

## 特集 夢から現実へ向かう植物工場

## 太陽光利用型植物工場における環境制御システムの展望

## -情報化による持続的精密施設植物生産の達成-

東海大学開発工学部生物工学科 教授 星 岳彦

## 1. 植物工場と施設園芸

1970年代の半ばから日本で使われるようになった『植物工場』<sup>1,2)</sup>というキーワードは、1985年につくばで開催された科学万博の植物工場の展示によって、いつでも、どこでも、好きなだけ植物が生産できる夢の技術として周知されるに至った。『植物工場は施設園芸か否か』という議論もあった<sup>3)</sup>。それから四半世紀が過ぎようとしている今、両者はその接点を求めて模索を続けている。狭義の植物工場である人工光のみを使用する完全制御型植物工場から、太陽光利用型(無補光型あるいは併用型)植物工場へ、植物工場の検討範囲は再び広がりを見せている。一方で、周年連続生産、機械化自動化、高度な環境制御など、ハウスや温室による植物施設生産の高度化は、低コスト植物工場としてその検討範囲をオーバーラップさせつつある。

ICT(情報通信技術)を活用した情報化によって温室やハウス内の環境を巧みに制御することで、生産コストや消費エネルギーを低減し、しかも、現場での生産性改善に結びつくQC活動のためのフィードバックループを機能させることも可能であると考え<sup>4)</sup>。さらに、施設という境界を通じた、物質・エネルギー・情報の出入りを管理可能にすることによって、原材料価格高騰、環境問題、野菜の自給率低下などの諸問題に対処し得る持続的精密施設植物生産の達成も夢ではない。このためには、施設園芸、植物工場におけるこれまでの研究開発の成果・経験を活かせる環境制御システムの導入が大切である。そこで、今後の植物工場的な環境制御システムとして考えられる

方向性を展望してみたい。

## 2. 太陽光利用型の制御は外乱との戦い

環境制御等の面で、完全制御型植物工場との比較を図1に示す。太陽光利用型の施設は、断熱材無しで地面と接し、光透過する薄い被覆材でカバーされている。地上部のほとんどが窓でできているような建築物である。このため、外気温・放射・風向風速などの周辺の環境変化(外乱)の影響を受けやすい。かつて施設園芸分野では、この影響の根本的解消のために、ペレットハウス、トレンチハウスなどの研究開発が行われたが、解決の困難な課題が多く残されており、残念ながら普及には至っていない。しかも、天候・季節・緯度によって、利用できる太陽光の照射時間・強度・角度は大きく変化する。完全制御型植物工場では、温度、光強度などを植物生産に最適な一定値に制御できるのが当たり前であるが、太陽光利用型植物工場でそれを現実的なランニングコストで実現することは不可能なケースがほとんどである。

このような施設での制御方法は、完全制御型植物工場と全く異なったものになる。たとえば、気温を制御する場合には、図2に示した通り、上限の制御設定値(換気設定気温)と下限の制御設定値(暖房設定気温)の幅を大きく取って、その間に気温があれば制御せず成り行きになる。したがって、実際の気温は、これらの設定気温と一致しない場合が多い。図は一例で、実際の気温の変化パターンは天候・季節で大きく変化する。このような特性を知らず、夜は暖房設定気温、昼は換気設定

気温に温室の気温は制御されていると短絡的に考えがちである。つまり、日本の施設生産者は冷暖房の制御設定値をどうするかには興味を払うが、施設内の気温が実際にどのように変化しているかを測定し、確かめることの大切さについては、なかなか理解してもらえないのが現実である。オランダの施設生産者においては、このような施設環境制御の特徴をわかりやすく説明する啓蒙書が出版されていたり<sup>5)</sup>、技術支援があったりし、常識としてかなり浸透しているようだ。

完全制御型植物工場のように秒単位の時々刻々の正確な定値環境制御を積み重ねて、最終的に精密な植物生産を達成するのは困難なので、変動する環境を正確にとらえて、できるだけ省エネルギー的に補償し、最終的に精密な植物生産の実現を可能にする方法論の確立が大切である。また、気温だけでなく、湿度、培地温、CO<sub>2</sub>濃度、光強度など、競合・連動し合う各種の環境要因について、それらをどのように総合的に制御し、望ましい植物生産に結び付けていくかという点の研究展開も不十分である。これらの問題解決に大きく期待できると考えるのが、ICT(情報通信技術)を活用した情報化である。以下では、具体的に考えてみる。

