

# 植物工場の夢と課題

池 田 英 男\*

## 1. はじめに

これまでのわが国では、「農業は天気しだい」とする自然条件依存型の考えが強かった。‘温室’はその名のとおりに低温期の加温や保温が中心であって、温室栽培では湿度や炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)濃度、光の質や強度などの、植物が生育する環境を十分に管理してきたわけではない。加温や保温は低温期の対策としては効果があるが、施設を周年利用するなら、春から秋にかけての高温対策の方が重要になる。

「植物工場」という表現をどのような意味づけとして解釈するかは、人によっていささか異なるかもしれない。ここでは、植物工場を、環境データに基づいて、植物の生育環境を可能な限り精密に制御して、科学的理論によって作物を‘安定生産’、‘定量・計画生産’、‘高品質生産’でき、極めて高い生産性を実現できる施設と考えてみたい。これはまた、農業を可能な限り減らした栽培によって、消費者に「安全・安心」な商品を供給できるものでもある。さらに、「工場」的意味合いを強くするなら、植物工場では栽培のシステム化や管理の自動化、搬送システ

ムなどを装備する必要があることになる。

## 2. 植物工場という夢

わたしたちは、植物工場という表現で、どのような生産システムを考えるだろうか？ 表1は筆者が考える植物工場である。そして、この内容を実際に実現できたのがオランダの施設園芸である。

## 3. 高生産性の実現

### オランダの現状

オランダで施設栽培されるトマト果実の10a当たりの年間収量は、1970年ころは20t程度でしかなかったが、その後ロックウール培地の普及やハウス環境の改善、高収量品種の作出、炭酸ガス施与、コンピュータ技術などの普及等々によって、1980年代の中ころには35tを超え、2000年ころには60t近い収量に達した。30年間でトマト果実収量が3倍になったのである。2001年の国際会議の時に、集まった研究者の茶飲み話しの中で、オランダのト

表1 「植物工場」 = 「サイエンス農業」の内容

生産技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・養液栽培で作物生産を行うために、軽労働が中心となる。</li> <li>・土を用いないために、連作障害を回避できる。</li> <li>・多段栽培が可能</li> <li>・地上部・地下部の環境制御をすることで、生育や品質を調節できる。</li> <li>・環境と作物生育のモニタリング、生育予測などに基づいて、計画的・安定的に生産できる。</li> <li>・肥料や水分の高い利用効率を実現でき、農薬の使用量をかなり低減できる。</li> <li>・栄養成分や機能性成分を強化した作物生産ができる。</li> <li>・栽培施設内は清潔で、快適環境を形成できる。</li> <li>・環境負荷をなくした持続的農業生産を実現できる。</li> </ul>
販売	<ul style="list-style-type: none"> <li>・年間を通じて、また台風等の気象災害時にも安定生産が可能で、さらに生産量や出荷量のある程度正確に把握・調節できるので、有利な販売を実現できる。</li> <li>・加工用・業務用として、歩留まりが高く、残渣の少ない生産を実現できる。</li> <li>・虫や異物の混入が少ないので、洗浄や調製作業を省け、コストの縮減が可能。</li> </ul>
立地・建築	<ul style="list-style-type: none"> <li>・立地場所を選ばず、非農地、栽培不適地などでの農業生産が可能</li> </ul>

\* (大阪府立大学名誉教授) 千葉大学環境健康フィールド科学センター特任教授

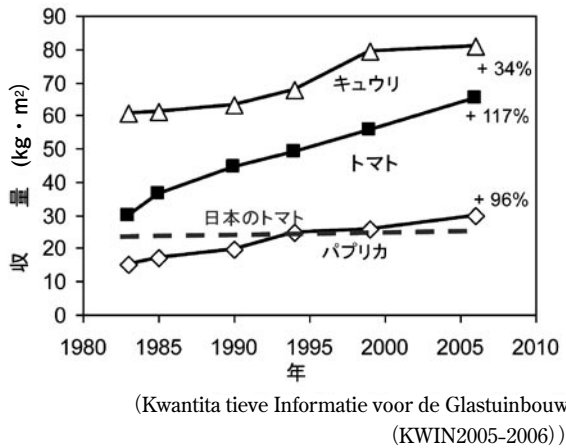


図1. オランダにおける果実収量増加 (Heuvelink 2009)

