第2世代のSPAとその実装

誌名	植物環境工学
ISSN	18802028
著者名	高山,弘太郎
発行元	日本植物工場学会
巻/号	25巻4号
掲載ページ	p. 165-174
発行年月	2013年12月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council Secretariat

第2世代のSPAとその実装

高山弘太郎

愛媛大学農学部・愛媛大学植物工場研究センター 790–8566 松山市樽味3–5–7

Second generation speaking plant approach: Practical application

Kotaro TAKAYAMA

Faculty of agriculture, Ehime University 3-5-7, Tarumi, Matsuyama 790-8566

Abstract

The speaking plant approach (SPA) is regarded as a desirable concept for environmental control in highly sophisticated greenhouses. An important feature of SPA is sensor-based plant diagnostic techniques, which are used to monitor plant physiological status. Although the concept of SPA was originally proposed approximately 30 years ago, the practical application of SPA techniques in commercial greenhouses has only recently become feasible, due to the innovation of easy-to-use devises and information and communication technologies in the present decade. In this review, two prospective plant diagnostic techniques that can be utilized for the SPA, and their applications in semi-commercial greenhouses, are introduced. The first technique is plant diagnosis based on a plant's odor. Plants emit a broad range of volatile organic compounds and a plant's emission profile changes depending on its physiological status. The second technique is chlorophyll fluorescence imaging. This technique measures the chlorophyll fluorescence induction phenomenon -a dynamic change in chlorophyll fluorescence intensity induced by illuminating a dark-adapted leaf with a stable intensity excitation light- and analyzes the shape of the induction curve. In addition, new challenges for an SPA-based mega-scale greenhouse are discussed.

Keywords: chlorophyll fluorescence imaging, distribution of plant physiological status, plant diagnosis, speaking plant approach, volatile organic compound

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，わが国の農作物生産力の低下は底が見えない．さらに，TPP等にみるワールドワイドな農産物流通を念頭に置いたとき，ごく一部のブランド化に成功した生産者を除き，わが国の農作物生産の国際競争力の欠如は明白である．これは，わが国の農業が自立した産業として鍛えられてこなかった結果である．この反省に立ち，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作物生産システムの確立が急務である．

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，気温・湿度・CO_2・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，コンピュータ化・情報化・自動化により生産性を向上させてきた．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

2013年 7月25日受付
2013年 9月 2日受理
Corresponding author: Kotraro Takayama
(takayama@agr.ehime-u.ac.jp)

り札として世界的にも注目されている[1,2]．北欧を舞台に提唱されたSPAコンセプト[3-5]は，約30年の時を経ていよいよ商業的太陽光植物工場に実装されつつあるが，実装のための新たな視点での技術開発が必要となっている．なお，SPAの創成と歴史，関連学術については橋本[1]に詳しく述べられているので参照されたい．本稿では，筆者らがオランダと協力して革新的に開発を進める匂い成分計測システムによるストレス早期検知技術やクロロフィル (Chl) 蛍光画像計測システムによる光合成機能診断技術などの先端実例を紹介するとともに，Chl蛍光画像計測技術の太陽光植物工場への実装モデルについて提案する．さらに，SPA実装型太陽光植物工場をベースにした国際競争力のある農作物生産システムであるメガスケール植物工場の構想についても紹介したい．

2. オランダとの研究協力により開発を進めるSPAのための植物診断技術

オランダは，狭小な国土にも関わらず世界有数の農産物輸出国である．この国際競争力のある農業の一翼を担うのが，太陽光植物工場（グリーンハウス）における高度環境制御下での農作物生産である．オランダにおける太陽光植物工場の生産技術は，既に商業的成功を得るに十分なレベルにあるが，さらなる高効率（高収益・低環境負荷）生産を目指し，SPAに関連する様々な研究開発が行われている．具体的には，ワーゲニンゲン大学 (Wageningen UR, オランダ) がリーダーとなって進める独蘭共同プロジェクト“Healthy Greenhouse”(2010) の一部に後述する匂いセンシングによる病虫害検知技術開発やChl蛍光画像計測システムによる光合成機能診断技術開発が含まれている．愛媛大学植物工場研究センター（仁科弘重 センター長）では，ワーゲニンゲン大学のvan Henten教授 (Farm technology group) らと共同でこれらの植物診断技術の実用化に向けた開発を進めている．

2.1 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（匂い成分）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 (Fig. 1)．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[6-9]．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 (Fig. 2)．

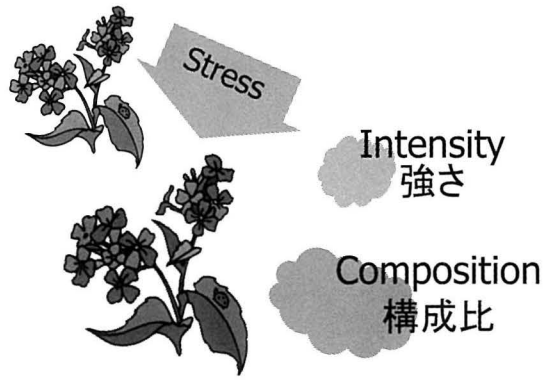

Fig. 1 Effect of biotic/abiotic stress on plant's volatile organic compound emission
ストレスが匂い成分放出に及ぼす影響

