

報 告

知能的太陽光植物工場の新展開



平成23年(2011年) 6月 20日

日 本 学 術 会 議

農学委員会・食料科学委員会合同

農業情報システム学分科会

この報告は、日本学術会議農学委員会・食料科学委員会合同農業情報システム学分会及び分科会WG「知能的太陽光植物工場」の審議結果を取りまとめて公表するものである。

日本学術会議農学委員会・食料科学委員会合同
農業情報システム学分会

委員長	野口 伸	(第二部会員)	北海道大学大学院農学研究院教授
副委員長	澁澤 栄	(連携会員)	東京農工大学教授
幹事	野並 浩	(連携会員)	愛媛大学農学部教授
幹事	齊藤 誠一	(連携会員)	北海道大学大学院水産科学研究院教授
	梅田 幹雄	(連携会員)	京都大学特任教授
	大下 誠一	(連携会員)	東京大学大学院農学生命科学研究科教授
	大政 謙次	(連携会員)	東京大学大学院農学生命科学研究科教授
	木谷 収	(連携会員)	東京大学名誉教授
	木村 俊範	(連携会員)	北海道大学大学院農学研究院教授
	古在 豊樹	(連携会員)	千葉大学環境健康フィールド科学センター教授
	後藤 英司	(連携会員)	千葉大学大学院園芸学研究科教授
	笹尾 彰	(連携会員)	東京農工大学副学長・理事
	柴崎 亮介	(連携会員)	東京大学空間情報科学研究センター教授・センター長
	橋口 公一	(連携会員)	第一工業大学教授、九州大学名誉教授
	橋本 康	(連携会員)	愛媛大学名誉教授
	前川 孝昭	(連携会員)	筑波大学名誉教授
	町田 武美	(連携会員)	放送大学客員教授、茨城大学名誉教授
	村瀬治比古	(連携会員)	大阪府立大学教授

WG「知能的太陽光植物工場」

野口 伸	(第二部会員)	北海道大学大学院農学研究院教授
古在 豊樹	(連携会員)	千葉大学環境健康フィールド科学センター教授
橋本 康	(連携会員)	愛媛大学名誉教授
大政 謙次	(連携会員)	東京大学大学院農学生命科学研究科教授
後藤 英司	(連携会員)	千葉大学大学院園芸学研究科教授
野並 浩	(連携会員)	愛媛大学農学部教授
町田 武美	(連携会員)	茨城大学名誉教授
村瀬治比古	(連携会員)	大阪府立大学教授
有馬 誠一	(オブザーバー)	愛媛大学農学部准教授
池田 英男	(オブザーバー)	千葉大学環境健康フィールド科学センター客員教授

石川 勝美	(オブザーバー)	高知大学農学部教授
今井 勝	(オブザーバー)	明治大学農学部教授
位田 晴久	(オブザーバー)	宮崎大学農学部教授
上野 正美	(オブザーバー)	琉球大学農学部教授
奥田 延幸	(オブザーバー)	香川大学農学部教授
川満 芳信	(オブザーバー)	琉球大学農学部教授
近藤 義和	(オブザーバー)	琉球大学産学官連携推進機構研究開発 支援部門長・教授
清水 浩	(オブザーバー)	京都大学大学院農学研究科教授
高山弘太郎	(オブザーバー)	愛媛大学農学部講師
田中 道男	(オブザーバー)	香川大学農学部教授
筑紫 二郎	(オブザーバー)	九州大学生物環境調節センター教授
鳥居 徹	(オブザーバー)	東京大学大学院新領域創成科学研究科教授
仁科 弘重	(オブザーバー)	愛媛大学農学部教授
羽藤 堅治	(オブザーバー)	愛媛大学農学部准教授
原 道宏	(オブザーバー)	岩手大学名誉教授
松岡 孝尚	(オブザーバー)	高知大学名誉教授
丸尾 達	(オブザーバー)	千葉大学大学院園芸学研究科准教授
森本 哲夫	(オブザーバー)	愛媛大学農学部教授
吉田 敏	(オブザーバー)	九州大学生物環境調節センター准教授

要 旨

1 作成の背景

人口増大、異常気象、砂漠化等による耕地面積の減少等々のネガティブ要因の予想を超える拡大により、農業生産の新たな展開は、世界各国にとって喫緊の最重要課題の一つとして捉えられている。特に、圧倒的な工業生産への集中で発展してきたわが国においては、労働力は農村を離れ、社会全体が農業といかに係わっていくかの論議は後回しにされ、日本農業の改善方向は、いまだ明確にされず、食料供給には多くの深刻な問題が残されている。さらに、東日本大地震における原子力発電所事故における農地の放射線汚染の回避を含めて、大災害時の長期的な食料確保の安全保障への対応が求められる。このような工業化社会が優先する状況におけるわが国の新たな農業生産への取り組みとして、工業技術を活用する植物工場への期待は少なくない。生物学と工学との複合領域で展開される植物工場は、両者の体系的な学術に立脚し、システム科学を包含するサステイナブルな展望が示せなければ、その有用性に対する社会の理解は得られないであろう。植物工場の有用性の評価が分かれ、今後の展開の方向性が絞られぬまま最近に至っていることは誠に遺憾なことである。以上の認識に基づいて、農業情報システム学分科会では、WG「知能的太陽光植物工場」を設置して、わが国の食料生産手段としての植物工場の広範な普及を実現するために不可欠な科学技術とこれからの学術研究のあり方について審議を重ねてきた。

2 現状及び問題点

人工光植物工場は都市域で廃ビル等に注目し、水耕栽培システムを設置し、外気と切断された閉鎖環境下において、人工光で栽培する葉菜類は、珍しくもあり、アメニティー的な効果もあり、存在自体には少なからぬ価値が認められて当然である。だが食料生産の長い歴史の主役を担ってきた農業界から見ると、現在実用に供されている植物工場は、従来型の農業と対比し、扱う品種が少数、果菜や穀物への拡大が期待できない等々、多くの欠点だけが指摘され、正当な評価に至らなかったことは容易に理解できる。しかし、この種の植物工場は、世界的に見て、実は少数の存在であり、詳しくは人工光植物工場と「人工光」を頭に被せる植物工場に過ぎない。このような状況を憂慮し、平成 17 年に日本学術会議 19 期農業環境工学研究連絡委員会では、農村地域に工業国に相応しい植物工場を普及させ、気候条件が大きく異なるわが国の特性を考慮し、全国何箇所かに拠点を設け、そこで西欧型の一棟の面積が 1 ヘクタールを越える広いグリーンハウスで太陽光をフルに活用する植物工場による農業生産の技術形成を行い、従事者の養成を含め、新たな食料生産の増大を指向すべきである、との提言を行った。この対外報告に従い、直ちに愛媛大学を中心とする四国国立 3 大学が研究チームを組織し、大きな方向性が示された。平成 21 年に経済産業省と農林水産省による農工商連携組織が、愛媛大学、千葉大学、大阪府立大学を中核に数研究機関に助成を行い、太陽光と人工光による植物工場の計画案が絞られ、それらの研究を実施する大型装置の建設が進んだ。日本学術会議の対外報告に沿うかたちで国家プロジェクトが開始し、植物工場の普及に向けた大きな一歩を踏み出したことは喜ばしい限りである。この報告は、いま

社会から注目されている植物工場の次なるステップに備えて今後検討すべき情報化・システム化の観点から問題点を指摘し、農林水産省・経済産業省など関係行政機関、産官学の研究機関の今後の取り組みを喚起するために取りまとめたものである。

3 報告の内容

(1) 植物工場の目指す環境制御型農業を育てる学術環境の整備

オランダのような植物工場の先進国ではコンサルタントが驚異的な高品質・多収穫を実現したケース・スタディーに注目し、得られたデータに基づいて「栽培作物と環境調節に関するある種のエキスパート・システム」を研究開発した。このエキスパート・システムがオランダの農業生産において驚異的な成果をもたらした原動力である。すなわち、栽培技術の表面的な模倣は無意味であり、太陽光植物工場における環境条件と生理生態の応答関係を同定し、オランダに見られるような農業を革命するコンピュータ制御の芽を大きく育てる学術環境の整備がわが国においても不可欠である。

(2) 生体計測とスピーキング・プラント・アプローチ (SPA) による環境制御の必要性

太陽光植物工場では、人工光植物工場とは異なり、外界の気象条件の時系列的な変動、あるいは日変化に基づく変動によって、栽培環境と同時に生育状態も変動する。この変動に対応して収穫量を維持・増大させることが、太陽光植物工場発展のポイントである。効果的な環境制御を行うため、まず植物の生育状態の診断が必要不可欠であり、植物の生体計測結果に基づいた環境制御が本質である。この技術思想は 20 年以上前に提唱された SPA と今日研究が進められている第 2 世代 SPA であり、今後の太陽光植物工場にとって必須の概念として位置付けて学術研究を推進する必要がある。