マト果実収量の上限は 80 t 程度ではないかと話した記憶があるが、2008 年にオランダを訪問して聞いたところ、年間 52 週の連続収穫によって 100 t / 10a を達成したとのことであった。驚くべき数字である。これはあくまで実験的な数字であり、実用化するにはまだ解決しなければならない課題が残っているが、サイエンスに基づく技術を駆使すると 10a の面積で年間 100 t 以上の果実収量を挙げる事が可能であることは証明された。

オランダの施設園芸は輸出産業であり、国際競争の中で鍛えられ、収量増加や生産性向上については常に考えられている。オランダ全体の栽培施設面積はこのところ 10,000ha 程度で推移しているが、生産者数は急速に減少している。このことは、1 戸当たりの経営面積が増加していることを示している。人件費が高いオランダでは、施設経営の中で雇用をいかに減らすかということが大きな課題であり、ロボット化やシステム化が進んだが、これを効率よく行うためには規模拡大が必要となる。すなわち、オランダでは施設規模の拡大と、栽培装置の自動化やシステム化、管理システムのコンピュータ化が同時に進んだ。今、彼らが抱える大きな問題は、省エネである。収量増加に伴ってエネルギー消費も増加し、このところ施設栽培のエネルギー消費は、生産コスト全体の 20～25% も占めるようになっている。

エネルギー対策としてこのところ普及しているのは、ガスタービンを稼働させて発電を行い、その際発生する熱を暖房に利用し、排ガスを CO<sub>2</sub> として栽培に利用する方法、すなわち 'トリジェネ' である。発電によって生じた電力のうち、栽培施設で利用す



図2. 品種と閉鎖温室、補光の組合せで 100t/10a を達成！

る以外の余分なものは販売する。これについては、「オランダのトマト生産農家はトマトでもうけているのではなくて、売電でもうけている」との話もある。これとは別に、閉鎖型あるいは半閉鎖型の施設で、施設内に到達するエネルギーを地下の滞水層に貯蔵して、これを暖房に利用する検討が進んでいる。

近年オランダの栽培施設を訪問すると、ベルトコンベアやオーバーヘッドクレーンなどのさまざまな移動システムによって、個体単位あるいはコンテナ単位で植物体が移動し、3 方向カメラによって評価されて、ソーティングシステムで区分けされる光景を見ることができる。菊の機械収穫やバラの栽培ベッドの移動システムなどを備える圃場では、広いハウスの中で極めて少ない人々が働いている。これはまさしく「植物工場」である (図3, 4)。

昨今のオランダのガラスハウスを分類すると、通常型のほかに閉鎖型や半閉鎖型がある。閉鎖型や半閉鎖型は、エネルギー利用の考えから開発されたものである。しかし、栽培施設を閉鎖できるなら、エネルギー獲得に都合が良いだけでなく、病害虫の被害も減らせるし、CO<sub>2</sub> 濃度を高く維持することもしやすくなる。オランダのグリーンハウスでは、2020 年にエネルギーニュートラルになるとのことである。すなわち、グリーンハウスで使用するエネルギーとそこで作り出されるエネルギーが等しくなるということで、驚くべきことである。

オランダの施設園芸のもう一つの特徴は、コンピュータがいろいろな場面で利用されていることである。環境管理はもちろんのこと、栽培管理や労働管理、収量管理、収量予測、効率的なエネルギー利用など、さまざまなソフトが開発され、利用されている。言葉のわからない外国人労働者でも、ボタ