Fig. 3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となっており，水ストレスにより匂いが強くなることが分かる．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) で有意に大となっていた (Fig. 4)．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．

この実験結果は，匂い成分計測システムによるストレス早期検知技術の商業的太陽光植物工場への実装に向けて極めて重要な知見を与える．ポイントは，匂いの質（匂い成分の放出比）のモニタリングだけでストレス検知が可能であるという点である．比較的密閉性の高い太陽光植物工場であっても，室内風速は0.1 ms^{-1}程度はある．匂い成分計測の第一段階は，エアサンプリング（サンプリング時間は数秒間～数時間）であるため，計測対象植物体の風下でサンプリングを行った場合と，風上で行った場合とでは，サンプリングされた空気に含まれる匂い成分の濃度（匂いの強さ）が異なる．一

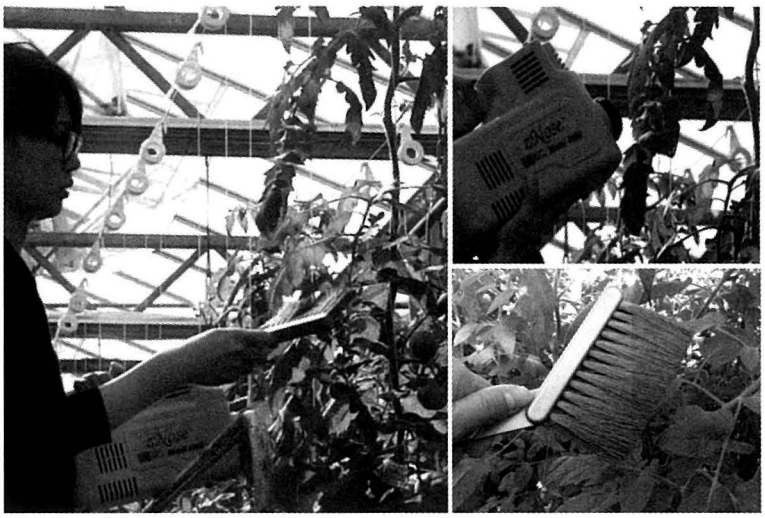

Fig. 2 Measurement of volatile organic compound emitted from tomato plant with zNose, soft–brushing treatment and on–site air sampling
zNose による匂い成分計測の様子（ブラッシング処理と on–site での空気サンプリング）

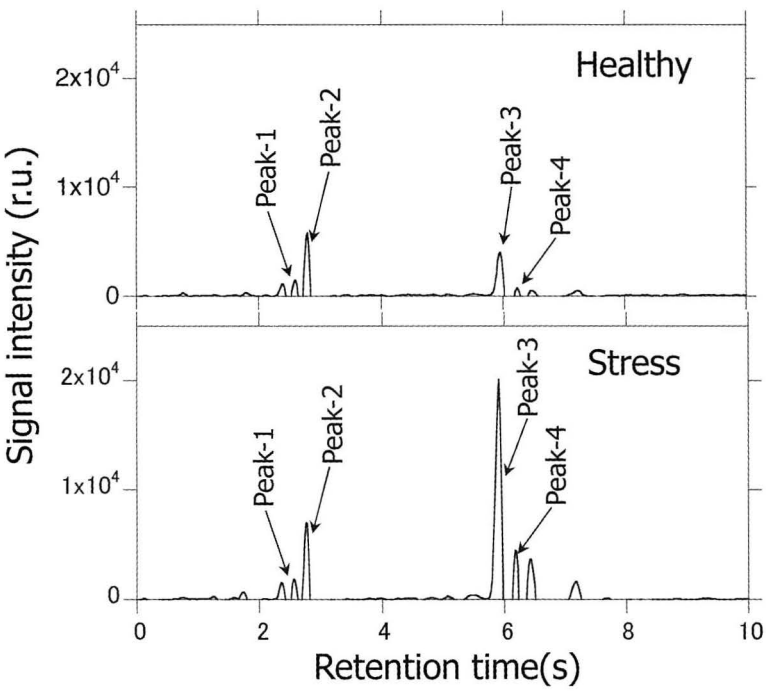

Fig. 3 Effect of water stress on terpenes emission from tomato plant, Peak–1 and 2 represent monoterpenes and Peak–3 and 4 represent sesquiterpenes
水ストレスがテルペン類の放出に及ぼす影響（Peak–1・2：モノテルペン，Peak–3・4：セスキテルペン）

