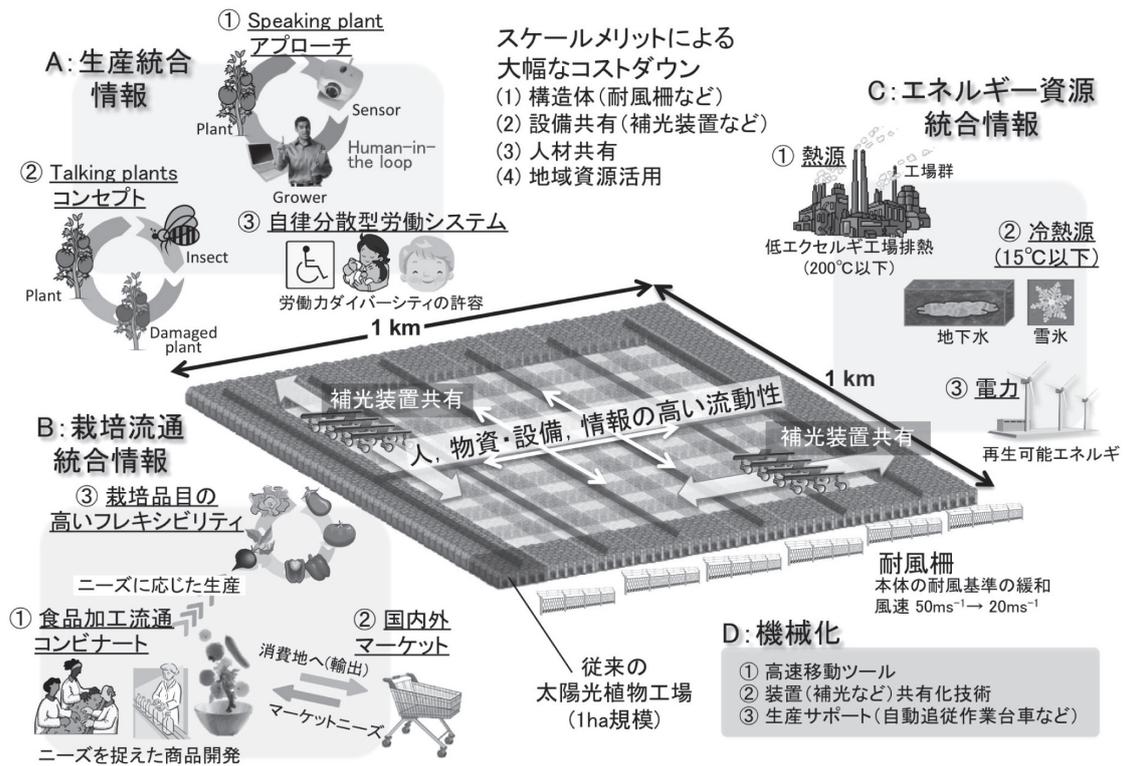


図-9 メガスケール植物工場と統合情報システムによるわが国独自の国際競争力のある農産物生産

②) の融合と自律分散型労働システム (A-③) の開発に新規性がある。生産性最大化のためには SPA 技術の実装は不可欠であり、最適環境制御の知能化を加速するために、制御ループに人間の判断を介在させる Human-in-the-Loop (HitL) 型 SPA を確立する必要がある (A-①)。TPC は、生態学分野における最新の知見である (A-②)。労働者数は1500～5000人規模に達するが、今後10年間に大都市圏で急増する定年退職者 (1ターナーのアグリスローライフ)、地域の子育て女性や児童・生徒などの人材活用が有効である。この場合、多様な労働動機と働き方 (労働力ダイバーシティ) を許容する自律分散型労働システムが不可欠となる (A-③)。教育やク