図 3. 鉢物を移動させるベルトコンベアと選別を行う 3D カメラを収納した箱



図 4. 移動式ベッドを用いたバラ栽培  
ベッドが移動するために作業者は動く距離が大幅に減少した。またベッド間の通路が不要になったために栽植密度が高くなり、切り花収穫数も増加した。

ンを押すだけで入力できる管理コンピュータがあれば、1うね当たりの作業項目別の必要時間や収量を簡単に集計でき、効率を向上させる方法を考えることができる。収量予測プログラムでは、環境情報はコンピュータからのデータを用いながら、植物体の情報を入力することで、一定期間先の収量を予測することができるので、出荷計画が立てやすくなる。

1980年代以降のオランダの施設園芸では、収量向上や労働軽減のために、施設の軒高を高くし、ハイワイヤシステムや植物体移動装置を導入し、栽培方法を改善してきた。また別に、高収量品種や房取りトマト品種の開発、天敵の利用、栽培装置の改良なども絶えず行われてきた。暖房方式などについても、常に新しい方法が提案されてきた。このような品種や技術の開発は、試験研究機関と生産者、企業の三者の共同によるものであった。それぞれが

分の負担と責任を持つことで達成できたのである。

#### 4. 生産性向上

生産性には①労働生産性、②土地生産性、③資本生産性の三つの概念がある。それぞれは、収量あるいは収入を、それに要した労働時間、土地面積、投入資本で割って求める。したがって、生産性を向上させるためには、分子を大きくする（収量あるいは収入を増やす）ことが必要だけでなく、分母を小さくする（労働時間を減らし、土地を有効活用し、低コストな生産を行う）必要がある。

分子を大きくする、すなわち作物の生育を早め、収量を増やすためにはどうしたらよいのだろうか？これからの日本で植物工場を発展させるための大きな課題であろう。

労働生産性の向上には、今まで人手に頼っていた作業を自動化したり、システム化したりすることが必要である。‘温室’で行っていた温度管理や灌水などの作業は、簡単に自動化できる。コンピュータがあれば、作物の生育状態に合わせた管理もできる。それとは別に、同じ時間働いても、重労働は軽労働化される必要がある。すなわち、労働の軽減も重要な課題である。

作物を生産する施設としては、人工光・閉鎖型のものや、天然光を利用したガラス温室、プラスチックハウスなどがあるが、人工光・閉鎖型のは極めて少ない。定量生産や無農薬、洗わないでも食べられる等の効果を評価して、いくつかの企業が、しばらく前から人工光・閉鎖型の実用施設を建設してきたが、コストがかかり過ぎたり、環境管理に問題があったりして広く普及するには至っていない。

一方、50,000haといわれるわが国の園芸生産施設の中では、ガラス温室は2,000ha強（約4%）で、プラスチックハウスが大部分を占めている。その中でも、パイプにフィルムをかけただけの簡単なものが圧倒的に多く、暖房機や湿度調節機、CO<sub>2</sub>施与装置、換気装置などを備えたものはあまり多くない。すなわち、日本では施設栽培といっても保温重視であり、温度管理は体感的な場合が多い。作物管理はすべて手作業で、生産性も極めて低く、労働環境としても改善の必要性が大きい。植物の安定生産や計画生産を実現するには地上部や地下部の環境調節が必要になるが、そのための装置やそれを動かすコン

ピュータが導入されている施設はわずかである。養液栽培の導入面積も 1,800ha 強（野菜+花き、平成 21 年）で全施設面積 50,000ha のわずか 3.5% 程度と少ない。

### 5. 今後わが国で収量増加, 安定生産・定量生産・計画生産を実現するためには

前述のように、オランダでは 1 年間の 10a 当たりのトマト果実収量が 100t を超える状況に至っている。オランダの考え方を知り、この道筋をたどることができれば、日本でも今よりはるかに多い収量を安定して生産できる可能性がある。以下にその考え方を示したい。