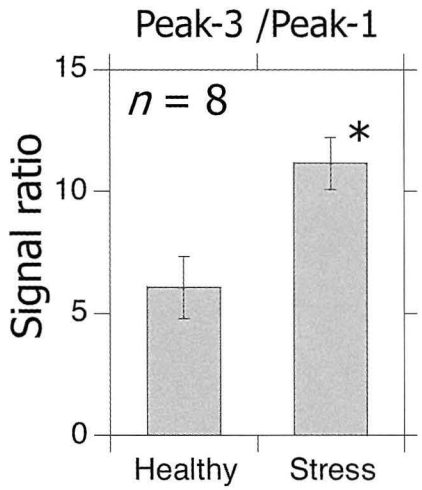

Fig. 4 Effect of water stress on the emission ratio of sesquiterpene and monoterpene (*: t–test, $p < 0.05$)
水ストレスがセスキテルペンとモノテルペンの放出比に及ぼす影響 (*: t–test, $p < 0.05$)

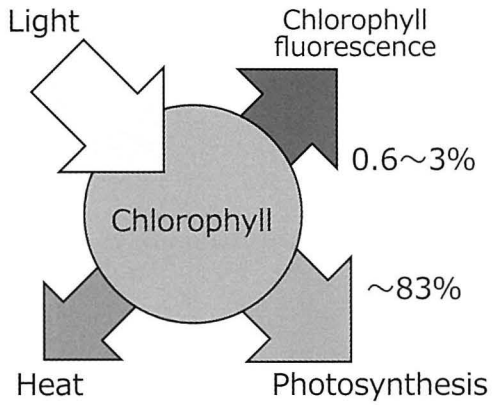

Fig. 5 Schematic of energy distribution in chlorophyll
吸収した光エネルギーと Chl 蛍光発光の関係

方，匂い成分の構成比 (匂いの質) は，風下と風上で大きな違いはないと考えられる．このことは，「匂いの強さに基づいた植物診断技術」よりも「匂いの質に基づいた植物診断技術」の方が安定性と信頼性が高いロバストな植物診断技術であることを意味する．

太陽光植物工場は農作物生産の正に現場であるため，様々な外乱が存在する．そのため，計測自体に高い精度 (正確さ) を要求する生体情報計測技術が商業的太陽光植物工場に実装される可能性は低い．実装のためには，計測の不確かさをソフトウェア的に除去して植物診断のための生体情報の精度を保証する仕組みが必須となる．

2.2 Chl 蛍光画像計測システムによる光合成機能診断技術

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 (Fig. 5)．そのため，Chl 蛍光を計測することで，植物体に触れることなく光合成機能に関する情報を取得することができる．

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 [10,11]．Fig. 6 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 Chl 蛍光画像計測システム [ver. 2011] の模式図である．本システムは，励起光照射用の 0.6 m × 0.6 m の大型 LED パネル光源 ($\lambda < 650$ nm) とロングパスフィルタ ($\lambda > 700$ nm) を装着した CCD カメラからなる Chl 蛍光画像計測部，画像計測システム昇降部，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，および，これらを搭載して植物工場内の複数の栽培レーンに進入することができる走行部で構成されている [12,13]．

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.[14] 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 (Fig. 7)，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となる．

Fig. 8 は，Chl 蛍光画像計測システムによるトマトサビダニ害の早期検知例である．P/S は，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である [15]．トマトサビダニによって光合成機能障害が生じた葉を明確に検知できている．トマトサビダニは，農薬の使用を控えた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．このような病虫害の早期検知が可能になれば，早期の処置によ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．

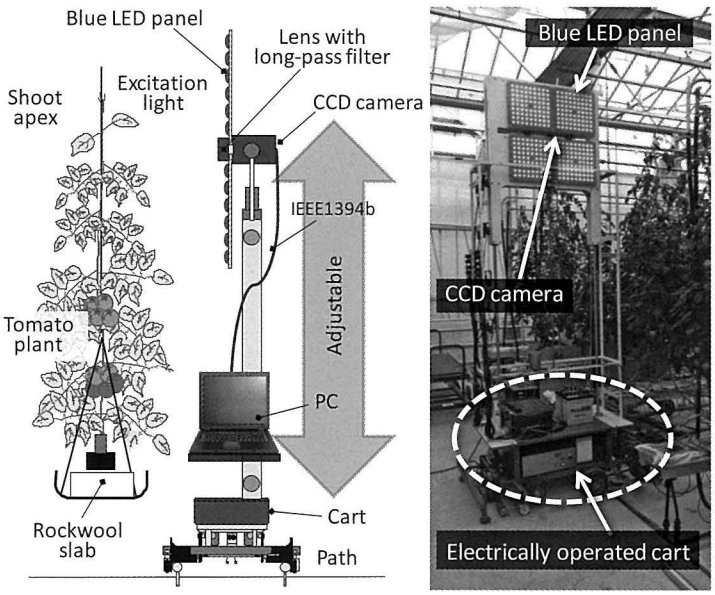

Fig. 6 Chlorophyll fluorescence imaging system (ver. 2011) for plant diagnosis of full-size tomato plants in greenhouse. The autonomous electrically operated cart was developed by Prof. Arima (Ehime University).
トマト群落を対象とした Chl 蛍光画像計測システム [ver. 2011](走行部開発 : 愛媛大学 有馬誠一氏)

