

次世代農業技術としての植物工場

千葉大学
大学院園芸学研究所

丸尾 達

はじめに

「次世代農業」や「次世代施設園芸」の言葉は、わかりやすい旗印ではあるが、実際に日本の農業で世界に太刀打ちできる分野はある程度限定されるのが現状である。そのなかでも施設園芸／植物工場の分野は世界に誇れる数少ない技術分野の一つである。

さて、「植物工場」という言葉自体は、ほぼ一般化したものと思われるが、一部定義があいまいなところがあり、使用場面や個人により「植物工場」のとらえ方が異なることも多い。

それは、ごく最近まで植物工場といえば、人工光のみを光源にして閉鎖空間内で作物を効率的かつ計画的に栽培する人工光型の植物生産システムを意味していたのが、近年若干異なる意味で使われるようになったことにある。具体的には、狭義の植物工場（人工光型植物工場）に太陽光型植物工場（太陽光・人工光併用型も含む）を加える

ようになったことが、混乱の原因である。

それに伴い、植物工場の定義も若干広くなり、「高度に環境制御した条件下で栽培することにより、栽培環境や作物生育のモニタリングを実施し、生育予測を行って計画的・安定的に作物を生産する施設」となった。ほぼ周年的に計画生産・出荷が可能な栽培施設という意味である。

特に、太陽光型植物工場は、従来型の施設園芸システムとの区別が困難な場合が多いが、「施設をほぼ周年的に利用すること」、「高度な環境制御技術により生育予測等を行うと同時に安定生産、計画生産を実現出来ること」が、植物工場的前提条件になっている（図-1）。

他方の人工光型植物工場の特徴は、蛍光灯やLEDなどの人工光光源のみを用い、栽培室が断熱壁で囲まれた閉鎖型栽培システムで、極限定的な換気条件のもとで栽培されることである（図-2）。

人工光型植物工場の歴史は比較的長く、既に1985年に開催された科学万

博（つくば'85）には、1株に1万個の果実を着けた養液栽培のトマトと同時に人工光型の植物工場が話題になっている。この人工光型植物工場は、主として民間主導で研究開発が進み、極めて応用的側面から発展して来た。つまり、光源やHP（ヒートポンプ）等の効率化や断熱資材の性能向上が、産業化の前提条件であり、エネルギー価格や人件費なども密接に関連し、経済的・経営的側面が大きい分野でもある。

本稿では、「次世代農業」を進展させる分野としての植物工場の導入メリットと新技術等について、太陽光型植物工場と人工光型植物工場双方について概観する。

1. 次世代農業につながる植物工場技術発展の背景

(1) 日本農業の概況

農業生産者は常に安定生産・計画生産をめざして来たと思われるが、外界



図-1 太陽光型植物工場（千葉大学：トマト低段密植栽培）



図-2 人工光型植物工場（静岡県：リーフレタス栽培）

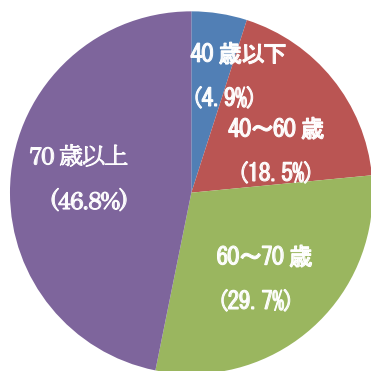


図-3 平成25年度年齢別基幹的農業従事者の構成比（平成25年農業構造動態調査結果より作図）



図-4 ハイドロポニックファーム（東京都調布市：1946年）

の気象条件の影響を大きく受けざるを得なかった。その結果、数年周期で生産物の価格の暴落がある一方で、数年に一度の高騰があり、生産者はそれで帳尻を合わせていたところがある。しかしながら、近年は安値安定の基調にある。

これには種々の原因があるかと思うが、流通や消費構造が大きく変化し、街の八百屋さんが巨大な量販店チェーンに置き換わると同時に、個食が増加し、外食・中食（なかしょく）の比率が大幅に高まったこと。また、高値の時期を中心に業務・加工用途のものが輸入されるようになったこと。野菜の消費自体が低迷していることなどが挙げられるであろう。