オリティ・オブ・ライフ (QOL) の充実を通じた植物工場のコミュニティへの貢献については社会科学的な検討も必要となる。栽培流通統合情報については、従来コンセプト (B-①, ②) に、生産品目・作型を市場ニーズに応じて柔軟に変更するシステム (B-③) を融合させる点が革新的である。大きなエネルギー要求を満足するために、地域エネルギー資源の有効活用 (C-①～③) は必須であるが、エネルギー資源統合情報では、風力発電 (C-③) を併用した地域熱源利用 (C-①, ②) を推進する。なお、メガスケール植物工場の生産規模は地域エネルギー資源の開発・利用コストに見合うものである。また、スケールメリットを最大化するための機械化技術

引用文献

10) Jansen RMC, Takayama K, Wildt J, Hofstee JW, Bouwmeester HJ, van Henten EJ. Monitoring crop health status at greenhouse scale on the basis of volatiles emitted from the plants. *Environment Control in Biology*. 47 (2) : 87-100. 2009.

11) Takakura T, Kozai T, Tachibana K, Jordan KA. Direct digital control of plant growth-I. Design and operation of the system. *Transactions of the ASAE*. 17: 1150-1154. 1974.

12) 高山弘太郎, 佐藤卓, 仁科弘重, 原田聡. 大規模太陽光利用型植物工場におけるトマト群落の光合成機能解析—全国5カ所の植物工場における同時計測—. *日本生物環境工学会2009年福岡大会講演要旨*. 100-101. 2009.

13) 地域活性化総合特区の指定申請書 (概要版)  
<http://www.city.saijo.ehime.jp/khome/nokakutoshi/oshirase/nokakusogotokugaiyo.pdf>

(D) も整備する。

このようなメガスケール植物工場の実証地域として、愛媛県西条市は優位性がある。まず、立地としては、海に面した農業利用可能な広大で平坦な土地（道前平野、西条平野）があり、大量に生産される農産物の出荷（輸出）にも有利である。なお、瀬戸内海沿岸は津波被害を受けにくいのも特長としてあげられる。また、南面を石鎚山脈に守られており、台風による強風の被害を受けにくい（耐風性能低減による低コスト化が可能）。環境条件としては、日照条件は年平均全天日射量が約 $13 \text{ MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$ と農産物生産にとって十分であり、「うちぬき」に代表される水資源（地下水）に恵まれている。この地下水は、農業用水として利用できるだけでなく、水温が $13^{\circ}\text{C}$ 程度で安定しているため、夏季の冷房用の冷熱源としても利用可能である。冷熱利用後の水は地下に戻し、地下水量への影響を最小限に抑える。また、沿岸部には工場が林立しており、この工場群からの排熱（ $200^{\circ}\text{C}$ 以下）を冬季の暖房に利用できる。このような地域熱資源の農産物生産への利用については、（株）西条産業情報支援センター（SICS）を中心とした「西条クールアースプロジェクト」などで既に検討が進められている。これに関連した「食品加工流通コンビナート構想」もメガスケール植物工場構想にフィットする。さらに、大都市圏で急増する定年退職者（Iターン）の受入については、ふるさと愛媛Uターンセンターにて対応可能であろう。西条市は、平成23年12月に「西条農業革新都市総合特区」（政府が地域限定で規制を緩和し、予算や税制の面で優遇する制度）に指定され、その究極目標として「わが国農業分野の総合力を向上させ、世界に通用する産業へと発展させるとともに、食の安全保障体制の確立へと繋げる」を掲げている。この特区指定とメガスケール植物工場の整合性は高く、地域発展と国際競争力のある農産物生産を同時に実現するための選択肢として、メガスケール植物工場をご検討頂ければ幸いである。

---

#### Profile 高山弘太郎 (たかやま こうたろう)

---

現 職 愛媛大学農学部講師

2004年 東京大学大学院農学生命科学研究科生物・環境工学専攻博士課程修了

専 門 植物診断計測工学

日本学術会議特任連携会員、日本生物環境工学会理事、生態工学会理事、農業情報学会理事

---