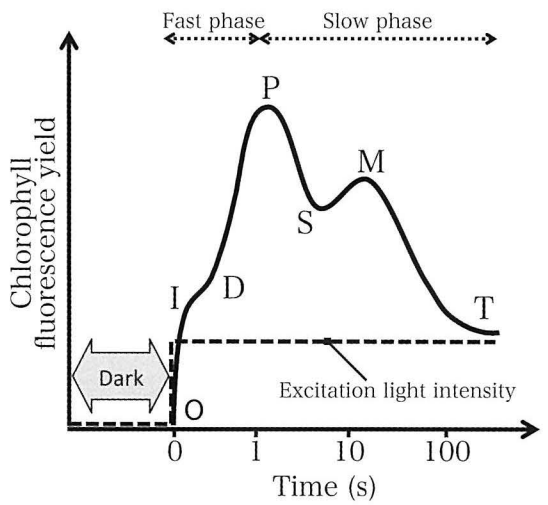

Fig. 7 Schematic of a typical chlorophyll fluorescence induction curve and the nomenclature indicating the characteristic inflection points, which are named as O (origin), I (inflection or intermediary peak), D (dip), P (peak), S (quasi-steady state), M (maximum) and T (terminal steady state)
インダクションカーブの形状と特徴点の名称

3. Chl 蛍光画像計測ロボットの実装に向けた取組み

3.1 デバイスの進化と有線化によるコストダウン

近年の青色 LED の高輝度化と低廉化により，実装型 Chl 蛍光画像計測ロボットには (Fig. 9)，従来型 (Fig. 6) と同じコストでありながら約 3 倍の広さとなる 1.8 m (H) × 0.6 m (W) の大型青色 LED パネルを搭載した．また，安価でありながら高耐候性と広範な視野 (視野角 120 度) の広角レンズを装着した CCD カメラを使用する．これにより，1.8 m (H) × 1 m (W) の領域を対象とした Chl 蛍光画像計測が可能となり，長期多段栽培されているフルサイズのトマト 2 個体を一度に撮像することができる．本改良により，従来型の画像計測システム (Fig. 6) の昇降機能を廃した．また，従来型は「自律無線走行」というコンセプトであったため，大容量バッテリーを搭載する必要があったが，新型は，レーン固定型とすることで有線による電力供給という選択肢も加えた．これにより，レーン間移動のための機能は不要となり，従来型 (Fig. 6) と比較して大幅なコストダウンが期待される．

3.2 計測動作の単純化によるロバスト設計

Chl 蛍光画像計測ロボットは，レーン上を直進走行し，一定時間間隔で停止して Chl 蛍光画像計測を行い，その後，また直進走行するという動作を繰り返す．新システムでは，自

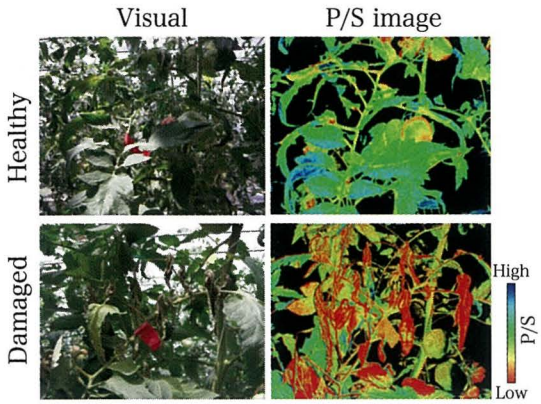

Fig. 8 Photosynthetic dysfunction caused by tomato russet mite. P/S represents the photosynthetic electron transport activity.
トマトサビダニによる光合成機能障害 (P/S は光合成電子伝達活性の高さを表す指標)

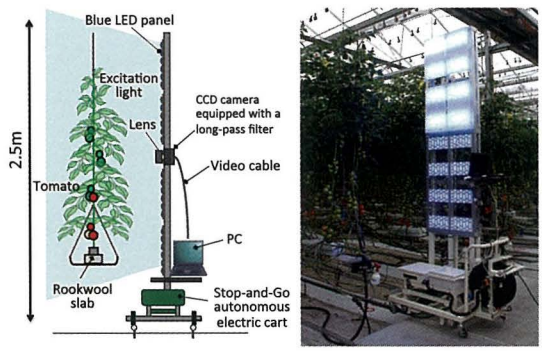

Fig. 9 Low-cost chlorophyll fluorescence imaging robot for practical use in commercial greenhouse
実装に向けた新型 Chl 蛍光画像計測ロボット

