

人工光型植物工場の進歩と発展方向

古在 豊樹
千葉大学名誉教授

1. はじめに

近年、植物工場に対する期待が世界的に強まっている。特に、食料・飼料、環境、エネルギー・資源の世界的な不均衡（不足、偏在、変動および過剰使用）に関する3すくみ問題（3つの課題が相互の抱える矛盾）は深刻さを増しつつあり、その解決への植物工場の貢献に関する期待が強まっている。2050年には、世界人口約90億人の約70%が農産物の消費地である都市に居住する一方で、農産物の生産地である農村人口の顕著な減少と高齢化の進行が、上述3すくみ問題の深刻さを増大させている^{1,4,9,10)}。3すくみ問題とは、1つの問題を解決すると他の2つの問題の状況が悪化する問題を言う。3すくみ問題の解決には、3つの問題を一石三鳥的に同時並行的に解決する方法論と技術が必要であるが、植物工場はその方法論と技術を提供できると期待されている。植物工場に関心が強まっている社会的背景を表1に示した。

表1 植物工場への関心が世界的に高まっていることの社会的背景

番号	事項
1	食料の安全・安心・高品質・安定供給への志向。健康・生活の質向上志向
2	世界人口の増大と都市人口比率の増大。都市における高齢者比率の増大
3	農業就業者人口の半減および農業就業者の高齢化
4	自国・地域における生鮮食料自給率の増加要求。フードセキュリティ（食料安全保障）向上への需要増。寒冷・熱帯・乾燥地域・国における周年安定植物生産需要の増大
5	遠隔生産地から消費地への輸送・包装・貯蔵・輸送中損失による資源消費量・コストの削減要求。地産地消によるフードマイレージの削減
6	近年の光源・空調・断熱・情報処理設備コストパフォーマンスの向上
7	都市内の資源循環利用促進、雇用創出、生活・教育改善のための都市農業の重要性の向上
7	かん水用水量の世界的不足とコスト高による節水栽培と水循環利用対策
8	異常気象、気候変動による作物収穫量の不安定化と価格乱高下の対策
9	経済定常化による失業者の増大と社会の不安定化。人間関係の希薄化

植物工場は太陽光型植物工場^{4, 7)}と人工光型植物工場^{5, 9)}に大別される。太陽光型植物工場の特徴の比較については、古在(2009)および古在(2012)を参照されたい。本稿では人工光型植物工場)についてのみ述べる。まず、人工光型植物工場の特徴とそこでの商業生産に適した植物の種類について述べる。次に、人工光型植物工場の特徴、普及状況と採算性、土地生産性などについて述べ、最後に、省資源的・環境保全的な特長を述べる。なお、本稿では、紙幅の制限のために、重要事項の記述に重点を置き、その理由や背景についての詳細な説明は省略した箇所が多い。詳細の多くは参考文献に述べられている。

2. 人工光型植物工場の特徴

人工光型植物工場の特徴を表2に示す。表2で太陽光型植物工場の特徴とほぼ重なるのは番号2だけ、およそ重なるのは番号7と番号15だけである。人工光型植物工場では、施設の断熱性と密閉性および機器による制御性を格段に向上させて、地上部環境と根圏環境の安定性の維持は施設構造と機器による制御により行う^{5, 6, 9)}。結果として、植物工場内環境は気象に影響されないことから、人工光型植物工場を用いた栽培では露地栽培とは次元の異なる知識と経験が必要となる。なぜなら、気象と害虫の侵入をほぼ完全に防げるので、比較的単純な植物-環境系における植物生理生態の理解、理詰めの分析力と解決力、工学技術を使いこなす技量、および栽培システムの絶えざる改善能力が必要である。人工光型植物工場での栽培結果のほとんどは、その設計者と栽培管理者の責任であり、収量と品質の高低を気象や害虫の侵入に帰することは許されない。

表2 人工光型植物工場の長所と短所(番号⑭~⑯は短所)