(3) 植物栽培プロセスへのシステム科学的アプローチの推進

SPA を効果的に推進するには、環境条件に対する作物の生理状態のシステム同定が重要になる。すなわち、諸々の環境条件に応答する作物のシステム科学的な検討が必要である。植物工場のモデルプラントで実際に栽培し、実測し、試行錯誤で基本的なシステムに関する洗い直しが必須である。さらに太陽光植物工場のシステム制御において、その飛躍的な前進に向けて最適化、知能化の概念は重要である。これらの学術研究を推進して、全く効率的な植物工場のあるべき理想像、すなわち「次世代植物工場」像に結び付ける必要がある。

(4) 次世代植物工場を担う研究者・技術者の育成

農学における課題対応型教育プログラムとして「次世代植物工場」は取り組むべき課題である。「次世代植物工場」は生物学と工学の融合を高度に進めた学際・複合領域であり、さらに SPA や植物-環境複合系のモデリングと制御、さらに最適化・知能化といった学問分野が重要となる。また、現在農商工連携プロジェクトとして行政から強力に支援されている植物工場プロジェクトにおいても情報化・システム化・自動化を重点課題に据えており、その人材育成は急務である。今後、学協会・大学・試験研究機関・企業などが連携して、教育カリキュラムや教科書など教材の整備を行うことが必須である。

目 次

1	はじめに	1
2	植物工場とは、その歴史的背景	2
3	植物工場普及に向けた現状とこれからの学術のあり方	5
4	生体計測、SPA、そして最適栽培のプロセス制御へ	6
5	植物栽培プロセスへのシステム科学的なアプローチ	8
6	最適化、知能化の視点と次世代植物工場	9
7	おわりに — 植物工場への若干の期待	13
	<参考文献>	14
	<参考資料>	
1	農工商連携プロジェクトにおける植物工場の取り組み	16
2	分科会およびWG「知能的太陽光植物工場」における審議経過	19
3	公開シンポジウム	21

1 はじめに

植物工場が最近急激に社会の注目を浴び始めた。喜ばしいことと受け止めている。しかし、農業分野に植物工場が出現し、一部マスコミの話題になったのは約30年ほど前であり、関係する学会「日本植物工場学会」が設立され、日本学術会議に承認され、国際学会（IFAC）にも関係技術委員会が立ち上げられてから、20年余が経過している。

当時の農業界では環境調節された農業と云えば、プラスチックハウスによる施設園芸が中心であり、ハイテク工学で武装し、人工光による照明で空気調和された工場で栽培される植物工場は、社会に強いインパクトを与えたが、太陽光の恵みで発展してきた「農の論理」からは、農業の範疇ではないと激しい反発が寄せられた。

農学・園芸分野の中心的な学者の参入・協力が少なく、栽培作物の拡大や、高品質・多収穫への生物学的な成果を含め、開かれた俯瞰的な科学領域としての総合的な高い評価が得られなかった。

世界に目を向けると、西欧における冬の主な野菜はオランダ、ベルギーを中心にグリーンハウス・ホーティカルチャーにより供給されていた。1棟の面積が1ヘクタールを超える巨大な建造物であり、それらが群をなし、太陽光（補光に人工光も設備）を採り入れ、大型ボイラーによる暖房システムや養液供給システムをはじめ、まさに大型機器が装備された栽培工場であった。1970年代末頃、コンピュータ制御がこのグリーンハウス・システムにも導入され、関係学会も国際園芸学会(ISHS)だけでなく、機能的な工学を守備範囲とする国際自動制御連盟(IFAC)が関与し、まさに太陽光植物工場と称されるような先端的なコンピュータ制御の野菜工場*が実現し、繁栄している。

日本学術会議第19期農業環境工学研究連絡委員会では、世界におけるわが国のこの状況を憂慮し、今後の食料生産に有用な係わりをもてる植物工場の重要性を公的に史上初めて言及する対外報告書¹⁾を2005年にまとめた。国際的に見てもメジャーである太陽光植物工場を中心に、人工光の植物工場を含め、学術貢献の展望を試みたものである。すなわち、農の論理に基づき、地域の気象条件が多岐に渡るわが国の特徴を考慮し、全国にいくつかの地域拠点となる太陽光植物工場を設置し、地域に見合う拠点技術を園芸学、環境工学、制御・情報工学等の関連技術をベースに植物工場技術の形成を試み、それを教育・普及し、農業振興、さらには地域振興を図るべきとの提言であった。

* わが国のように野菜（葉菜、蔬菜、果菜など）を工場生産するのであれば野菜工場と呼べるが、北欧の花弁、また薬用植物（朝鮮人参など）を生産する場合には、それらを包含すると植物工場と呼称するのが適当である。

2 植物工場とは、その歴史的背景

わが国における植物工場は人工光が主流であり、実用的見地からある意味コストダウンを強いられ、当初理想とした最適な栽培を実現しているとは云えない。太陽光植物工場は後述するがこれからの課題である。しかし、植物工場は、その背景の環境調節や関連する生体計測との関係で、当初は植物科学の根底に係わる最適な環境制御の課題に挑戦してきた。今後の発展のためにも、やや詳しく関連する学術を整理しておきたい。

(1) 近代農学の起源

近代農学は英国、ロンドン郊外のローザムステッド試験場に嚆矢をみたことは、広く知られている。気象条件に左右される圃場では、環境は可制御ではなく、土壌肥料の条件等をパラメータとし、その限りでの最適栽培を実証的に求めて、一步一步栽培に関わる経験を蓄積し、関連データを統計的に解析し、近代農学を確立してきた。時々刻々と変化する気象条件は試験区に共通に作用するので、制御できないがコンペンセーションの原理により、相殺された。この流れは、基本的には20世紀中葉まで変わらなかった。換言すれば、種子（育種）と環境（気象、土壌「イオン・アップテーク」）が栽培（農業生産）の決定要因であるが、種子と土壌に比重を置き、すなわち、環境のうち扱いの難しい気象は、上述のように「相殺」されるべきものか、副次的に考慮すべきもので、気象を含む環境調節に主体を置く農業は、たとえ実利は認められても、科学的なアプローチの対象とする学術として扱うには困難を伴う、と考えられてきた。

(2) 環境調節による植物生理生態の機能開発

第2次世界大戦後に、温度・湿度等の基本的な環境要因を制御し、植物の生理生態の機能を実験する装置として、ファイトトロンが米国ロサンゼルス郊外パサデナ市のカリフォルニア工科大学に出現した²⁾。同大学のウェント教授がこのファイトトロンを利用し、トマトの生育に最適な温度環境があることを発見した。環境要因と栽培植物の生理生態に関わる厳密な学術成果であり、環境は副次的存在ではない、と世界中に大きなインパクトを与えた。環境を遺伝子と共に主役として扱い、植物科学をパラダイムシフトする道具（システム）としてファイトトロンは世界中にその存在感を明示した。

複雑な環境を要素還元した単純な制御環境条件下で植物の科学は大幅に進歩した。この新しい環境要因を重視する学術を1964年オクスフォードで開催の国際会議で公的にファイトトロニクスと称した²⁾。しかし、多くの環境要因を包含する複雑な気象をファイトトロンで再現しようとし、人工気象室へ向ったが挫折することとなる。

暗黙知に言及するまでもなく、気象は階層の高い複雑な物理学そのものであり、それを人工的に制御することは難しく、しかもその環境条件で不確定要素の多い植物体（ホール・プラント）の生理生態を解明しようとしても、得られた結果はバラツキが大きく、何が解明されたか不明な、いわば五里霧中をさまよう科学と評された次第であった。なお、日本生物環境調節学会は、1962年わが国の全国の主要大学のファイトトロンの研究開発を目途に結成された。オランダのワーゲニンゲン園芸試験所にもカリフォルニア工科大と同型のファイトトロンが建設²⁾されたが、オランダ自慢のグリーンハウス「太陽光植物工

場」に多大の影響を与えたものと思われる。

(3) 植物生理生態の計測と最適環境条件

1970年代、米国デューク大学理学部が中心になり、新たな動きが出始めた。複雑な気象条件の造成は避け、温度、湿度、CO₂ガス濃度、光量子、イオン・アップテーク等の限定された環境要因を厳密に制御した環境条件下で、植物の生理生態のダイナミクスを解明する新たな方法論に着手し、世界から注目された^{3),4)}。これを、第2世代のファイトトロニクスと称すると、従来種と土壌に加うるに、新たに上記のような環境条件が植物の生理生態に大きな影響を与えることを学術的に解明した。すなわちCO₂吸収、気孔抵抗、水ポテンシャル、転流速度等を非破壊計測し、動的な生理生態の挙動が解明された。「植物生体計測」の台頭と、その重要性が広範に理解され、作物の機能開発に大きく貢献することが認められた。この研究領域は、理学を中心に進展したが、裏を返すと、応用分野における最適栽培の根拠そのものである。ここに至って、農学の論理は「環境を積極的に活用することによって作物の生理機能の開発、すなわち最適栽培への手がかりが得られた」と修正せざるを得ない。なお、九州大学生物環境調節センターの多くの研究成果も、この流れに沿うものと、高い評価を得ている^{2),5)}。