一方、我が国の農業従事者の高齢化は、極めて深刻な状況である。2013年度農業構造動態調査によると、現在我が国の基幹的農業人口の平均年齢は、66.5歳である。さらに、70歳以上の割合が46.8%であり、39才以下の若年人口が5%を切っていることを考えると、10年後の農業人口は、現在の1/3程度まで減少することが予測される（図-3）。そうすると、現状では生産者が集団で共選等の出荷形態をとっていることもあり極めて深刻な事態が予想される。

それに対応するために、「強い農業」

の旗印の下に、農業再生・強化を図って、「次世代農業」を推進し、国内生産だけでなく、海外での生産や農産物の輸出も視野に入れた積極的な攻めの姿勢が求められているなかで、植物工場が期待されているのである。より少ない人数で、より広い面積を使い、より効率的に作物生産する必要があるからである。もちろん全ての作物が植物工場で生産されるようにはならない。米・麦・大豆などいわゆる土地利用型の作物については、別の方向の次世代型生産様式が期待されている。例えばGPSと連動させたロボットトラクタの活用等による大規模で合理的な精密農業のスタイルである。

さて、植物工場の基礎となる施設園芸や養液栽培についてみると、これらは戦後急速に発展したものである。

(2) 施設園芸

施設園芸は、戦後の農地解放の動きともリンクする形で、農業用塩化ビニルフィルム（農ビフィルム）の開発を契機として、昭和30年頃から急速に発展した技術である。比較的小規模の生産者が中心になり、小面積でも独立経営が可能で、より安定的な生産が期待できる生産システムとして、精力的に技術革新を重ねた結果、世界でも有数な高い技術体系を確立したことが注

目に値する。高い栽培技術だけでなく各種省エネシステムを含む施設や適応品種の育成等一連の技術体系は、我が国が得意とする電機やプラスチック技術の分野の発展にも支えられ、独自の発展を遂げてきた。

(3) 養液栽培

植物工場における栽培様式は、基本的に養液栽培になる。これは、地下部環境の制御性や病害、連作障害の回避、作替えの容易さ等の特性によるものである。欧州では、地下水汚染の回避等環境保全の観点からも導入が進んだ経緯があるが、我が国の養液栽培技術レベルは世界的にも極めて高く、多数の作物に対して種々の研究実績がある。

我が国の養液栽培技術の発展に大きな影響を与えたのが、昭和21年に設置されたハイドロポニックファームである（図-4）。同施設は、駐留米軍に「清浄野菜」を供給するために、調布市（東京都：22ha, 2haのガラス温室も含む）と天津（滋賀県）に建設された「礫耕野菜生産施設」である。当時の我が国は、肥料産業が壊滅的で、野菜生産も下肥中心で行われていたため、寄生虫等の問題から生食は困難な状況にあった。そこで、サラダ野菜の安全・安心を担保する「清浄野菜」生産を目的に、レタス（結球レタス・サラダナ）の他、



図-5 初期の人工光型植物工場（静岡県静岡市：1984 三浦園芸）



図-6 LED光源による育苗（福井県：最新の人工光型植物工場）

セルリー、キュウリなどが栽培され、世界に先駆けて養液栽培で経済的野菜生産を行ったのである。生食可能な清浄野菜は国内だけでなく、朝鮮戦争時には韓国にも空輸されている。このプロジェクトに関わった多くの研究者、技術者が、その後の我が国の養液栽培／施設園芸の発展に大きく寄与しており、極めて大きな影響を与えた。

もちろん厳密な意味での経済生産ではなかったと思われるが、軍事目的で採算を度外視した施設の設置が、現在の先進的植物工場につながった事例である。もちろん先人たちの、膨大な努力の蓄積が根底にある。

2. 人工光型植物工場と太陽光型植物工場

(1) 人工光型植物工場

前述のように光合成光源として人工光のみを用いる人工光型植物工場は、1980年過ぎから我が国で特異的に実用化が進んだものである（図-5）。主として夏期に施設栽培が困難なレタス類の無農薬・周年供給システムとして始まった。現状では、台湾、中国、韓国をはじめとしたアジア諸国やオランダ、米国などの先進国でも実用化に向

けた研究開発が急速に進展している。

現在では主としてレタス類を中心とした葉菜類を栽培対象とすることが多く、今のところ草丈が小さいレタスやハーブ類などの葉菜類や、野菜などの苗、一部の草丈の低い作物（イチゴ等）に限定されている。