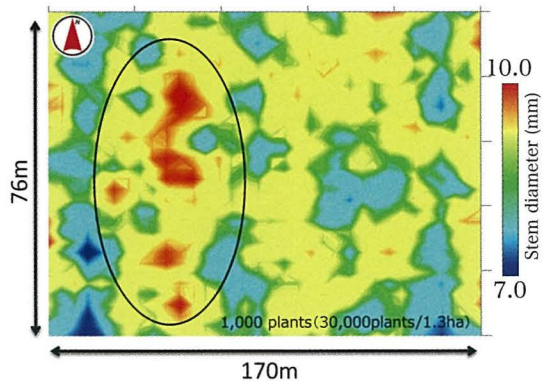

Fig. 10 Distribution of stem diameter of tomato plant across a 1.3 ha greenhouse.
大規模トマト生産太陽光植物工場におけるトマトの茎径分布

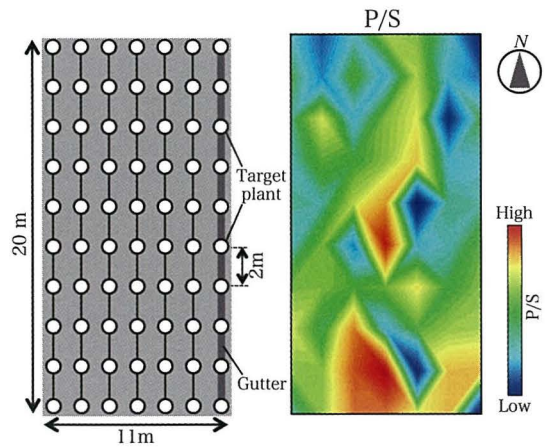

Fig. 11 Distribution of photosynthetic activity of tomato plant in an experimental greenhouse
実験用太陽光植物工場内のトマト個体群の光合成機能マップ

律走行台車の動作 [+ LED 照射](ハードウェア) と画像計測 (ソフトウェア) を完全に独立させるため，両者を同期させる必要が無い．自律走行台車は，走行タイマーと停止タイマーにより Stop-and-Go を繰り返す単純な仕組みで動作し，停止タイマーが青色 LED パネルの ON/OFF スイッチも兼ねる．1 レーン走査中は画像計測を連続して行い，全画像を一時的に大容量記憶装置にストックする．1 レーン分の画像計測が終了すると，画像解析を始める．この際，Chl 蛍光発光が認められない暗黒画像 (自律走行台車の直進走行中に撮影された画像) は除去し，インダクション画像のみを抽出する．このように，新型 Chl 蛍光画像計測ロボット (Fig. 9) には複雑な制御系が一切含まれておらず，実装を念頭に置いた極めてロバストな設計であると言える．また，走行部と画像計測部の研究開発を独立して進めることが可能となるため，実装の早期化が期待される．

4. Chl 蛍光画像計測ロボットの実装に向けたシミュレーション

4.1 時間分解能

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 日を想定している．この時間分解能は，比較的静的な植物応答（栄養成長，生殖成長，果実肥大・着色，病虫害，弱光ストレス，低温ストレスなど）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．一方

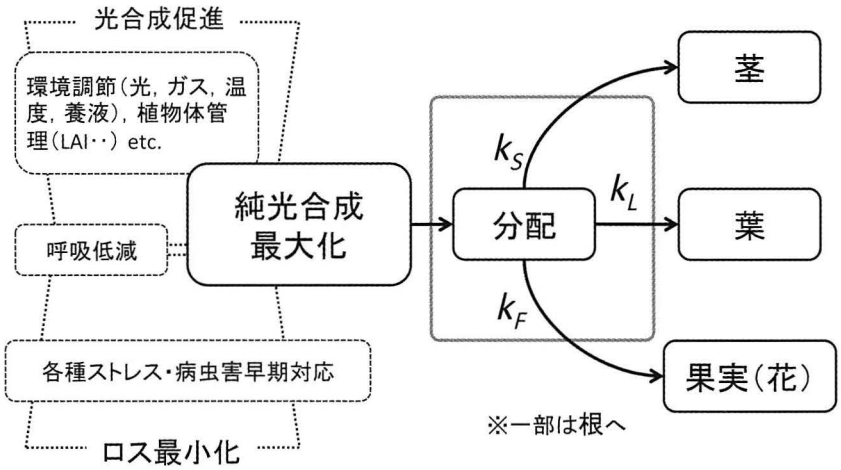

Fig. 12 Simplified model of tomato plant cultivation in commercial greenhouse. The k_S, k_L and k_F are the distribution coefficients for each organ.
太陽光植物工場における長期多段トマト生産の単純化モデル (k_S, k_L, k_F は各器官への分配係数)

で，より高時間分解能 (数分間から数時間のインターバル) の生体情報計測を求める意見もあるが，得られた生体情報を SPA に利用する場合，環境調節の時間分解能を正確に把握したうえで，その有用性について議論しなければならない．

4.2 空間分解能

Fig. 10 は，商業的トマト生産太陽光植物工場 (約 1.3 ha) における茎径 (茎頂から 15 cm 下の主茎の直径) の分布図である．生育ムラが可視化できており，特に，楕円で囲まれたエリアの茎径が太くなっていることが分かる．このときのデータサンプリングの空間分解能は 2 m (N–S) × 5 m (E–W) (1,000 株 /30,000 株) であった．この結果は，2 m × 5 m の空間分解能でデータサンプリングを行えば，商業的太陽光植物工場における生育ムラの把握が可能であることを示唆している．