### 3. 時間スケールを考えた環境制御システム

植物は、もともと変動する環境の中で成長している。積算温度という考え方があるように、ある期間の平均値が成長に影響する。つまり、環境を秒や分単位で一定値に保つような制御の必要性は必ずしもない。太陽光利用型施設では、外乱による変動にあまり逆らわずに、それをうまく利用した環境制御技術を開発しなくてはならない。これまでも、日射比例制御や変夜温管理など、複合環境制御の一部に省エネ目的でその考え方が導入された<sup>6)</sup>が、それ以上の進展は見られない。

まず、環境制御する目的を時間スケール別

に考えて、そのスケール単位で環境を正確に制御する必要がある。どのような時間スケールが考えられるか、表1に一部整理してみた。1分程度の単位で制御する必要があるのは、枯死に至るようなダメージを受ける極端な環境、または、大きな環境変化速度を回避することではないだろうか。それが一日単位になると、日周変化に起因する環境制御や日単位の植物生産目標達成の制御のために、達成する環境にある程度の縛りが出てくる。さらに、数日から1週間の範囲で寒波の襲来に合わせて気温などをうまく変動させるような考え方が大切になると考える。そして全体としては、計画生産が達成できるような方向での開発が望まれる。

図2のような、時刻を横軸に、暖房と換気の環境設定値を縦軸にした、1日分の細かい2本の折れ線グラフで気温の環境制御設定を行う方法から脱却する必要がある。つまり、瞬間的にはこれ以上やこれ以下にはしない限界値を設定しておき、日単位、週単位、生育ステージ単位のそれぞれの期間で、ある許容範囲内で環境制御する値を設定し、それぞれの期間の実際の環境測定平均値をフィードバック情報として利用して、ずれを補償していくという考え方が重要になる。しかも、期間が長くなるほど、その平均値(積算値)の正確性は強く求められる。

このような制御の実現には、分単位の各種環境測定値を記憶しておき、それらから任意の期間の平均値を求める必要がある。これは、コンピュータによる計測制御システムを利用することで容易に実現できる。この種の考え方に基づくICTを使った精密制御の方法論としてファジィ制御を使用するもの<sup>7)</sup>、期間平均値を使用するもの<sup>8)</sup>などが検討されており、これらをベースにした展開が期待できよう。また、今後の天候の変化を予測して適応していくことも重要になるので、ICTを使った週間天気予報などの情報活用が重要である

と考える。このようなシステムも一部提案されている<sup>9)</sup>。

#### 4. 植物生産モデル内蔵のシステム

複数の環境要因をどのように調和させて植物生産のための総合的な環境制御を実施するか、という問題は悩ましい。例えば、温度と湿度の2要因をどのように調和させるかという点でさえ、明確に答えを出している環境制御システムが今あるだろうか。やはり、その環境が与えられたら、植物がどう反応するかを知っているシステムを考えていかなければならないのではないか。

この実現には、植物生産モデルを内蔵させるか、時々刻々の生産量や品質データを環境データと同時に収集して、その関係から局所的な植物生産モデルを自動生成して、それらに基づいた環境制御の実施や評価が可能なシステムへ進化させることが考えられる。この実現にはICTの活用が不可欠である。

温度と湿度の例で述べれば、生産者に明期の気温と湿度の経時変化グラフを提示するだけでは、この環境が植物成長にとって良いのか悪いのか理解しにくい。しかし、気孔が開く飽差の範囲がある植物でほぼ決まっているという気孔開度の簡単な仮定が成り立てば、蒸散やCO<sub>2</sub>流入の増大による成長促進を目的とした環境制御の方針が得られる<sup>10)</sup>。例えばICTを使用してその達成状況を図3のような形式で生産者に提示できればどうであろう。点数表示で1日の環境制御達成状況を評価し、環境制御の改善のヒントを得ることができる。このような環境制御システムを実用化できれば、生産現場に改善サイクルを機能させることができよう。

BIX-pp という植物生産情報の標準化規格で環境データと植物生産データを同時に収集比較可能なシステム<sup>11)</sup>を使い、自己の施設の生産量が収穫日の何日前のどの環境要因に大きく関係しているかを分析できる局所的植物

生産統計モデル自動生成ソフトウェアも開発されている。図4は、そのシステムを使用してあるバラ切り花生産施設のある品種の採花本数と関係する環境要因の解析を行った例である<sup>12)</sup>。採花日の27日前の23日間の室内気温日較差の平均値と関係が大きいことが示されている。生産量予測システムにも利用でき、数か所の大規模生産施設で試験的に使用された。このような機能を環境制御システムに組み込むことによって、植物生産のための新たなシステムの展開が開けると考える。