(4) 人工光植物工場の出現

デューク大学と同類の論理で、独自に開発した質量分析計を中心に生体計測を実施し、温度、湿度、光の最適条件等を推測し、葉菜類の生育速度を飛躍的に高めうることを実証し、野菜を最適栽培するシステムを開発した。これが日立製作所中央研究所で開発され、世に知られた人工光植物工場の誕生の本質である。まさに開発の時点では欧米に匹敵する学術的根拠のある環境調節システムで最適条件にピントを当てており、その論文は、後述の日米セミナーにも収録されている。応用を見越して「植物工場」と命名されたが、それに値するものであった⁶⁾。全盛期に至った物造り国・日本における約30年前の先端工学と農学との融合で、その可能性にマスコミが注視したのは言うまでもない。

しかし、実用化の段階では、上記の実験室でのみ使用できた高度な生体計測は実施不能で最適栽培の夢は消え、外気と完全に遮断した環境条件下における準最適条件として、水耕（養液）栽培で、一定に空気調和された温湿度と一定の光強度を照射する光源で栽培する安易な栽培システムにスケールダウンせざるを得なかった。

しかも、人工光植物工場は規模は小さく栽培作物も葉菜類に限られており、省エネや地球温暖化が云々される現時点では、難しい状況下に置かれている。しかし、実用に供されている人工光植物工場は、環境調節の視点から見るとシンプルに環境条件を還元した準最適条件下での効率的な周年生産システムであり、パラダイムシフトの先行事例として、その存在価値（レイゾン・デイトル）は決して小さくはない。

(5) 植物工場の国内学術振興

当時のビニールハウスを用いた施設園芸とは全く異次元の発想のこの新技術を擁護し、発展させるために、1989年に日本植物工場学会が創設された⁷⁾。（社）計測自動制御学会、日本生物環境調節学会の支援を得て類を見ない農工

融合の学会が出現した⁸⁾。しかし、工学面に比べ、農学の論理や現代生物学の本質である遺伝子や細胞生理学に関する総合的学術を積極的に導入するまでには至らず、残念ながら農学（生物学）専門家の継続的な興味の対象にはなり得ず、足踏みする結果を招いた。

(6) 北欧における太陽光植物工場の振興

西欧（当初はオランダ、ベルギー等）では1棟が1ヘクタールを超えるグリーンハウスにおける園芸作物の栽培が盛んであった。その園芸学は西欧を拠点とする ISHS（国際園芸学会）が強力に支えていた。この分野に、工学技術の革新の波が押し寄せ、その環境制御がコンピュータで自動制御するシステムに変貌した。太陽光植物工場といえる存在が、一層その威力を世界に示し始めた。充実した園芸学の専門家に加うるに機能工学を守備範囲とする計測・制御工学や農業工学の専門家とが協力し合い、関係する研究領域と研究者が暫時拡大することとなった。

1980年代から、西欧に拠点を置く国際自動制御連盟「IFAC（International Federation of Automatic Control）」が ISHS の補完的な役を担い始め、輪がさらに広がることとなった。IFAC は 1970 年代から日本学術会議が参加している由緒ある国際学術団体である。

(7) 国際学会 IFAC（国際自動制御連盟）の動向

システム制御面は、IFAC に 1990 年に農業工学に関する TC（技術委員会）が設置され、翌 1991 年に第 1 回の国際ワークショップがわが国（松山市）で開催された。IFAC 主催・ISHS 共催の国際会議であり、太陽光植物工場に関する北欧・西欧の主な研究者を招待し、国際的に大きな反響を呼んだ⁹⁾。IFAC 全体のわが国の受け皿は日本学術会議であるが、これを契機とし、狭い農業分野の IFAC・TC の活動の受け皿は日本生物環境工学会が引き受けた。

この会議は関連学術を大きく振興した。植物工場における作業の自動化¹⁰⁾、種苗生産の工場化¹¹⁾、植物工場に中心を置く農業の知能化¹²⁾へと一気に拡大した。ここまでは将に日の出の勢いと云えた。しかし、研究室における興味深い学術成果も当時の太陽光植物工場に適用するには、計測機器の限界もあり、他方、わが国には、植物工場の環境制御も、本来のシステム制御やその方法論に基づく最適栽培を試行・検討する実システムも無く、意欲的な活動に至らず、沈滞の 20 年へと連なった。

3 植物工場普及に向けた現状とこれからの学術のあり方

(1) 愛媛大学植物工場研究プロジェクトとスピーキング・プラント・アプローチ (SPA)

第19期の対外報告書に誘発され、四国地区国立3大学が協力し、愛媛大学に拠点機能を目的に「植物工場研究プロジェクトチーム」が発足した¹³⁾。対外報告書の趣旨に基づき、太陽光植物工場の知能化に必要な技術形成の研究並びに技術者養成に関する普及を目指している。幸い、平成19年度の経済産業省「地域新生コンソーシアム研究開発事業」で植物工場のモデルシステムを立ち上げる資金を得て、農学部構内に小型(500m²)の太陽光「知的」植物工場を設置し、続いて平成20年度の経済産業省「地域イノベーション創出研究開発事業」、平成20~22年度JSTの育成研究の採択で、研究開発の予算規模も飛躍的に拡大し、四国地域における太陽光植物工場研究の拠点形成が実現しつつある。愛媛大学植物工場プロジェクトが現在指摘している最も重要な成果^{14),15)}は、要旨で強調したSPAの役割であるが、次節で取り上げたい。その後、幸運なことに、経済産業省と農林水産省の農工商連携プロジェクトが植物工場プロジェクトを立ち上げ、平成21年8月に経済産業省の「先進的植物工場施設整備費補助金」に採択され、また、平成22年1月には農林水産省の平成21年度「モデルハウス型植物工場実証・展示・研修事業」に採択された。両省の農工商連携プロジェクトは、後に述べるが、愛媛大学の他に大阪府立大学、千葉大学を加え、拠点3大学の他にも若干の研究機関にも実証研究の機会を支援しており、今後の成果が期待される。

(2) 植物工場の目指す環境制御型農業を育てる学術環境の整備

環境調節の積極利用で農の論理を拡大し、植物工場が食料生産における重要な役割を担うであろう見通しは前述した。しかしわが国の工業分野における今日の日覚しい成果(デバイス)を部分的に活用し、見た目にはエンドレスの発展を期待させるが、体系的な技術に立脚する全体像の展望は示せず、他方、農学的視点では栽培作物は少数で、高品質・多収穫への道も期待が薄い。さらに、地方への展開も限られ、現状では新たな食料生産の主役としての期待観とは大きく乖離しており、見直しが急務である。

西欧に見る太陽光植物工場は、農業の価値観には沿うものの、1ヘクタールを超える巨大なグリーンハウスを林立させる広大な土地や巨額な資本を前提とし、現在のわが国の農村のシステムでは直ちに実現することは難しい。また気候的に亜熱帯のわが国では、北欧の環境調節を表面的に真似しても無意味である。最も重要なことは、彼の地の様々なコンサルタントが、驚異的な高品質・多収穫を実現したケース・スタディーに注目し、得られたデータ(事例ベース)に基づきコンピュータに極秘ノウハウとして組み込んでいる「栽培作物と環境調節に関するある種のエキスパート・システム」が農業生産における驚異的な成果をもたらす原動力であり、表面的な模倣では無意味である。何れも技術開発の本質に関わる重大な課題を抱えている。今なすべき課題は、第2世代のSPAで明らかにされる〔太陽光〕植物工場における環境条件と生理生態の応答関係を同定し、オランダに見られるような農業を革命するコンピュータ制御の芽を大きく育てる学術的な環境の整備であろう。

4 生体計測、SPA、そして最適栽培のプロセス制御へ

(1) 植物生体計測¹⁶⁾

植物生体計測とは植物体 (whole plant) の生理生態に関する主として非破壊で連続 (動的な特性を把握できる程度のサンプリングによる非連続を含む) な情報の計測を称する。一般に、植物は根から水や養分となるイオンを吸収し、葉面に分布する気孔を開閉し、外気に含まれる CO₂ ガスを吸収し、光量子の作用で光合成産物を生産する。これらのプロセスに介在する、例えば気孔開閉に関する要因としては、気孔抵抗、CO₂ uptake、水ポテンシャル等の物理量が挙げられ、また化学内生物質 (ABA、サイトカイニン etc.) も関与する。これらを計測すれば、時系列における生理生態が推定できる。生育状態を診断し、最適制御に必要な生体情報の取得するための計測と云っても良い。

(2) 光合成産物の動特性の解明と最適栽培への期待

簡易な計測から複雑な計測まで多くのものが、最適制御の基礎として必要とされるが、高度な計測の例を紹介する。光合成に関わる入力として CO₂ ガスを、また出力として光合成産物を対応させるシステム同定、すなわち光合成の動特性が Duke 大学で解明された。半減期の短い C¹¹ を植物体を収容したグローブ・チャンバーに短時間で供給するため、隣接の物理学科に小型サイクロトロンを設置し、放射線化学の専門家と共同でラベリングされた C を葉面から吸収させ、生成された光合成物質に含まれた C¹¹ を植物体の異なる部位に設定された数台のガイガーカウンターで追跡し、動特性を明らかにした¹⁶⁾。この研究は数大学を巻き込む大プロジェクトで実現した。