Chl 蛍光画像計測ロボット (Fig. 9) 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．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，データサンプリングの空間分解能を 5 ～ 10 m にするには，10 ～ 20 台の Chl 蛍光画像計測ロボットを導入する必要がある．栽培レーン間隔が約 1.6 m (レーン数は約 60 レーン) であるため，3 ～ 6 レーン間隔でロボットを配置することになる．他方，栽培レーン方向の空間分解能は任意に設定できるが，3 ～ 5 m 程度で十分であろう．

Fig. 11 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 [15]．

5. まとめと展望

5.1 生育状態の空間分布把握の重要性

太陽光植物工場における生体情報計測の空間分解能の最適値についての知見は皆無である．これまで生体情報の空間分布を継続的にモニタリングする装置が存在しなかったためである．そのため，現行の商業的太陽光植物工場における環境調節では，生育状態の不均一性はほとんど考慮されていないし，知能化等の研究開発も生育状態が均一であることを前提として進められている．しかしながら，太陽光植物工場は栽培エリアが広大であるため，何らかの理由により生育状態が不均一になる可能性が高い (Fig. 10)．太陽光植物工場の生産性最大化のためには，この生育状態の空間的不均一性を正確に把握した上で，利益を最大化するための戦略を立てる必要がある．

たとえば，生育の鈍化が検知された領域と夜間気温が低い領域とが合致した場合，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．しかし，検知された生育の鈍化が生産性にどの程度影響を及ぼすのかについても同時に検討する必要がある．設備投資コストに見合うメリットが無いと判断される場合などは，「経営判断としての看過」といった栽培管理戦略もあり得る．いずれにしても，太陽光植物工場を生産システムとして完全に把握するためには，生育状態

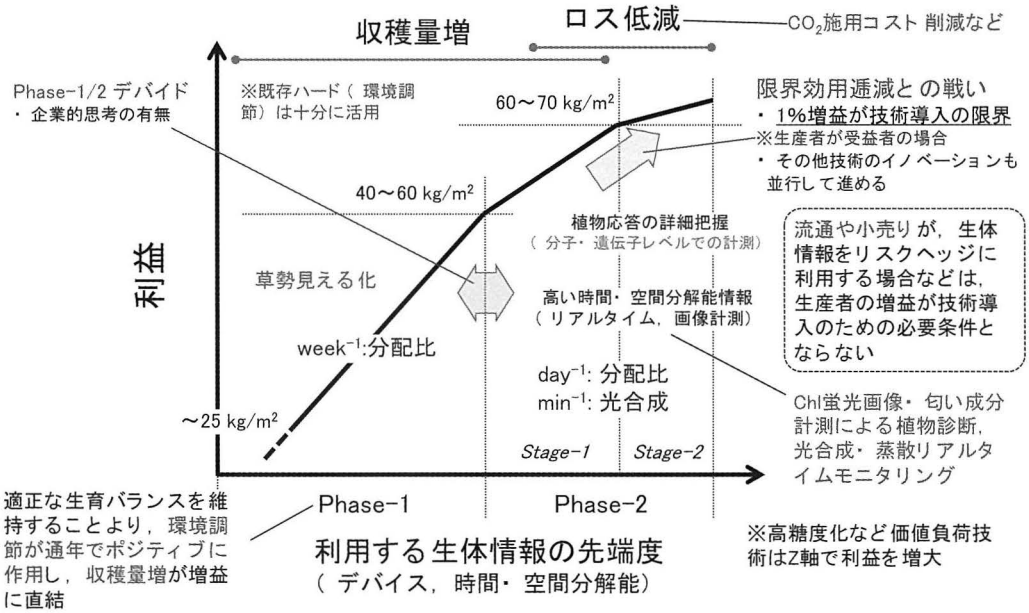

Fig. 13 Contribution of plant diagnosis techniques to make a profit in greenhouse tomato production.
生体情報計測の増益への寄与

の空間分布把握は必要不可欠である.

5.2 生体情報計測技術の増益への貢献モデル

SPA の実装がもたらす受益形態は収穫量の増大に限られない. ここでは, 増益に直結する SPA 実装を進めるために踏まえておくべき重要項目について整理する. まず, SPA の基盤である生体情報計測技術であるが, どんなものでも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. 植物工場のハード面（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, 栽培管理スキルの成熟度によっても導入に適した計測技術が大きく異なってくる. トマトの長期多段栽培を例に太陽光植物工場における農作物生産を単純化すると,「純光合成の最大化」と「光合成産物の各器官への適正分配」(Fig. 12) となる. これは, 純光合成をいくら大きくしても分配が適正でなければ収穫量が増大しないことを意味している. トマトの生産性を長期にわたり高く維持し続けるためには, 茎・葉・果実の良好なバランスの維持が最重要であり, 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. この生育バランスの維持が出来るか否かによって, 導入に適した計測技術が大きく異なる.