#### 1) 科学的に栽培を考える

図 5, 6 示すのは、植物栽培の概念である。すなわち、光、水、熱、CO<sub>2</sub>、無機要素（肥料）、O<sub>2</sub>（酸素）を投入して光合成を行わせ、同化産物（主には糖）を果実や根、成長点などに転流させることで、収穫物を最大化することが栽培である。栽培はこれですべてであり、これ以外の項目はない。このうち、水と CO<sub>2</sub> は光合成の原料であり、光は光合成のエネルギー源である。水と CO<sub>2</sub> を豊富に与え、光を十分に与えることが、光合成を進める上では重要である。水と CO<sub>2</sub> を十分に与えない農業は、家畜に餌を与えないで大きくなれと言っているようなもので、どだい無理な話である。雑草は放置すると水や肥料を横取りするし、大きくなると影になって作物に悪影響を与える。また、病気や虫の巣になることもあるので、雑草取りは重要である。しかし、「土づくり」は、実のところ何をしていることになるのか？ よく考える必要があるだろう。

光合成の原料となる水と CO<sub>2</sub> を作物に潤沢に供給するにはどうすればできるのか？ 水は養液栽培によって容易に供給できる。培養液の形で与えれば、

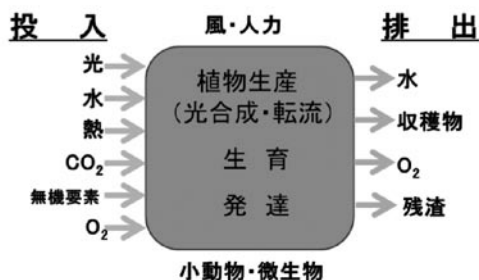


図 5 栽培の概念

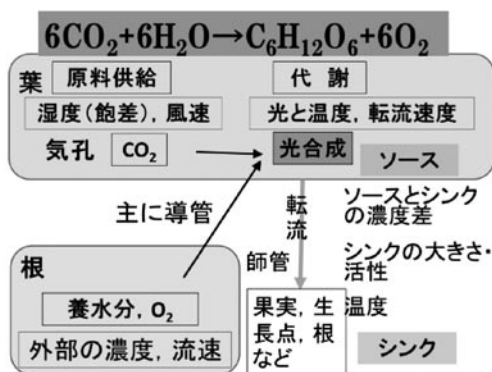


図 6 光合成原料の取り込みと炭水化物の合成・転流を示す概念図

酸素やミネラルも同時に与えることができる。CO<sub>2</sub> は栽培施設内の CO<sub>2</sub> 濃度を高めることが必要であるが、それだけでは不十分である。CO<sub>2</sub> は葉の気孔から植物体内に取り込まれるので、CO<sub>2</sub> を取り込ませるためには気孔が開いている必要がある。気孔を開かせるには、周辺空気の湿度を適当な範囲に維持しなければならない。そして、高濃度の CO<sub>2</sub> を含む空気を葉の表面に供給する（風を吹かせる）ことも忘れてはならない。

光合成を進ませるためには光が必要である。光は多ければ多いほど良いと言える。

光合成で形成された炭水化物は、葉から果実や成長点、根などへどンドン転流させねばならない。そうしないと、葉に炭水化物が蓄積して、光合成を抑制してしまう。

栽培を行うためには、植物の光合成や生理を勉強して、環境応答を理解することが絶対に必要である。「農業は気力」ではなく、「農業は科学」であるのだから。

#### 2) 現状を把握する

わが国でも、さまざまな専門書や指導書に、環境調節の必要性や方法が示されているが、生産者は自分が栽培している環境を正確には把握していない場合が多い。気温や湿度、CO<sub>2</sub> 濃度、光強度などを計測して記録に残す仕組みが必要である。最高・最低気温などを記録している生産者もいるが、これらのデータは瞬間値である。栽培にとって必要なのは、作物に好適な環境条件が何時間あったかということであり、それを知るためには安価な気象観測装置とデータロガーが必要である。より良い栽培のためには、それらを利用して、自分の栽培現場の環境特性を正確に把握することが重要である。