(3) 生体情報を活用する環境制御 (SPA)

植物の生理生態には日変化がある。太陽光植物工場は人工光植物工場に比べ、環境制御が難しいが、農の論理に沿う形での植物本来の可能性に沿う運用ができるので、その本質的な発展の可能性は大きい。葉面に分布する気孔を例にとると、朝は夜露を引用するまでも無く、葉面には十分な水分が保持され気孔は水欠乏の状態ではない。太陽光の日差しが強くなると、光合成が活発化し、蒸散と引き換えに、外気から CO₂ を取り込むため、気孔の孔辺細胞が水分欠乏になり、気孔は閉じることとなる。「晴れの日には昼前に作物の光合成は昼寝する」とは栽培の専門家から良く耳にするが、上記の生理生態の特性で容易に説明されよう。環境調節の見地からは、気孔が閉じる時間帯には給水し、再度光合成活動を活発化させる必要がある。この立場では、温度よりも湿度の調節が重要であり、厳密に全てを一定値に制御する必要は無い。環境調節は植物の経時的な日変化や突発的に変動する外気からの影響等を観測し、その特性を診断することが重要である。この植物生体情報を活用し、生育状態を診断し、その情報に基づく環境制御を「第一世代」の SPA (speaking plant approach to environment control) と称する¹⁷⁾。

(4) 第二世代の SPA と SCA への期待

「第一世代」の SPA の基礎理念は、およそ四半世紀を経た今日、時代に即した新鋭の計測機器を用いて研究成果を挙げ始めた愛媛大学等の「第二世代」へバトンタッチされ、注目され始めた。具体的な植物生体情報には、植物のカラー画像、熱画像 (葉の温度)、クロロフィル蛍光画像に新規性があり、光合

成速度、蒸散速度などは従来と同様である。太陽光知的植物工場でトマトの長期多段栽培を行いながら、SPAの研究を行い、①光合成機能の診断が可能な「クロロフィル蛍光画像計測システム」、②蒸散機能の診断が可能な「葉温測定システム」、③水ストレス状態の診断が可能な「投影面積測定システム」、④生育状態の良否や栽培管理の適否を判断できる「3次元植物形状・葉面積測定システム」などに実績を挙げている。クロロフィル蛍光画像計測では、病虫害の早期検知も可能となりつつある。

植物生育診断結果に基づいてどのような環境制御を行うかについての判断を行うのに必要なのが、究極には「知識ベース」であるが、それ以前の「事例ベース」と環境制御に係わるコンピュータのソフトをオランダを目標にどこまで開発・研究ができるかが、わが国の植物工場研究の重要な課題と云えよう。さらに、21世紀に期待される生物学は、個体から細胞へと進み、SPAには分析化学的な生体情報への要望が生じている。植物工場に関する前述のSPAに対比させてSCA (speaking cell approach)¹⁴⁾と称するなら、実験室における植物体での基礎研究が望まれ、今後に大きな期待が寄せられよう。

5 植物栽培プロセスへのシステム科学的なアプローチ

(1) 植物工場における高品質・多収穫を目指すには

21世紀の今日、わが国の太陽光植物工場は西欧のそれに比較すると多くの面で大きな遅れが見られる。一層の発展を期待するには、イノベーションをどこに求めるかについて、抜本的で、なお俯瞰的な学術に立ち返っての審議を行うことが肝要であろう。

まずハイテクの根底の学術的課題の再検討が避けて通れない。既に学術的課題については最近でも著書^{18),19)}や記事²⁰⁻³⁰⁾として陸続と報告されているが、トマト栽培に例をとっても、なぜオランダの高品質・多収穫な栽培に大きな差をつけられているかについては、明確な処方箋が示せていない。

確かに、「デバイスかシステムか」あるいは「材料かエネルギーか」、いずれかにポイントを置き、技術開発を達成してきた分野が多く、それらの組み合わせも、従来の延長上に連続的に付加させてきた分野が多い。しかし、植物工場においては、農学における材料やエネルギー、あるいは工学におけるデバイス等の潜在力よりも、全く縁遠い「システム」に依存する度合いが強いことを、オランダ等の驚異的な生産力は暗示している。北欧に比肩させ、更に一層発展させるには単なるデバイスの改善ではなく、農業分野では全く苦手なシステム科学を基本からフォローし、開発する必要がある。

すなわち、従来の農業分野に馴染みの薄かったコンピュータを用いたシステム制御を避けては通れない。そしてそれを効果的にするのが SPA と云えるであろう³¹⁾。

(2) 最適栽培を実現する上で必要な生物学とシステム科学の複合化

前例のオランダにおけるトマト栽培に例をとっても、オランダとわが国の太陽光植物工場生産される農産物の高品質・多収穫における大きな格差は、環境条件と作物との相互作用を繰り返した本質的な環境制御に起因している。もともとオランダのワゲニンゲン大学ではシステム科学の専門家の発言力が強く、IFAC活動で一般論に花が咲いた頃もあった³²⁾。その後、栽培に関するシステム化は一般化が困難、言い換えれば栽培作物により、栽培ステージにより、知識化が無理であり、事例毎に対応が異なるいわゆる事例ベースが妥当であるとの共通認識に至っている。それら各論はソフトウェアに係わる企業秘密のヴェールで覆われ、わが国には漏れて来ない。このような事例ベースに係わるノウハウを我が国の個々の拠点大学で、栽培作物毎に開発する必要がある。

すなわち、何回か繰り返すが、生物学とシステム科学の両面に深く関わる基本的な学術を徹底的に洗い直し、基本的な課題を集中的に解明し、ノウハウのベースを構築することであろう。単純な栽培に限られる人工光植物工場では必要がなかったとしても、今後期待されるわが国の太陽光植物工場に関しては、このシステム科学に基盤をおく一連の情報技術に大きな遅れが指摘される。一刻も早く異分野（植物・園芸分野ならびにシステム制御分野）の技術者・研究者の領域を超えた協力が必須である。さらに、今世紀に入り、一層進展が著しい生物学的なバックグラウンドを多面的に取り込んでいくことが重要であろう。

(3) 栽培プロセスの環境制御ならびに知能制御^{33), 34)}

植物栽培プロセスは多くの環境要因を複雑に調節〔環境制御〕するので、システム科学的なアプローチからの検討が必要であり、実システムを用いた動特

性の把握やモデリングが必須である。しかし、従来、わが国の植物工場では、全く重視されていない。

植物生体情報の計測と情報処理に基づく栽培プロセスのシステム同定やもろもろの環境条件の重み関数（線形フィルタリング）の推定等に基づくシステム科学的な検討こそが基礎として把握しておかれるべきである。

フィードバックがシステム制御の基本であるが、実際の植物工場における栽培プロセスの環境制御では、実際は植物の状態や外気の環境条件等が変動し、知能的制御を検討し、構築することが必要であろう。

図-1のように下層に示すフィードバック制御は、目標値に忠実に追従する機能である。他方、上層の知能的制御は「柔軟な決定や最適化」を行なうもので下層のフィードバック制御系の目標値設定など柔軟なシステム制御を司る。