Fig. 13 は, 生体情報計測技術の先端度と増益の関係を表している. Phase–1 は, 光合成産物の分配の適不適が収穫量を律速しているため, これを適正化することにより, 主に収穫量の増大により利益が増大する. この Phase では, 1 週間間隔で計測される茎径・茎伸長速度・葉数などといった基本的な生体情報を有効活用[16]することによって, 十分な増益が期待できる. Phase–2[Stage–1] では, 高い時間・空間分解能を有する生体情報計測技術が増益に貢献するようになる. 1 日単位での分配の評価に基づいたフレキシブルな環境調節が可能となり, 光合成速度などは 10 分間隔でモニタリングすることで, 人間では不可能な高時間分解能の環境調節が可能となる. Phase–2[Stage–2] は, 収穫量増大による増益は頭打ちとなるものの, 主にロス低減による増益が期待される. また, 分子・遺伝子レベルでの計測 (Speaking Cell Approach)[12] などの活用も期待される. なお, これらは, 生産者が受益者となることを想定した導入モデルであるが, 流通や小売りがリスクヘッジのために生体情報を活用する場合には, 生産者の増益が技術導入のための必要条件とならないことも考慮すべき点である.

5.3 今後の展望

商業的太陽光植物工場に植物診断ロボットが実装されることで, 高時間分解能（数時間～1 日）で高空間分解能 (10 m × 10 m 以下のメッシュ) の生体情報が継続的に提供される農作物生産システムが確立する. 取得される生体情報を, 環境情報や栽培管理情報と合わせて解析することで, 生産性を律速する要因の抽出が可能になり, 適切な環境調節・栽培管理の指針をリアルタイムに提供できるようになる. また, 生育・収穫シミュレーションモデルの精度向上にも寄与すると期待される. 今後は, 上記プロセスを加速させるための情報

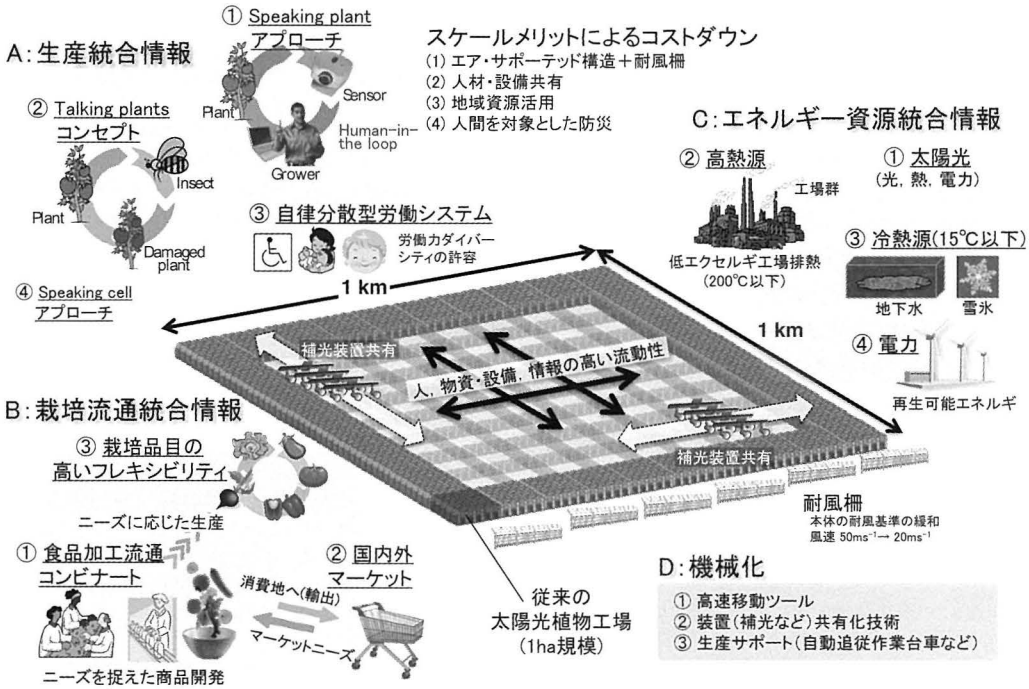

Fig. 14 Internationally competitive agricultural production based on mega-scale greenhouse with integrated agricultural information
統合情報を駆使したメガスケール植物工場による国際競争力のある農産物生産

工学的研究に重心がシフトするであろう.