人工光型植物工場のコンセプトは、場所を問わずに、周年的な安定生産、高品質無農薬野菜生産を実現するために、太陽光を全く透過しない高断熱性の外壁等で施設を造成し、内部で人工光のみを利用した計画・再現性の高い栽培を効率よく行おうとするものである。

葉菜類の生産は栽培期間が短く、短期間で収穫・定植を繰り返すことが可能で、作業量も安定・平準化しており、雇用中心の経営が可能である。実際の栽培期間は、施設やシステムにも依存するが、ある程度のサイズの苗を準備すれば、定植後10日で、80～100g程度のリーフレタスも収穫可能になる。効率的な施設では、播種後から34～35日程度で収穫できるが、播種後1回程度移植して10g弱の苗を育成し、最終ラインに定植されることが多い。その間の栽培管理自体も比較的単純、軽労働で外界の気象条件の影響もなく、労働環境も食品産業に近いものが多く、都市部に設置した場合の雇用の確保も比較的容易である。

施設には断熱性・気密性が高いものが求められるが、外乱が少ないため施設的设计がしっかりしていれば、環境制御性が高いこと、換気率が極めて小さく、病虫害リスクが低いので完全無農薬栽培が可能なことや、CO₂や水の利用効率が極めて高いこと等の特徴につながっている。CO₂の利用効率が高いことは、高CO₂濃度管理が容易で、光合成速度を最大化することで生育速度の向上に大きく寄与している（図-6）。

また、水の利用効率が高いのは、施設の気密性が高いのと、常時光源ランプからの熱を排出するためにヒートポンプ（HP）で冷房するため、栽培作物が吸水・蒸散した水の95%以上が施設内の熱交換器でドレイン水として回収できるためである。この高い水の利用効率は我が国ではそれほど評価されないが、中東諸国等、淡水の利用が厳しく制限されているエリアでは極めて重要な要素の一つになっている。

また、人工光型植物工場では、無農薬生産や一般生菌数の少ない野菜を、異物（虫や毛髪など）混入率を最低限まで低くした状態で生産可能であり、設置場所の自由度が高いことや計画的生産が可能なことから、一般消費者向けというよりは、業務用、食品加工用原料としての用途が有望である。例え



図-7 低カリウムレタス生産（会津富士加工 HP より）



図-8 人工光型閉鎖系苗生産システム（トマト苗生産）

ばサンドイッチ等の加工を行う食品工場内或いは隣接した場所に人工光型植物工場を設置することで、その優位性は極めて高くなる可能性がある。

安定した生育と生産性を重視して、栽培システムには水耕栽培（養液栽培）を用いるのが一般的になっているが、養液栽培の技術を応用して特定の無機成分を増減する栽培が始まっている。その代表的な例が、人工透析治療等を要する腎臓病患者などを対象とした低カリウムレタス生産である（図-7）。カリウムは、作物の主要必須元素であり、カリウムが不足するとレタスの成長は大きく抑制されるが、制御環境下で定められたプログラムによって最低限のカリウム施用での生産が可能になり、市販のレタスに比べカリウム濃度86%減のレタスを生産可能な技術が確立されている。ただ、低カリウムレタスのように、患者の健康に直結するような場合には、対象となる成分は平均値ではなく、生産物の最大或いは最低の濃度が重要になり、出荷する全ての個体の成分濃度が問題になるため、作物の品質管理が可能な人工光型植物工場との相性が良い。

同様な成分調整の技術は、2015年4月より新たに始動した「機能性表示食品制度」を受けて、現在多方面から注目されている。栽培環境により野菜

等の内容成分は大きく変化するが、変動が顕著な露地や一般施設園芸に比べ、人工光型植物工場では光環境も含めて栽培環境が格段に安定しているため成分濃度も安定させやすく、再現性が高いのが特徴である。機能性を謳わないまでも、ある程度の精度で成分表示が可能なのは人工光型植物工場産野菜に限定されるかもしれない。