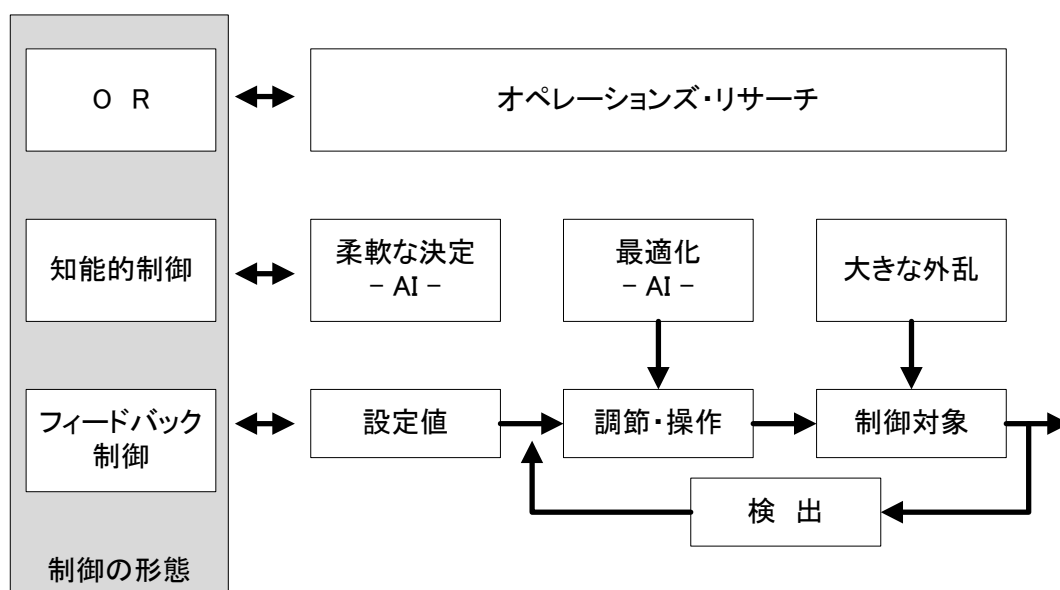


図-1 フィードバック制御と知能的制御

6 最適化、知能化の視点と次世代植物工場

(1) 最適化問題としての植物工場の環境制御

太陽光植物工場では地域固有の気象資源を有効に活用・考量して最適な環境制御を行わなければ植物の生産性を向上させることは難しい。ましてヨーロッパで現在注目されている植物生産に加えてエネルギーや水回収も狙った植物工場の場合、システムはさらに複雑になり、実用化に向けた課題は多い。このようなシステムの場合、多目的最適制御理論を導入しないと適切に動作しない。太陽光植物工場では、この複雑なシステムに加え、地域の自然環境を把握したうえで植物工場内環境を合理的に制御することが要求され、極めて高い技術を有したオペレーションが必要である。たとえば、図-2は太陽光植物工場の環境制御系を示している。下位階層に環境制御のフィードバック系（FB Control）が構成されているが、植物工場内の状態ベクトルは x_g 、植物の状態ベクトルが x_p であり、制御量 y_g は制御可能な温度、湿度、 CO_2 などが要素となる。当然 Supervisor rules から目標制御量 y_g^{sp} が出力され、この目標制御量は x_p, y_g の要素である生育ステージ、生育量、日射量、外気温などを考慮して決定するものである。ここ

で重要なことは、物理量として観測される制御量 y_g は、最適レギュレータ (Linear Quadratic Regulator, LQR)、ニューラルネットワーク (Artificial neural network, ANN)、ファジーロジック (Fuzzy logic, FL) などの制御理論で対応できるが、上位階層に位置づけられる作物 (Crop) の状態観測は人 (Grower) が行い、ルールベースの意思決定支援システムの下で適切な目標値設定がなされることである。すなわち、人が上位階層のフィードバック制御系の構成要素になっているのが現状である。太陽光植物工場による食料生産を工業化・産業化するためには非接触なセンシング技術によって植物生体の状態を検出して、検出データに基づいて最適な環境状態を探していくことが要求される。その点で上述の SPA の概念はセンシングとそのデータベースから「知恵」、「知識」を抽出して知識ベースに展開することができ、まさに知識の可視化であり植物工場の知的制御に直結する。

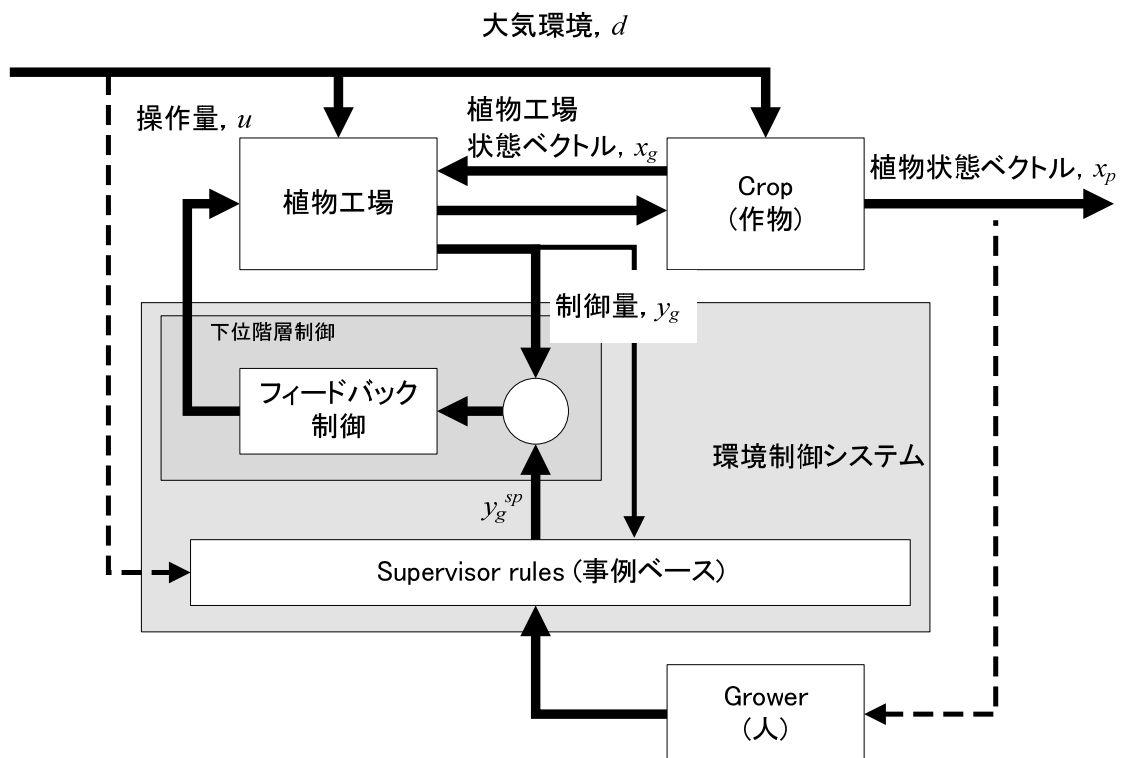


図-2 植物工場のシステム制御

(2) 植物工場知能化の本質

知能化というのはナレッジマネジメントであり、具体的な方法としては知識ベースの生成である。知識ベースは“経験や勘に基づき言葉などで表現が難しい知識”である「暗黙知」と“言葉や文章、数式、図表などによって表出することが可能な客観的な知識”である「形式知」で構成される栽培技術を包括したデータベースに他ならない。この知識ベースは農業という産業に対して新規参入や企業化において、きわめて貴重な技術パッケージとなる。しかし、太陽エネルギーを使用した生産システムでは精度の高い知識ベースの構築は難しい。特に植物の生理生態情報といった観測誤差を含んだデータからデータマイニングなどによって知識ベースを構築した場合、不完全な知識を含むことも予想され、知識ベースの信頼性と完備性に対して保証が得られない。さらに、年

間の栽培回数が露地栽培で年2回、太陽光型植物工場でも年5回程度であり、気象条件の自由度からすると、実際の環境・植物生育のデータが取得できる回数は極めて限定的である。すなわち、データに基づく知識ベースの構築は決して簡単ではない。そのためには知識ベースの範囲と必要機能の体系化を篤農家（エキスパート）や研究者の既存知識（prior knowledge）から十分に分析・認識する必要がある。すなわち、知能システム的设计段階から園芸学分野の知識（ドメイン知識; domain knowledge）を活用することが必須である。図-3は上述の視点で太陽光植物工場のインテリジェント化に向けたナレッジマネジメントをブロック図にまとめたものであり、次世代の知能化技術として期待される構造である^{27), 34)}。図-3では図-2のGrowerとSupervisor rulesがインテリジェントシステムに置き換わっており、インテリジェントシステムから出力される目標制御量は図-2同様、温度、湿度、CO₂などの環境要素である。図-3では人間であるGrowerをシステムに含まず知識創造システムという人工物だけで構築するところに知能化としてのポイントがある。知識創造システムは上述の通りデータマイニング機能を備えたリレーショナルデータベース（知識ベース）である。これらの学術研究を推進して、全く効率的な植物工場のあるべき理想像、すなわち「次世代植物工場」像に結び付ける必要がある。このような知能的制御手法が確立したとき、農業や植物工場に無縁な一般市民の雇用機会が拡大することはいうまでもない。