- | | |
|----|--|
| 1 | 無農薬、夾雑物ゼロ、収穫物の殺菌・洗浄不要で加工工程の大幅簡略化可能 |
| 2 | 養液(肥料溶液)の循環使用により、養液の排液がほぼなし。肥料使用料節減 |
| 3 | 葉からの蒸散水を冷房時結露水として95%回収し、かん水量は温室の約1/50。 |
| 4 | 冬期の夜間でもランプ発熱を暖房熱源とし、暖房コストはゼロ(冷房が必要) |
| 5 | 地産地消。生産地と消費地の接近による輸送の資源・コスト、野菜傷みの節減。 |
| 6 | 快適労働。周年にわたり気温20~25℃の気温。軽作業のみ。安全作業 |
| 7 | 気象・季節等によらず、計画生産、安定収量、安定品質、安定生産コスト |
| 8 | 土地面積当たりの年間生産量は露地の約100倍以上。狭い土地で高生産量 |
| 9 | 野菜の品質を環境管理により経年的、体系的に向上し、労働生産性が高い |
| 10 | 栽培ノウハウ、環境管理ノウハウの多くを気候・地域によらず世界標準化し得る |
| 11 | 同じ植物種を用いても、商品の外見、味などが異なり、事実上の新商品となる |
| 12 | 2013年時点では、日本の研究水準、技術水準、普及水準は世界一 |
| 13 | 生産された植物体の商品化率が高い。病虫害や枯死による損失がほぼ皆無。 |
| ⑭ | 高度技術が必要で設計・管理の人材不足。各種研修プログラムの開発が必要 |
| ⑮ | 栽培品目が機能性植物に限定される。機能性を高める環境調節法が未開発 |
| ⑯ | 現状では初期コストと運転コストが高い。今後の開発要素が多い。 |

他方、露地栽培では、複雑であいまいな植物—環境系での経験と判断力が重要である。また、園芸施設や太陽光型植物工場では、気象の影響を内部環境が受けやすいだけでなく、施設外部から害虫の侵入が不可避なので、害虫に起因する病害に関する知識、予防および対処が重要となる。農業生産全体の安定は、露地栽培、簡易施設栽培、太陽光型植物工場などの多様な栽培方式の特徴を多様な農園芸植物の特徴と組み合わせてバランスよく関連付けることで増大する。

3. 人工光型植物工場の対象植物

(1) 植物系食料の種類

植物由来の食料は次の3種に大別できる。1) カロリーの補給を主たる役割とする穀類(コメ、コムギ、ジャガイモ、トウモロコシなど)とイモ類(以下では、カロリー(熱量)性植物と呼ぶ)。カロリー性植物の一人当たりの年間消費重量は多く、またその重量単価は比較的低い。2) 機能性成分(ビタミン類、薬効成分、色素類、繊維、香り・味成分、多糖類など)の補給を主たる役割とする野菜類、薬草類・香草、果物類などで、カロリー補給は主目的ではない植物(以下、機能性植物と呼ぶ)、および3) 両者の中間(バナナ類など)である。

(2) 対象植物

人工光型植物工場での商業生産に適しているのは機能性植物の一部である。カロリー性植物や中間植物を人工光型植物工場で十分に栽培できるが、重量単価が低いので商業生産には適していない。人工光型植物工場では、土地生産性を高めるために、5~15段程度の光源付き多段棚(棚の上下感覚は約40cm)を用いた生産を行うので、収穫時の草丈が30cm程度の植物が生産対象となる。ただし、草丈が約30cmに達した時に地上部だけを刈り取り、地上部を繰り返し再生させる方法がある。加えて、生産期間が1~2か月、栽植密度が100本/m²以上、最適光強度が比較的低い植物種であり、植物体の大部分が商品となり、重量当たり単価が比較的高い植物が対象となる⁵⁾。

具体的には、野菜では、葉もの野菜(レタス類、ホウレンソウ、ミズナ、コマツナ、チンゲンサイ、シュンギク、小型ハクサイなど)、小型根菜類(コカブ、ハツカダイコン、小型ニンジンなど)およびハーブ・薬用植物(薬草)などである。今後は、イチゴやブルーベリーなども対象になり得る(表3)。なお、植物工場で苗生産に特化したものがある(商品名:苗テラス)。その苗は、園芸施設、太陽光型植物工場または露地に定植され、栽培されるもので、日本では、既に普及している²⁾。