### 3) 環境調節が可能な生産施設の普及

前述のように、わが国にはパイプにフィルムをかかけただけの簡易施設が非常に多く、環境調節が満足にできるような施設はあまり多くない。低温期にのみ保温や加温する‘温室’ではなく、植物生産工場として周年利用する施設を目指すならば、環境調節ができることは絶対条件である。収量増加や安定生産のためには、気温だけでなく、湿度やCO<sub>2</sub>濃度などの地上部環境と根が生育する地下部環境について、植物にストレスとならない管理ができるような施設の構造や条件を備える必要がある。

### 4) データの収集とそれを利用した科学的管理技術の開発・普及が必要

データがなければ、どこがどのように不具合なのかを判断できないために、技術の十分な改良はできない。オランダで管理技術について話していると、彼らの技術には科学的根拠があることを知らされる。数字で裏打ちされた管理技術を作らない限り、試行錯誤の連続に終わってしまう。経験と勘を否定するつもりはないが、経験と勘だけでは技術の発展は速くない。

オランダのコンピュータを見ていると、にわかには理解しがたいような入力項目があることに気づく。コンピュータがどのように設定するかと聞いてきても、環境管理や植物生理についての知識がなければ、設定値すら入力することができない。好適管理のための1日の温湿度管理法、目標期日に目標収量を獲得するための環境管理法、市場価格と生産コストとのバランスを取った環境管理法など、植物の生理と環境応答に熟知して、変化を数字で理解することが必要である。

### 5) 日本独自の環境調節技術の開発

オランダの品種を、オランダ式のハウスで、オランダのコンピュータで栽培すれば、日本でもオランダのような高収量を挙げることができるのか？と聞かれることがある。答えはノーである。そのひとつの理由は、気象条件の違いである。オランダは夏の暑さがそれほどではなく、30℃を超えるような日は数えるほどである。夏の長い日長と、トマトの生育に好適な気象条件は、この時期に大量の果実を生産できる要因となっている。これに対して、日本の夏は気温が高過ぎて作物栽培には不適である。また気象の変化の速さやその程度も、オランダに比べるとずっと大きい。オランダではあまり問題とならない

植物体のしおれが、日本では頻繁に起こりうるので、ストレスを軽減しようとするならその対策は絶対が必要である。日本では、トマトの品種も作型もオランダとは異なるので、日本独自の環境調節技術を開発する必要がある。

### 6) 高収量品種の開発

1980年代にオランダのトマト果実収量が大幅に増加した背景には、ロックウール用の品種を開発したことが大きく寄与していると筆者は考えている。土壌はストレスの大きな環境である。土壌では、作物の根が常に必要としている水分や養分、酸素などを潤沢に供給できないために、作物はストレスの多い条件で生育していることになる。そのような状況で育成されたトマトを、ストレスのほとんどない養液栽培で栽培すると、トマトは栄養成長に強く傾き、大きな葉をつける。それではねらったような果実収量を得ることができないために、トマト栽培では水や肥料を制限して細い茎や小さな葉になるような管理を推奨することになる。これでは、高収量を得ることは難しい。養液栽培用品種を開発する必要があるというのはこの点である。すなわち、養液栽培のように水も肥料も酸素も根に十分に与えられる状況でも、栄養成長に強く傾かない特性を持つ品種を開発する必要があるのである。あるいは、CO<sub>2</sub>を十分与えても過繁茂にならないような生理的な特性を有する品種を開発する必要があるのである。