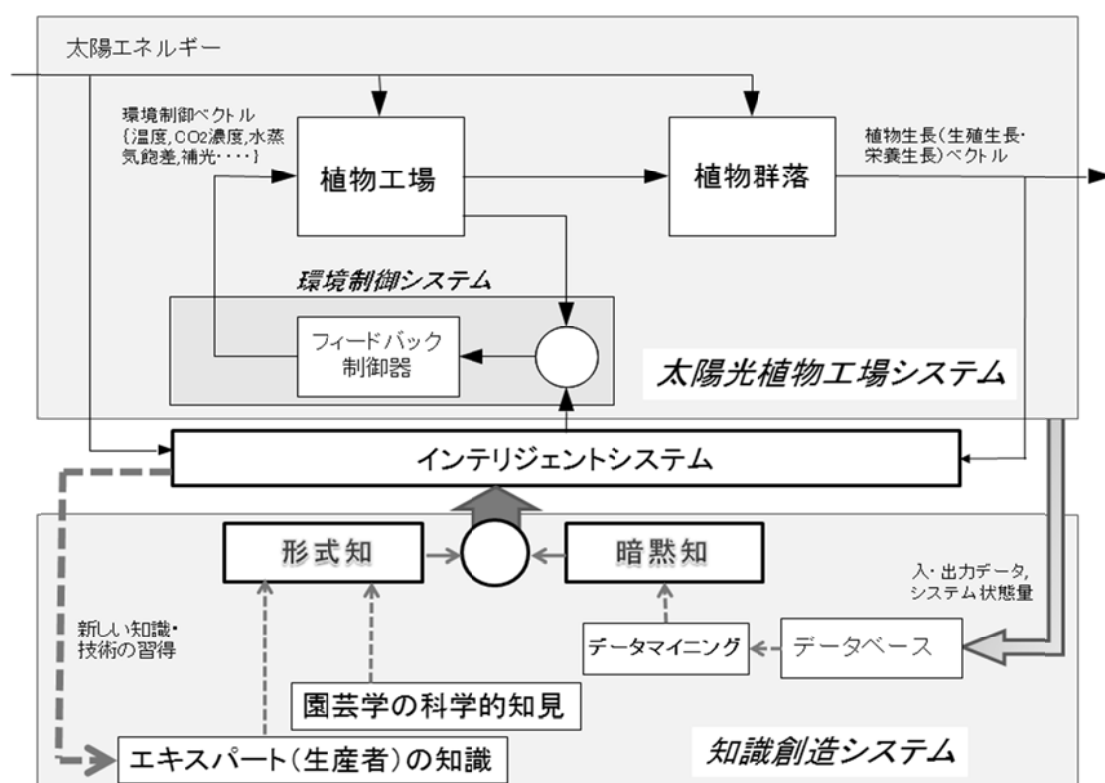


図-3 太陽光植物工場のインテリジェント化に向けたナレッジマネジメント

(3) 次世代植物工場を担う研究者・技術者の育成

現在、全国の大学における農学教育体制は多様化しかつ個性化しており、農

学が基盤とすべき教育課程も不明確になりつつある。日本学術会議第 20 期農学教育分科会の対外報告書³⁵⁾では農学は今後、従来の個別専門領域の深化を追及しつつも、課題対応型の教育プログラムを導入整備する必要があるとしている。この課題対応型の教育プログラムとして「次世代植物工場」は取り組むべき課題であろう。「次世代植物工場」は生物学と工学の融合を高度に進めた学際・複合領域であり、さらに SPA や植物－環境複合系のモデリングと制御、さらにシステム最適化・知能化といった学問分野が重要となるが従来の農学系教育プログラムではほとんど教育されていない分野である。また、現在農商工連携プロジェクトとして行政から支援されている植物工場プロジェクトにおいても人材育成・研修は重要な任務である。この植物工場プロジェクトでは参考資料 1 にみられるように植物工場の情報化・システム化・自動化を重要な課題に据えている。今後、日本生物環境工学会のような植物工場と関連する学協会が中心となり次世代植物工場を担う研究者・技術者のための教育カリキュラムと教科書など教材の整備を行うことが不可欠である。

7 おわりに³⁶⁾ —植物工場への若干の期待

オランダでは、グリーンハウス・ヴィレッジ (Greenhouse-Village) とよばれる植物工場と住宅がセットになったコミュニティの形成が計画されている。温室内に溜まった夏季の高温を利用して、地下深くの帯水層に蓄熱を行うとともに、もっと深いところの帯水層の冷たい地下水を地上に汲み上げて夏季の冷房への利用、逆に、地下水に蓄熱された温水の冬季利用など、新たな代替エネルギー源の開発研究を植物工場に取り入れている。温室の熱の利用を住宅の冷暖房と組み合わせ、さらに、生活排水の再利用水を温室に灌水するシステムを導入し、水の有効利用、炭酸ガスの有効利用を計画している。水利用の効率をさらに高めるため、太陽光利用型でありながら、温室を完全密閉形にし、水の再利用を図るウォータジー・グリーンハウス (Watergy Greenhouse) が考案されており、さらなる水資源利用の効率化を模索している。

SPA は植物生体計測を利用するシステム制御の概念として太陽光植物工場の推進力としてより幅広い応用が見込めるが、次なる展開としては細胞レベルでの分子情報を取り込んだダイナミックな最適制御法 (SCA) の開発が望まれよう。植物が低温、高温ストレス、水ストレス環境に適応するときには、細胞体積を維持するために浸透圧調節機能が働く。ストレス応答に適応するために要する時間、ストレス感受性の分子機構の解明が必要であり、無駄のない環境制御を行うためには、自動生体計測を取り込んだ次世代植物工場の開発が期待される。SCA は環境応答に対応した遺伝子発現に視点を置いて、線形システム制御の一種と捉えることができる。言い換えると、環境応答に関するメタボロミクス研究であり、細胞内での代謝を DNA レベルから代謝物まで連続した反応として扱う。環境応答を制御する代謝物の濃度を制御入力に見立てると、植物工場における $H\infty$ (エイチ・インフィニティ) 制御理論を導入することで、 $H\infty$ 制御³⁷⁾ と SCA を結びつけ、作物の収量・品質の最適化、植物工場のエネルギー消費の効率化に結びつける展望も必要であろう。

世界の人口は 2050 年までに 91.5 億人に達するとの予測がある。食料供給が深刻となり、植物工場への要望が多様化するであろう。人は一日あたり 2~4 リットル水を飲むが、食料を生産するための水を含めると、一日あたりベジタリアンで 1000 リットル、肉食を中心とすると 5400 リットルの水を必要とする。コロンビア大学の D.デポミエは、高層ビルを利用しての植物工場による食料問題の解決法について提唱している。試算によると、マンハッタンの高層ビルを植物工場化し、作物栽培用に当てると、水の確保も含めて、地球レベルでの食料問題の解決法が見出せるのではないかと希望的観測を述べている。

<参考文献>

- 1) 日本学術会議 19 期農業環境工学研究連絡委員会：気候変動条件下および人工環境条件下における食料生産の向上と安全性、「日本学術会議第 19 期対外報告」、生物環境調節 43(3)(2005)
- 2) 日本生物環境調節学会編：生物環境調節ハンドブック、東京大学出版会、(1973)
- 3) 橋本：植物環境制御入門、オーム社(1987)
- 4) 橋本：バイオシステムにおける計測・情報科学、養賢堂(1990)
- 5) 大政：知能的太陽光植物工場の新展開 (11) アグリバイオイメージングの新たな展開、農業および園芸 85(11)(2010)
- 6) 高辻：完全制御型植物工場、オーム社(2007)
- 7) 日本植物工場学会編：ハイテク農業ハンドブック、東海大学出版会(1992)
- 8) 日本農学会編：日本農学 80 年史 (日本生物環境工学会：第 40 章)、養賢堂(2009)
- 9) Y. Hashimoto and W. Day (eds.): Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture, Pergamon Press, Oxford, UK(1991)
- 10) 橋本編著：グリーンハウス・オートメーション、養賢堂(1992)
- 11) 橋本・高辻・野並・高山・古在・北宅・星：植物種苗工場、川島書店(1993)
- 12) 山崎・橋本・鳥居編著：インテリジェント農業 (自動化・知能化)、工業調査会(1996)
- 13) 仁科・田中・石川・松岡：知能的太陽光植物工場の新展開(3)拠点の先行例と技術形成・教育、農業および園芸 85(3)(2010)
- 14) 高山・野並：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)(2010)
- 15) 仁科：太陽光利用型植物工場の知能化のための Speaking Plant Approach 技術、学術の動向(6)(2010)
- 16) Y. Hashimoto, P.J. Kramer, H. Nonami and B.R. Strain (eds.): Measurement Techniques in Plant Science: Academic Press, San Diego, USA (1990)
- 17) Y. Hashimoto: Recent Strategies of Optimal Growth Regulation by Speaking Plant Concept (*invited presentation*). Acta Horticulturae Vol. 260 (1989)
- 18) 古在：太陽光型植物工場、オーム社(2009)
- 19) 池田：植物工場ビジネス、日本経済新聞出版社(2010)
- 20) 野口・橋本：知能的太陽光植物工場の新展開(1) はじめに、農業および園芸 85(1)(2010)
- 21) 池田：知能的太陽光植物工場の新展開(2) わが国における太陽光植物工場の現状と今後への期待、農業および園芸 85(2)(2010)
- 22) 今井・川満・上野・近藤：知能的太陽光植物工場の新展開(4) 亜熱帯拠点の課題、農業および園芸 85(4)(2010)
- 23) 有馬：知能的太陽光植物工場の新展開(6) 植物工場のロボット活用例、農業および園芸 85(6)(2010)
- 24) 羽藤・森本：知能的太陽光植物工場の新展開(7) 知能的システム制御、農業および園芸 85(7)(2010)
- 25) 村瀬：知能的太陽光植物工場の新展開(8) 国家事業としての植物工場普及策と未来の予見、農業および園芸 85(8)(2010)
- 26) 田中・位田・吉田・奥田：知能的太陽光植物工場の新展開(9) 園芸技術の