今後、植物工場における薬用植物の生産も産業化してゆく。また加工食品および冷凍食品さらには専門業者用の病院食・離乳食の材料に植物工場産のものが使用されるようになり、将来的には、生サラダ用葉もの野菜の現在のマーケットの1万倍以上のマーケットとなり、新産業が形成される(表3)。

表3 人工光型植物工場で今後生産されると予想される植物の種類と用途の例

番号	用途	植物例
1	生野菜、カット野菜	多くのレタス類、ホウレンソウ、ミズナ、シユンギク、ルッコラ、ミツバ、小型カブ、コマツナ、チンゲンサイ、小型葉ダイコン、ハツカダイコン、クレソン、イチゴ、アサツキ、ワケギ等
2	冷凍野菜、冷凍食品、乾燥野菜	ニラ、ハクサイ、キャベツ、ニンジン、コマツナなど、餃子などの具材。
2	ペースト	ホウレンソウ、小型ニンジンなどの離乳食、病院食、病人食、後期高齢者食
3	ソース材料、ドリンク剤材料	バジル、ミント、タイム、セージなどのハーブ類
4	漬物類・キムチ材料	タカナ、ハクサイ、ニラ、キャベツ、コカブなど
5	鍋物野菜・中華料理の野菜食材	ハクサイ、シユンギク、ミツバ、食用キウなど
6	香草、香料、香辛料、染料	バセリ、香菜、ペニバナ、サフラン、セリ、ラベンダーなど
7	薬用植物(生薬原料)	当帰、ブルーベリー、ケシ、薬用セッコク、センブリ、トリカブト、オタネニンジンなど
8	薬草・機能性野菜・粉末材料、医薬品材料(ワクチン、抗がん、歯周病)	シソ、ワサビ、モロヘイヤ、ヨモギ、葉ニンニク、ニガ、セイヨウトネリソウ、サフラン、イチゴ、ヨモギ、オオバコなど
10	苗、探根	すべての植物種の苗、探根用栽培

4. エネルギーと機能性成分の変換過程

以下では、人工光型植物工場を、単に、「植物工場」と呼ぶ。植物工場における植物生産過程は、1) 電気エネルギーの光エネルギーへの変換、2) 光エネルギーの植物の炭水化物への変換、3) 炭水化物の機能性成分への変換、および4) 商品部分への変換、に分けられる。

(1) 光エネルギーへの変換

電気エネルギーの光合成に有効な光エネルギー（波長400～700 nm）への変換比率は蛍光灯で25%、LEDチップでも現状では40%程度が上限である。LEDチップを集積してLED照明装置とすると、装置の変換比率は、電子回路での電力損失、LEDチップの温度上昇、LEDチップを保護するプラスチックのカバー・フィルムなどにより、現状では、30%前後に低下したものが多く、25%を下回るものもある。利用の際には、LEDチップではなく、LED照明装置の変換比率、その変換比率におよぼす照明装置温度の影響、その経時的低下に関する資料を検討すべきである。

(2) 炭水化物への変換

光エネルギーの一部は、光合成作用により、植物体が有する炭水化物の化学エネルギーに変換される。この変換比率は、現状では、せいぜい、2～6%（電気エネルギーの1～2%）であり、植物の光合成に最適な環境でも10%（電気エネルギーの5%）程度が上限である。つまり、電気エネルギーの95%前後は工場内で熱エネルギーに変換され、その熱は

室温維持のためにエアコン冷房により工場外部に排出される。なお、植物の炭水化物の原料は、空気中から葉の気孔を通して取り入れられたCO₂と根から吸収された水と無機肥料である。