さらに進んだシステムとして、植物工場を単なる植物の収容施設と考えるのではなく、ICTによる植物個体モデルを利用して植物が施設に対して要求を仮想的に出し、相互作用する自律分散システムを活用して環境制御するシステムも開発されている<sup>13)</sup>。大きな施設の環境を均一に制御することは極めて難しい。このシステムは、逆に施設内の環境ムラを利用して、異なる好適環境を要求する多種の植物が、自律分散システムの持つ創発性により、一つの施設内でコロニーを生成して自律的に移動して棲み分けるようにできる。これは、完全制御型種苗工場向けに開発されたものであるが、外乱の大きな太陽光利用型にこそ利用価値があるシステムであると考えている。

#### 5. 持続的施設生産に寄与するシステム

太陽光利用型植物工場の外殻は温室である。温室は、太陽エネルギーのコレクタであり、自然エネルギーを農業に活用するものである。それにもかかわらず、昨今の社会情勢では、温室を使う施設園芸は化石燃料を消費するなど、反持続的農業生産のイメージが強い。私の前職場である電力中央研究所では、1986年頃に太陽光併用型野菜工場の研究を実施していた<sup>14)</sup>。冷暖房を行って、換気設備の無い温室でハウレンソウやサラダナの養液栽培生産を試みた。この時には、冷房で電気エネルギーを使用するならば、換気したほうがどれほど簡単

かと悩んだものである。しかし、考え方を改めてみると、温室で収集した太陽エネルギーを無駄にせず活用するシステムをこの時に検討すべきではなかったのではないだろうか。今やオランダでは閉鎖型温室が普及段階に達している。閉鎖型温室によって、エネルギーが19%節約でき、トマトの収量が22%増加し、水使用量が50%節約でき、化学農薬が80%節約できるそうである<sup>15)</sup>。日立製作所では、植物工場研究の一環として、外部蓄熱を使った長期蓄熱式ソーラーグリーンハウスの開発もしていた<sup>16)</sup>。日本の技術力を導入すれば、今なら、自然エネルギーを有効活用し、エネルギー、水、炭素、窒素などの出入りを管理できる閉鎖型の太陽光利用型植物工場の開発も不可能ではないと考える。そのための各種ハードウェアの改良・開発も重要であるが、ICTを活用し、集熱器、熱交換機、蓄熱装置、ヒートポンプなどの多種多様な機器を経済的・統合的に運転し、物質・エネルギー・情報の出入りを直接監視・制御できる新しい環境制御システムの開発が、その実現の鍵になるであろう。

#### 引用文献

- 1) 板木利隆ほか(1975)、植物工場システムの可能性(座談会録)、特集・農業と計測制御、計測と制御、14(6)、448-459
- 2) 高辻正基(1979)、植物工場、講談社ブルーバックス、B410、1-232
- 3) 日本施設園芸協会編(1986)、植物工場のすべて、富民協会、1-173
- 4) 日本施設園芸協会編(2008)、高収益施設園芸を支える情報統合ソフトウェアの開発最前線、第29回施設園芸総合セミナーテキスト、45-65
- 5) P. G. H. Kamp and G. J. Timmerman (日本施設園芸協会監修)(2004)、コンピュータによる温室環境の制御、誠文堂新光社、1-197
- 6) 板木利隆(1983)、第1章7.複合環境制御とコンピュータ利用、施設園芸、誠文堂新光社、235-246
- 7) 星岳彦(1992)、図形と言葉で制御方法を表現した拡張ファジイ環境制御の基礎的検討、農業気象、47(4)、225-232
- 8) 狩野敦(2001)、平均気温制御を導入したコショウラン栽培技術の開発、農業環境工学関連4学会合同大会講演要旨、p.212
- 9) 安場健一郎ほか(2006)、ユビキタス環境制御システムを利用した温室温度環境の予測制御、園芸学会秋季大会講演要旨
- 10) 池田英男ほか(2008)、施設野菜生産における環境制御、日本生物環境工学会2008年大会プレシンポジウム「園芸における生物環境調節」、23-31
- 11) 星岳彦ほか(2007)、施設園芸における生産履歴情報の収集と活用のためのフィールドサーバ用アプリケーションプログラムの開発、農業情報研究、16(1)、1-8
- 12) 星岳彦ほか(2003)、過去の日平均データを用いたバラ切花生産に影響する主要因の探索と位相事例ベースモデリングを用いた生産量予測、植物工場学会誌、15(1)、20-26
- 13) 林泰正(2005)、植物主体という発想の施設園芸とは?、ネイチャーインターフェース、27、34-36
- 14) 関山哲雄ほか(1986)、高能率野菜生産技術の開発(1)基礎実験設備の性能とハウレンソウの栽培試験、電力中央研究所報告、485031、1-49
- 15) 東出忠桐(2008)、オランダにおける施設園芸の現場に活かされる研究、施設と園芸、142、67-71
- 16) 内田多賀雄ほか(1980)、ソーラーグリーンハウス地中長期蓄熱の方法、農林水産技術研究ジャーナル、3(7)、32-36