(2) 太陽光型植物工場

他方の太陽光型植物工場は、太陽光を利用することが前提となるため、太陽光や温湿度、CO₂濃度など外部環境の影響を大きく受ける。しかしながら、施設サイズ等の自由度が大きいため、トマトやキュウリ、パプリカなどの果菜類や、葉菜類においても一般生菌数の密度や内容成分の安定性などは若干低くても、より大量に、安価な野菜を安定供給する手段としてその役割は急速に高まっている。元来、野菜生産の全てを人工光型植物工場で行うようなことは、今後も考えにくい状況であり、人工光型植物工場での生産は、せいぜいサラダ葉菜類の10～20%程度が上限であるという意見が主流である。そうなるとう当然、太陽光型植物工場の役割が相対的に高まって来るが、苗生産を人工光環境下で行う人工光型植物工場と太陽光型植物工場

のリー栽培システムが徐々に増加している。苗生産専用の人工光型植物工場として閉鎖系苗生産システムが独自に開発され、既に広く苗生産業者や、一般生産者へ利用が拡大している。

人工光型植物工場野菜等の苗生産を行う場合、課題になるのが施設稼働率である。一般に苗の需要は作物ごとに異なるが、春と秋など年間大きな二つのピークを有することが多い。植物工場では、高品質の無病苗を生産できることは、高く評価されているが、需要の増減には対応しにくい。現状では、一部の高品質接ぎ木苗生産を全国展開している苗生産業者や、周年生産体系が確立されている太陽光型植物工場での葉物生産やトマトの低密度密植栽培（図-8）などとの組み合わせが注目され、先行して普及段階に移っている。

3. 植物工場で注目される新技術

植物工場は、極めて応用的な生産システムであるので、幅広い分野の新技術、新システムが応用可能で、我が国の工業・化学・インフラの高い技術水準を反映し易い産業の一つになり得る。今後は、海外展開も含めて「次世代農業」を具現化するためには、まさにオールジャパンの体制で取り組む必



図-9 オランダ ISO 社の接ぎ木ロボット (Graft 1200)

要があるが、以下には今後注目される新技術について幾つかご紹介する。

(1) 環境制御技術

上述のように、「高度に環境制御した条件下で栽培する」ことが植物工場的前提条件である。しかしながら、現状は、積極的に植物工場用の高度環境制御システムの開発・製造・販売を行っている国内企業は殆どないのが現状である。施設園芸／植物工場のマーケットサイズが大きくないなか、1ha以上の大型太陽光型植物工場ではオランダのシステム (PRIVA 社等) の導入が基本になっている。オランダの環境制御システムは、複合環境制御から統合環境制御のレベルに進化している。統合環境制御とは、作物生理に適合させることを前提に、温度・湿度・光・CO₂濃度等の複数の環境要因を経済的に同時に最適化する技術であるが、多種類のアクチュエータをどのような優先順位と組み合わせで、動作させるかが重要になっており、極めて複雑で高度な計算が必要な場合がある。

現在、千葉大学では天気予報や市況予測とも連動させたダイナミックなクラウド型統合環境システムを開発中であるが、日本のみならずアジア地域向けに研究・開発することが求められている。というのは、日本の施設園芸

面積はおよそ5万haであるが、アジアには中国の300万ha、韓国の5.3万haの施設面積があり、世界全体の70%以上を占めるからである。まさに、アジアに攻め込んでいく「次世代農業」、「次世代施設園芸」が求められている。

(2) 各種自動化・省力化技術

植物工場では、コストを縮減し、生産性を向上させることが重要な要素となるため、各種自動化機器や装置の開発も重要であり、オランダの大規模施設ではこの種の自動化機器の導入が進んでいる。しかしながら、我が国では植物工場に新たな雇用の創出も期待されていることから、直ちに完全自動化の方向を探るだけでなく、重労働を軽減するアシスト系の自動化機器および作業補助機器や効率的なスペーシングや搬送に係わる技術の研究・開発が求められている。例えば、季節的に需要が集中する接ぎ木苗生産については、短期間ではあるが極めて熟練した技術を有する安価な労働力に対する期待が高いが、そのために接ぎ木ロボットが国内外で注目されている。