- 形成と植物工場、農業および園芸 85(9)(2010)
- 27) 野口：知能的太陽光植物工場の新展開(10) 情報化・インテリジェント化の視点、農業および園芸 85(10)(2010)
- 28) 清水・鳥居：知能的太陽光植物工場の新展開(12) 全自動植物工場へのアプローチ、農業および園芸 85(12)(2010)
- 29) 古在：知能的太陽光植物工場の新展開(13) 省資源・環境保全と高収量・高品質を両立させるサステイナブル植物工場、農業および園芸 86(1)(2011)
- 30) 後藤・丸尾：知能的太陽光植物工場の新展開(14) 千葉大学における太陽光利用型植物工場の技術開発と実証事業、農業および園芸 86(2)(2011)
- 31) 橋本：「環境調節をどう考えるか」太陽光植物工場の今後を考える、植物環境工学、21(2)(2009)
- 32) Y. Hashimoto, G. P. A. Bot, W. Day, H.-J. Tantau and H. Nonami: The Computerized Greenhouse, Academic Press, San Diego, USA(1993)
- 33) Y. Hashimoto, H. Murase, T. Morimoto and T. Torii: Intelligent Systems for Agriculture in Japan, IEEE Control Systems Magazine 21(5) (2001)
- 34) 橋本・野口・村瀬：知能的太陽光植物工場の新展開(15) 提言に向けての課題の整理、農業および園芸 86(3)(2011)
- 35) 日本学術会議生産農学委員会農学教育分科会：農学教育のあり方、「日本学術会議第20期対外報告」(2008)
- 36) 野並：植物工場、学術の動向(12)(2010)
- 37) J.R. Leigh: Control Theory (2nd edition), The Institution of Engineering and Technology, Michael Faraday House, UK (2008)

<参考資料1> 農工商連携プロジェクトにおける植物工場の取り組み

(1) 行政支援の拠点 3 大学の植物工場プロジェクトと琉球大の今後の研究計画

大阪府立大学、愛媛大学、千葉大学に拠点の植物工場プロジェクトが発足し、琉球大学に地域 ICT (Information and Communication Technology) 利活用広域連携事業が発足した。これらのプロジェクトにおける今後の取り組みについて紹介する。

① 大阪府立大学

大阪府立大学植物工場研究センターは、学際的で分野横断型研究組織である大阪府立大学 21 世紀科学研究機構に位置づけられ、大阪府環境農林水産研究所と連携し、さらに植物工場ビジネスを志向する企業群からなるコンソーシアムによって支えられている。全学的な研究活動のみならず、大学の教育・研究の蓄積を活用し、全学の広範なカリキュラムやオリジナルな研修プログラムを通じて、植物工場を運営していくための技術者および経営マネジメント人材の養成も可能である。

大阪府立大学植物工場研究センターは、都市域の多くの中小製造業が人工光植物工場へ新規参入が容易なように、人工光型植物工場に特化している。経済産業省事業では、人工光型植物工場 8 ユニットからなる総床面積 1000m² 鉄筋コンクリート 2 階建ての研究施設が整備されている。農林水産省事業では、同じく総床面積 1000m² 鉄筋コンクリート 2 階建ての研究施設の人工光型植物工場が整備されている。主要ユニットは 15 段の自動化栽培施設が 2 ユニットでレタスおよびコケを栽培する。また、アイスプラントおよびハーブの多段栽培ユニットが設備されている。

大阪府立大学植物工場研究センターの取り組みとして、人工光型植物工場課題となるエネルギー削減を実現することを目指している。エネルギー削減のために、太陽光発電等による環境配慮とランニングコストの削減、LED・CCFL等を活用した光源適用技術の改善、植物の生育情報に基づく SPA による環境制御の実用化、温度・湿度・気流等の不均一性に起因する生産性低下の克服を目指す。さらに、自動株間調整・精密灌水・収穫ロボットの開発による品質向上、亜臨界水処理・メタン発酵等を用いた資源循環システムを用いてのゼロウェイスト、特殊な環境制御が必要な機能性作物などの経済栽培品目の開発に取り組む。

② 愛媛大学

愛媛大学植物工場研究プロジェクトでは、わが国の西南暖地に位置する四国地域における太陽光植物工場研究拠点化を図ってきた。本拠点は、SPA 技術と知識ベース（厳密には、事例ベース）による知的植物工場システムの開発を行う愛媛大学農学部知的植物工場基盤技術研究センター（経済産業省事業）と、植物工場の普及・拡大を念頭においた地域貢献型施設である愛媛大学社会連携推進機構 植物工場実証・展示・研修センター（農林水産省事業）の 2 つのセンターで構成される。

ア 知的植物工場基盤技術研究センター：農学部構内の太陽光利用型知的植物工場 3 棟（500m²、1290m²、150m²）と研究・研修棟（総床面積 600m²）、西条市の太陽光利用型知的植物工場 1 棟（500m²）を有する。研究・研修棟

には、SPAにおける植物生育診断のための様々な計測・分析装置（知識ベース用コンピュータ、クロロフィル蛍光画像計測装置、光合成蒸散測定装置、果実内部品質評価システム、風洞式グロースチャンバなど）が整備されており、隣接する植物工場群とオンラインで結ばれた状態でのSPA技術開発が可能である。西条市植物工場は化学工場敷地内に設置されており、従来利用されていない工場廃熱（200℃の水蒸気）を利用した冷暖房による省エネルギー農産物生産システムの確立を目指す。特に、MH（水素吸蔵合金）冷水製造機（西条市と(株)西条産業情報支援センターが開発）で作りに出した冷水（5℃）を局所冷却や冷房に利用し、夏期の生産性向上を目指す。

イ 植物工場実証・展示・研修センター：愛媛県宇和島市にある県有の公園用地（総面積約 2.2ha）に設置されており、太陽光利用型植物工場4棟（総栽培面積 6800m²）、育苗温室（1400m²）、貯蔵棟（総床面積 330m²）および研修棟（総床面積 400m²）で構成される。栽培品目や栽培方法毎に複数の参画機関によるコンソーシアムを形成し、トマト・キュウリ・葉菜類等の栽培実証試験を行い、西南暖地における栽培技術の確立を目指す。また、それぞれの栽培方法に適した品種の選定を行う。これら全施設を利用して植物工場人材育成プログラムを実施し、SPA技術を習熟した管理責任者などの人材育成を行う。

③ 千葉大学

経済産業省の「植物工場基盤技術研究拠点整備事業」および農林水産省の「モデルハウス方植物工場実証・展示・研修事業」により、植物工場プロジェクトがスタートした。

ア 事業目的

太陽光利用型植物工場と完全人工型植物工場に関して産学官で革新的な技術開発を行い、その成果を植物工場産業へ技術移転し、わが国の施設園芸作物の生産向上、中小企業者の植物工場関連事業への参入拡大、地域経済の活性化に貢献すること。具体的には太陽光利用型植物工場（新規 16 棟）、完全人工型植物工場（既設、改修）を用い、松戸キャンパスに分析・研修棟（育苗室、分析機器室、温室群の制御監視室、研修員室、セミナー室）、柏の葉キャンパスには実験棟（培養室、分析機器室、快適性計測室、研修員室、セミナー室）を設け、技術指導および人材育成を行う。

イ 学術的課題

*生産技術に関して：養液栽培の培養液・循環型養液栽培の制御、作物の生育制御・生育診断、関連するロボット化、並びにリサイクル・収穫物の品質管理・貯蔵・流通等々。

*施設・設備に関して：ハウス部材の低コスト化、・建築関連の資材、装置の合理化、環境制御システム・環境計測センサー等の制御システム面における改善等。

*エネルギーに関して：太陽電池の導入やトリジェネレーション・システム等のエネルギー利用面における改善、自然エネルギー・都市エネルギーの利用、新光源の活用等々。

*運転に関して：環境制御法、CO₂施用、自然光・照明の制御技術、局所冷暖房。

*その他：事業全体に関わる基盤環境としてのエネルギー、資材、作業、経

営分析・診断等に活用できるデータベースと関連ソフトウェアの構築。

ウ 人材育成・研修：千葉県および千葉県産業振興センターの協力を得て研修コースの実施や NPO 法人植物工場研究会の人材育成事業との連携に取り組む。

④ 琉球大学

亜熱帯農業に実績のある琉球大学は、NPO 亜熱帯バイオマス利用研究センターと協同で、地域 ICT 利活用広域連携事業で植物工場の管理・運用システムのための基盤システムの確立に取り組む。地デジ・ICT・植物工場による「データファーム」を社会的弱者の社会参加・地域コミュニティ造りの基盤システムとして、社会的弱者の自立と生きがいの創出、社会との交流や子供の食育などの公共の福祉サービス向上に効果の高いシステムの構築に取り組む。地デジ活用ネットワーク、クラウドコンピューティングシステムを活用しての安定生産のための植物工場管理システムの構築と植物工場を中心とした地域コミュニティ造りを目指す。

(2) 横断型基幹科学技術研究団体連合（横幹連合）の農工商連携と植物工場

(公益社団法人)計測自動制御学会はシステムの計測と制御を中心に発展してきた学会であるが、それらの中心技術は、もの造りに関する製造業に共通する基幹科学技術である。そこで、上記学会が呼びかけ、横断的に基幹科学技術を共通の認識と理解で深化させ社会貢献を目指そう、と学術会議の力を借り組織化したのが横断型基幹科学技術研究団体連合（横幹連合）である。横幹連合は、最近「農工商連携ビジネス」を対象項目の一つとして取り上げ、学会連携による課題解決型研究活動を定めた。植物工場の主力学会である日本生物環境工学会とシステム制御に主体を置く工学系の計測自動制御学会が学会連携により植物工場の課題の研究活動を進めることとなり、今後の動向、並びに学術会議との関連が注目される。