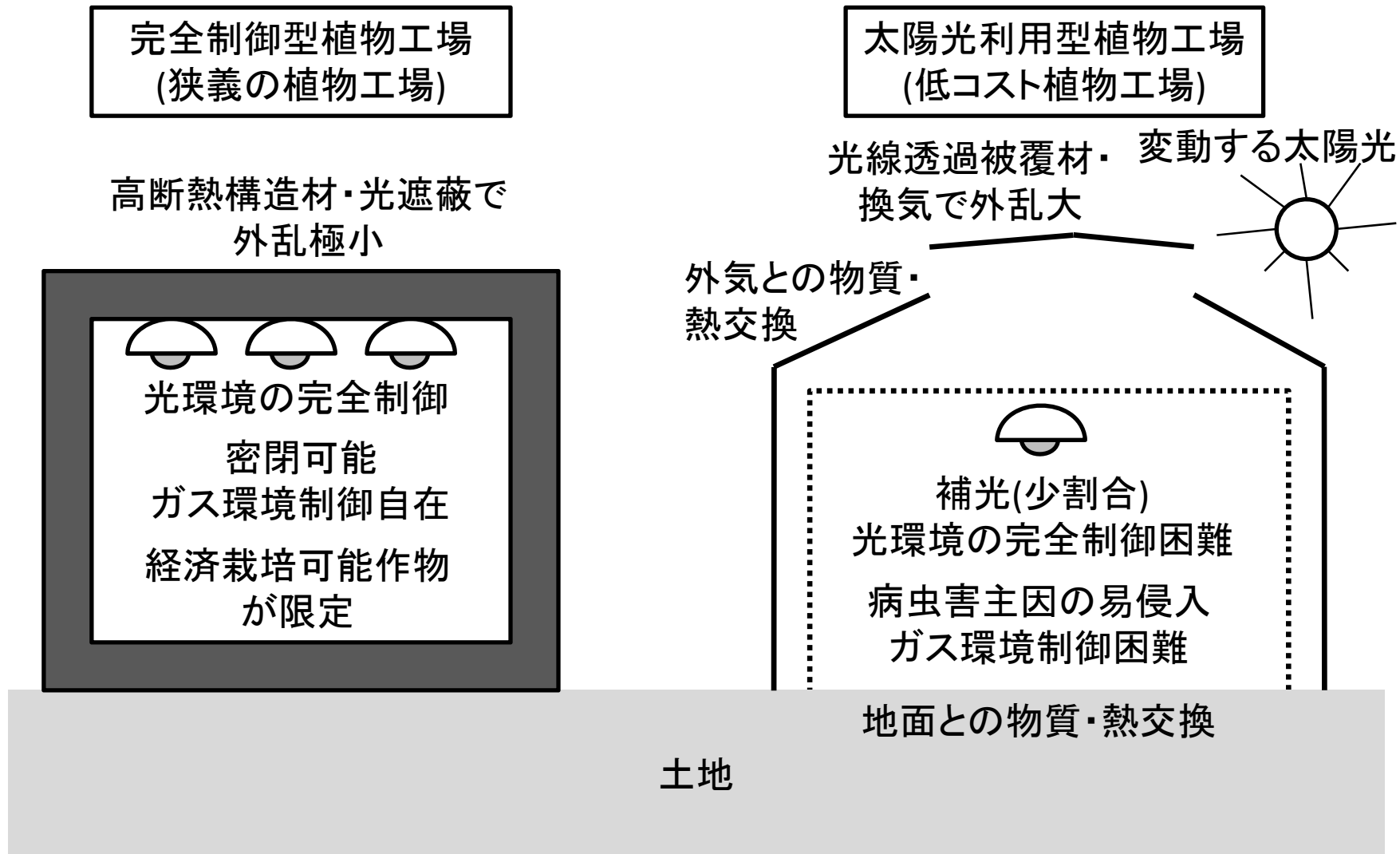


図1 完全制御型植物工場と太陽光利用型植物工場の特徴の比較