他方, 日本学術会議農業情報システム学分科会 (野口 伸 委員長) では, SPA 技術をより効果的に活用できるフィールドとして「メガスケール植物工場構想」(提案者 大政謙次 日本学術会議会員) が提案されている (Fig. 14). これは, 栽培面積が 1,000,000 m^2 (100ha) 以上のメガスケール植物工場と, そこでの農作物生産を支える統合情報システムから成る. メガスケール植物工場は, 従来の約 100 倍の栽培面積を有し, 内部が 1 ～ 2 ha の密閉性の高い小室 (Areola) に区分されており, Areola 毎に高精度の環境調節が行われ, 多品目を多様な作型で周年生産する. 労働力, 物資, 設備は Areola 間で共有される. これらは, 統合情報システム群 (生産統合情報, 栽培流通統合情報, エネルギー資源統合情報) により管理され, 植物工場のベネフィットを最大化するように一定時間間隔で再配置される. なお, 意図的にわずかに異なる環境条件を設定した Areola 間で生育状態を比較することで, 最適栽培環境条件の自動探索を可能にする. さらに, このような統合情報システムメガスケール植物工場を高性能農作物生産パッケージとして国際展開することも構想に含まれており, 国際競争力のある強い農作物生産の早期実現を達成目標としている. このような生産システムの実現は, 今後 100 年間の農業生産関連分野の国家戦略の基礎となりうるものであり, そのための研究開発については, 日本生物環境工学会が中心的な役割を果たすべきである.

謝　辞

本稿では, 日本学術会議 公開シンポジウム「世界の食料問題へ期待が高まる太陽光植物工場のイノーヴェーション」(主催 日本学術会議 農業情報システム学分科会) における著者の報告の一部をまとめさせて頂いた. この機会をお与え頂いた日本生物環境工学会会長で日本学術会議農業情報システム学分科会委員長の野口 伸先生に感謝申し上げる. また, SPA コンセプトを先導され, 現在の SPA 技術の普及についても絶え間ないご指導を頂いている日本生物環境工学会名誉会長の橋本 康先生に感謝申し上げる. さらに, 日頃より本研究に多大なご支援を頂いている日本生物環境工学会の諸先生に深く感謝申し上げる.

本稿で紹介した Chl 蛍光画像計測技術は, 日本生物環境工学会副会長の大政謙次先生が約 26 年前に世界で初めて確立した技術であり, また, 匂い成分計測技術は, ワーゲニンゲン大学 (オランダ) の van Henten 教授が主導するコンセ

プトである．両先生には，愛媛大学植物工場研究センターの客員教授として継続的なご指導を頂いており，あらためて感謝を申し上げたい．また，愛媛大学植物工場研究センターでは，これらのシーズ技術を太陽光植物工場に実装するための一連の研究開発を行っているが，これをご指導頂いている同センター長の仁科弘重先生，同副センター長の有馬誠一先生と羽藤堅治先生，さらには，本研究開発を共同で進めている同センター教職員と学生諸氏に心より感謝申し上げる．また，特に，実装型 Chl 蛍光画像計測ロボットの事業化に向けてご尽力頂いている愛媛大学農学部井関農機寄附講座の岡田英博先生をはじめとする諸先生に感謝申し上げたい．

最後に，本稿執筆においてご助言を頂いた日本生物環境工学会会長補佐の先生方と本誌編集副委員長の安永円理子先生に謝意を表す．

引用文献

1) 橋本 康．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. 2013.
2) 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.
3) Udink ten Cate AJ, Bot GPA, van Dixhoorn JJ. Computer control of greenhouse climates. Acta Hort. 87: 265–272. 1978.
4) Hashimoto Y. Computer control of short term plant growth by monitoring leaf temperature. Acta Hort. 106: 139–146. 1980.
5) Hashimoto Y. Recent strategies of optimal growth regulation by the speaking plant concept. Acta Hort. 260: 115–121. 1989.
6) Jansen RMC, Hofstee JW, Wildt J, Verstappen FWA, Bouwmeester HJ, Posthumus MA, van Henten EJ. Health monitoring of plants by their emitted volatiles: trichome damage and cell–membrane damage are detectable at greenhouse scale. Ann. Appl. Biol. 154: 441–452. 2009.
7) 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.
8) Jansen RMC, Hofstee JW, Wildt J, Vanthoor BHE, Verstappen FWA, Takayama K, Bouwmeester HJ, van Henten EJ. Health monitoring of plants by their emitted volatiles: A model to predict the effect of *Botrytis cinerea* on the concentration of volatiles in a large–scale greenhouse. Biosystems Eng. 106: 37–47. 2010.
9) 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.
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) Takayama K, Nishina H. Chlorophyll fluorescence imaging of chlorophyll fluorescence induction phenomenon for plant health monitoring. Environ. Control Biol. 47: 101–109. 2009.
12) 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 5 月号：563–571. 2010.
13) 高山弘太郎．最近の植物診断「第二世代の SPA」とその成果．野口 伸，橋本 康，村瀬治比古 編著，太陽光植物工場の新展開．養賢堂，東京．2012.
14) 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.
15) 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.
16) 高山弘太郎，森本千香子，高橋憲子，仁科弘重．草勢の見える化－トマト周年栽培のための生育状態診断支援システムの開発－．In: 日本生物環境工学会 2012 年東京大会講演要旨．東京．9 月 4 日－7 日．144–145. 2012.