＜参考資料2＞ 分科会およびWG「知能的太陽光植物工場」における審議経過

平成20年11月29日 日本学術会議WG「太陽光植物工場」第1回打合せ会

日本学術会議WG「太陽光植物工場」設立の趣旨説明を行い、WGを発足させる方向で検討する打ち合わせを行った。

平成20年12月25日 農業情報システム学分科会（第21期・第1回）

橋本委員からWG「知能的太陽光植物工場」の設置提案があった。WGの背景、目的、活動内容などについて詳細な説明があった。また古在委員からも本WGの社会的ニーズについて説明があり、審議の結果、設置することにした。

平成21年3月11日 農業情報システム学分科会（第21期・第2回）

WG「知能的太陽光植物工場」から報告があった。池田英男WG委員からオランダグリーンハウス・フォーティカルチャーを例に実践的なScience Agricultureの必要性が述べられた。古在豊樹委員からは「総合環境制御の新しい考え方」を、橋本康委員からは今後のWGの進め方について報告があった。園芸と工学の融合が次世代の太陽光植物工場には不可欠であることを再認識すると共に、平成21年7月3日（金）に関連シンポジウムを日本学術会議において開催することが決まった。

平成21年3月14日 日本学術会議WG「太陽光植物工場」第2回打合せ会

日本学術会議WGのシンポジウムの申請書に関して原案を審議し、提案書を確定した。

平成21年7月3日 農業情報システム学分科会（第21期・第3回）

1. 分科会WG「知能的太陽光植物工場」について、午後のシンポジウムについて紹介。
2. 話題提供／古在豊樹委員「なぜ、自然光（太陽光）植物工場なのか？
－その課題と展望－」

平成21年10月2日 農業情報システム学分科会（第21期・第4回）

1. 橋本康WG幹事からWG「知能的太陽光植物工場」の活動状況について説明があった。提言（対外報告）の骨組みとなる原稿をWG委員が中心となって執筆を進め、「農業および園芸」（養賢堂）にシリーズとして掲載することが提案され了承された。
2. WG「知能的太陽光植物工場」からシンポジウム「植物工場における自動化・情報化技術の展望（案）」の開催提案があった。今後、WGにおいて企画案を再検討し次回分科会で幹事会向けの提案書を審議することになった。

平成21年12月17日 農業情報システム学分科会（第21期・第5回）

1. WG「知能的太陽光植物工場」が取り組んでいる「農業および園芸」（養賢堂）の連載状況について橋本康委員から報告があった。
2. シンポジウム「植物工場における自動化・情報化技術の展望」の開催案について審議した。原案通り開催することを決定した。今後幹事会への提案

手続きに入る。

平成 22 年 4 月 27 日 農業情報システム学分科会 (第 21 期・第 6 回)

1. WG「知能的太陽光植物工場」が取り組んでいる「農業および園芸」(養賢堂)の連載状況について橋本 康委員から報告があった。また、12月ごろに第3回シンポジウムを開催する計画であるとの報告があった。詳細は次回分科会で提案する。
2. 野並 浩委員から「植物工場におけるスピーキング・セル・アプローチの展望」と清水 浩WG委員(分科会オブザーバ)から「LED照明による植物工場の省エネ化」について話題提供があった。
3. 清水WG委員から午後開催の公開シンポジウム「植物工場における自動化・情報化技術の展望」の申込み状況について報告があった。

平成 22 年 11 月 29 日 農業情報システム学分科会 (第 21 期・第 8 回)

1. WG「知能的太陽光植物工場」が取り組んでいる「農業および園芸」(養賢堂)の連載状況について橋本 康委員から報告があった。また、最近の執筆者から記事内容について説明があった。
2. The 2011 CIGR International Symposium on "Sustainable Bioproduction- Water, Energy, and Food"(September 19-23, 2011, Tokyo)にオーガナイズドセッション「太陽光植物工場」を分科会セッションとして設置したとの報告があった。

平成 23 年 2 月 28 日 農業情報システム学分科会 (21 期・第 9 回)

1. WG「知能的太陽光植物工場」が第 21 期中の発行を目指している報告「知能的太陽光植物工場の新展開」について橋本 康委員から趣旨説明があった。知能的太陽光植物工場振興による新規雇用創出などの社会的影響や低炭素・省エネルギーなど持続性に関する議論も加えた方が良いとの意見があった。審議の結果、提案内容は承認され、報告書の取りまとめを野並 浩幹事をお願いすることになった。
2. 分科会オブザーバーの高山弘太郎 WG 委員から愛媛大学植物工場拠点における農商工連携に関する動向について説明があった。また、沖縄県で進めている地域 ICT 利活用広域連携事業「地デジと ICT で育てるみんなのデジタルファーム」について川満 WG 委員から説明があった。
3. WG「知能的太陽光植物工場」が取り組んでいる「農業および園芸」(養賢堂)の連載状況について執筆者である後藤委員、橋本 康委員から説明があった。

平成 23 年 6 月 2 日 日本学術会議幹事会 (第 125 回)

農業情報システム学分科会報告「知能的太陽光植物工場の新展開」について承認

＜参考資料3＞ 公開シンポジウム

(1) 知能的太陽光植物工場

日 時：平成 21 年 7 月 3 日 13:00～17:00

場 所：日本学術会議 講堂

開会あいさつ：野口 伸（北海道大学大学院農学研究院教授、日本学術会議会員）

I 講演（13:10～15:10）

- 1) 古在豊樹（千葉大学教授、日本学術会議連携会員）
「なぜ、太陽光植物工場なのか？その課題と展望」
- 2) 池田英男（千葉大学教授、農業情報システム学分会オブザーバ）
「高生産性オランダトマト栽培の発展にみる環境・栽培技術」
- 3) 仁科弘重（愛媛大学教授、農業情報システム学分会オブザーバ）
「地域拠点型“知能的太陽光植物工場”の進展」
- 4) 村瀬治比古（大阪府立大学教授、日本学術会議連携会員）
「植物工場の全自動化への展望」

II パネルディスカッション「食料生産の革新システム：グリーンハウス・オートメーションへのパラダイム・シフト」（15:20～16:50）

コーディネータ：野並 浩（日本学術会議連携会員）

パネリスト：田中道男（園芸学からの視点）、吉田 敏（環境調節からの視点）、
高山弘太郎（植物生体計測の視点）、羽藤堅治（情報科学からの視点）、
有馬誠一（機械化からの視点）

閉会あいさつ：橋本 康（日本学術会議連携会員）

(2) 植物工場における自動化・情報化技術の展望

日 時：平成 22 年 4 月 27 日 13:00～17:00

場 所：日本学術会議講堂

開会あいさつ：野口 伸（北海道大学大学院農学研究院教授、日本学術会議会員）

I 講演（13:10～15:10）

- 1) 丸尾 達（千葉大学准教授、農業情報システム学分会オブザーバ）
「日本型（アジア型）太陽光植物工場の開発と栽培上の課題について」
- 2) 清水 浩（京都大学教授、農業情報システム学分会オブザーバ）
「植物からの情報を利用した環境制御手法」
- 3) 門田充司（岡山大学教授、農業情報システム学分会オブザーバ）
「植物工場におけるロボット化技術の現状」
- 4) 鳥居 徹（東京大学教授、農業情報システム学分会オブザーバ）
「パラレルロボットの植物工場への応用（可能性）」

II 総合討論（15:30～16:50）

コーディネータ

清水 浩（京都大学教授、農業情報システム学分会オブザーバ）

仁科弘重（愛媛大学教授、農業情報システム学分会オブザーバ）

閉会あいさつ：古在豊樹（千葉大学環境健康フィールド科学センター教授
日本学術会議連携会員）

(3) 太陽光植物工場 —より幅広い深化に向けて—

日 時：平成 22 年 11 月 29 日 13:00～17:00

場 所：日本学術会議 講堂

開会あいさつ：町田武美（茨城大学名誉教授、日本学術会議連携会員）

I 講演（13:10～16:00）

1) 大政謙次（東京大学教授、日本学術会議連携会員）

「画像工学の高度な活用」

2) 野口 伸（北海道大学教授、日本学術会議会員）

「情報化・インテリジェント化の視点」

3) 田中道男（香川大学教授、農業情報システム学分会オブザーバ）

「園芸学からの指摘」

4) 村瀬治比古（大阪府立大学教授、日本学術会議連携会員）

「国家プロジェクトの動向」

5) 橋本 康（愛媛大学名誉教授、日本学術会議連携会員）

「今後の展望」

II 総合討論（16:10～16:50）

司 会：野並 浩（愛媛大学教授、日本学術会議連携会員）

閉会あいさつ：真木太一（九州大学名誉教授、日本学術会議会員）