### 7) 収量予測プログラムの開発

植物工場で、安定・多収を達成するためには、計画生産と収量予測の方法を開発する必要があるだろう。これらの方法は、植物の生育や果実の発達、成熟と強く結び付く光強度や気温、養水分などの効果を、品種特性などと併せて正確に評価できるようにならねばならない。たとえばトマトでは、主茎の成長速度や葉の展開速度と気温・日射量との関係、第1花房開花から第2花房開花までの季節ごとの日数と気温の関係や、開花から果実の発達・成熟と有効積算温度などとの関係についてわかれば、植物の生育診断や収量予測がかなりしやすくなる。オランダの生育予測プログラムを見ると、環境要素などとは別にさまざまな植物体の調査項目をコンピュータに入力する必要があることがわかる(表2)が、これらの項目には測定方法にルールがある。日本でもこのような方法が通用するのか、日本では独自に開発しなければならないのかは不明である。

表 2. トマト高収量栽培のためのデータ

環境データ	室外の気象	日出時刻	時分	給液データ	1日の総給液量	$l/m^2$	
		日の入時刻	時分		日射量当たりの給液量	cc/J	
		積算日射量 (屋外)	$J/cm^2$		1日の総排液量	$l/m^2$	
		屋外 日射強度	$W/m^2$		排液比率	%	
		屋外 気温	$^{\circ}C$		給液 EC	mS/cm	
	室内の気象	室内気温	$^{\circ}C$		給液 pH	-	
		昼夜温度差	$^{\circ}C$		培地内 EC	mS/cm	
		24 時間平均気温	$^{\circ}C$		培地内 pH	-	
		日中相対湿度	%		排液 EC	mS/cm	
		夜間相対湿度	%		排液 pH	-	
		日中平均飽差	$g/m^3$		植物体データ	主茎伸長量	cm
		夜間平均飽差	$g/m^3$			茎径	mm
		日中 CO <sub>2</sub> 濃度	ppm			葉の長さ	cm
収穫データ	総収穫量	$kg/m^2$	葉の枚数	枚/株			
	積算総収穫量	$kg/m^2$	生長点の色				
	正常果平均果重	g/果	生長点と開花花房の距離	cm			
	出荷重量	$kg/m^2$	花房 (花柄) の長さ	mm			
	廃棄量	$kg/m^2$	花の色				
	廃棄率	%	花の大きさ	mm			
分析データ	葉柄汁液中の無機要素	ppm	開花速度	段			
	給液の無機要素	ppm	栽植密度 (主茎数)	株 / $m^2$			
	排液の無機要素	ppm	その他	肥料の使用量	$kg/m^2$		
		植物体廃棄量		$kg/m^2$			
		培地廃棄量		$kg/m^2$			

## 6. おわりに

日本の農業は、これまで長く‘土づくり’に重点を置いてきた。指導書や新聞では、‘土づくり’が大切であると書いている。農協でも普及所でも、‘土づくり’を勧めている。‘土づくり’とは何であろうか？ これは英語には直訳できない単語である。すなわち、日本人の感性で理解できる表現のようである。何人かの生産者に聞いてみたら‘堆肥を入れて、作物の生育に好適な土にする’との答えが返ってきた。好適などはどのような状態なのか？ そもそも土の性質は、火山灰土壌や粘土質土壌、砂質土壌などで大きく異なる。それを‘土づくり’のひとつことで表現しても、多くの生産者には理解できないだろう。

う。堆肥を入れると土が良くなるような気がする。サイエンス農業ではなく、イメージ農業である。

極めて生産性が高いオランダの施設園芸は、土から離れた養液栽培である。わが国で行われている人工光・閉鎖型植物工場でも栽培はすべて水耕法が用いられている。ストレスの多い土壌環境から、ストレスを可能な限り除いた栽培環境に変えることも生産性を高める一つの方法である。データを取りながら、科学的理論に立った栽培技術を用いることが新しい植物工場の基本となる。

データを確実に取り、それに基づいた管理方法を理論的に構築する努力が進めば、技術立国の日本では高生産性の植物工場を稼働させることは困難ではないはずである。