野菜類の接ぎ木技術は、我が国独自の技術であるが、近年環境に優しく病害回避・収量増につながる技術として欧州をはじめとして世界中で急拡大し

ている。その結果、接ぎ木ロボットに対する期待・需要が急速に高まったのである。接ぎ木ロボットは我が国で1980年代後半から開発が進められてきたが、近年オランダで開発されたISO社の接ぎ木ロボットおよび苗が、その性能や発想の新規性から注目を集めている(図-9)。我が国の関係技術者の多くは、接ぎ木が我が国独自の技術であり、主要構成要素・パーツ(デンソー製ロボットなど)が日本製であるだけに、大変残念な思いをしている。このように、応用的な分野については、最後のちょっとした発想や他分野の技術の応用が研究開発、技術開発の重要な役割を果たすことが多いのも現実である。

他方の人工光型植物工場については、太陽光型植物工場に比べて規模が小さく、施設数も少ないが、比較的小型の自動化機器の開発を行うことで、同植物工場におけるコストを大幅に縮減することも可能になる。

(3) エネルギー関連技術

いずれのタイプの植物工場も植物工場にはエネルギーの投入が不可欠である。エネルギーは、人工光光源、温度制御(暖房・冷房)、湿度制御(除湿・加湿)や各種機器の運転に使用するとともに、場合によってはCO₂の投入

にも強く関係する。それらのエネルギーを個別に制御するのではなく統合的に制御することが、エネルギー・資源の使用量の低減とコスト縮減に大きく寄与する。

オランダでは、天然ガスの利用が広く進み、CHP (Combined Heat & Power) システムなどコジェネシステムやトリジェネシステムが普及し、補光システムの電力供給をサポートしているが、日本(アジア地域)の場合には、夏期の高温抑制や省エネ、CO₂施用、飽差制御が重要な要素になっている。そのための専用の装置や制御システムの開発が現在注目されている。代表的な例は細霧システムやCO₂ゼロ濃度差施用システムなどである。これらの機器により、太陽光型植物工場における生産性は飛躍的に改善される可能性がある。

(4) 専用品種育成, 種子精選・種子処理技術

現状の植物工場では、植物工場専用品種を用いていないことが多い。レタス類については、主としてリーフタイプのレタス品種が栽培されているが、大半は外国の種苗会社で育成・選抜された土耕栽培用品種の中で養液栽培や植物工場の栽培に向くものが選定され

ている。

一方、太陽光型植物工場ではオランダ等で育成された高収量タイプの品種を栽培することも多いが、我が国の気象条件に適合し、我が国のマーケットに求められる品質を有する国産品種の育成が強く望まれている。

野菜類の育種については、我が国は世界水準の技術の蓄積があり、その方向性を植物工場に向けることで、短時間で専用品種の育成が可能になるものと思われ、それにより種々の技術革新もさらに進んで、植物工場システムとしてのパフォーマンスが大幅に向上すると思われる。

また、栽培環境がより高精度に制御可能で、好適になるに従い、種子や発芽、初期生育の揃いの重要性が高まるため、各種の種子精選技術・種子処理技術に対する期待も高まっている。我が国では、それらの技術は一部の種苗会社では研究開発が進められているが、今後は公的な研究機関での対応も重要になってくる。

植物工場はその施設数、栽培面積が少なく、種子のマーケットサイズも小さいので、専用品種を育種する種苗会社はほとんどみられない。そのため、品種の選択肢も限定され、面積の拡大の足かせになっているが、「栽培面積が少ないので育種が進まない」し、「裁

培が容易で生育速度が高く、生理障害が少ない品種がないので、面積を拡大しにくい」というジレンマを何とか解消して、生産性の革新的改善を図る必要がある。そのためには、大学をはじめとする公的機関に期待される点も大きいと思っている。

4. 今後の展望

植物工場は、今後の我が国には必要不可欠な技術であることは間違いないが、我が国だけではマーケットサイズが小さい可能性がある。他産業の歴史から見ても、中国等近隣の国々への栽培システム、生産物の積極的輸出や海外生産も考慮した研究開発が重要である。当然ながら、中国や韓国、台湾等の国々も積極的な研究開発に対する投資を行っているため、それらの国々との協調、競争をしていく必要があるが、植物工場に関係する分野は極めて広いので、国を挙げた「次世代農業」、「次世代施設園芸」に関連するプロジェクトを効率的に進める必要がある。現状では採算性等に若干問題が残る植物工場も、将来的には我が国及びアジア地域の次世代農業の発展につながるはずである。現時点での経済性だけでなく、将来性を重視した中・長期的研究・開発が重要である。