より正確に言えば、光合成は光化学反応であるので、光エネルギー量ではなく、波長400～700 nmに対応する振動数（波長の逆数）を有する光量子（光子とも言う）の数に直接的に関係する。同数の光量子の場合、赤に相当する光量子が有する光エネルギーは青のそれより数十%低い。したがって、青より赤の方が、数十%少ない光エネルギー（電力消費）量で同じ光合成量を得る。ただし、実際には、赤だけで植物を成長させると形態形成（説明は後述する）に異常をきたすので、青などを加える。

(3)機能性成分への変換

植物の炭水化物の一部は、植物の二次代謝により機能性成分に変換される。植物構成物質の質的变化である機能性成分への変換過程は、量的成長（栄養成長）である光合成反応とは植物生理学的メカニズムが大きく異なる。機能性成分への変換過程は、栄養成長から生殖成長への変換あるいは環境ストレスに対する植物の防御反応・形態形成作用であることが多い。

(4)商品部分への変換

植物工場で栽培された植物体（葉、根、茎などからなる）のうち、商品となる重量割合と機能性成分量が共に多いほど、経営採算性が向上する。従来、根部だけを利用していた植物の地上部も商品とする、逆に地上部だけを利用していた植物の根部も利用する、あるいは、植物残差の重量比率を最小化するなどして、植物体の商品比率を最大化することが重要である。葉もの野菜の根部が破棄される場合は、根の機能である水、肥料および酸素の吸収と地上部の支持機能を抑制することなく、根量を最小化するための環境調節が重要となる。露地型野菜と同じ品質・形状のものを植物工場生産するのでは芸がなく、また従来の野菜生産農家との競争ひいては圧迫になり得るので、避けるべきである。

(5) 光形態形成

光を刺激（情報、スイッチ）として植物が受け取ることで開始される、花芽形成、発芽、発根、色素合成、胚軸伸長、植物の機能性成分組成の変化などは、光形態形成と呼ばれる³⁾。この光刺激は数種の光受容体で受け取られ、紫外、青、赤、遠赤などの波長の光を選択的に受容する（紫外や遠赤に光合成作用はない）。光形態形成を引き起こす特定波長の微弱な光はLEDを用いて極小電力で発生できるので、今後、植物工場で生産される植物の付加価値を高めるには好都合である。なお、形態形成は光だけでなく、温度、水分、物理的外傷などの刺激でも引き起こされ得る。

5. 植物工場の実例

千葉大学の柏の葉キャンパスにおいて、（株）みらいが運営している植物工場の写真を図1に示す。全床面積は406 m²、栽培室の面積は338 m²である。栽培棚は10段で、9列で

あり、7列が栽培用、2列が育苗その他の用途に使われる。この植物工場で栽培されるリーフレタスは播種から収穫まで約34日間で、その内訳は、およそ、播種から育苗棚への移動までが14日間（発芽まで3日間）育苗日数が10日間、苗の定植後から収穫までが10日間である。1日当たり3,000株弱、1年間（330日収穫）で100万株弱の生産能力を有する。このレタス(約80～90 g/株)の一部は植物工場近くのスーパーマーケットの野菜売り場で、約200円で販売されている。この植物工場は、マネージャー1人とパートタイマー約10人（7時間労働/日）で運営されているので、農家経営モデルとなり得る。企業が安定的に経営するには、一般的には、数倍の生産規模が必要となる。京都府亀岡市の企業（株スプレッド）が経営する植物工場のレタス生産能力は約2万株/日と言われている。最近、台湾において、生産能力6万株/日の植物工場（社名：野菜工房）が運転を開始した。



図1 千葉大学(みらい(株))・人工光型植物工場(リーフ・レタス栽培)
全床面積406 m²、栽培室338 m²、栽培棚10段、9列、毎日約3,000株の生産
(栽培室1 ha当たり、8.8万株/日、2.6百万株/月、3000万株/年)、約2億円/年)

6. 土地生産性

年間100万株の生産能力のある植物工場において、実際の年間生産数を80万株とすると、栽培室の土地面積1 m²当たりの年間生産量は約2,300 (=800,000/338) 株である。レタスの露地栽培での畑1 m²当たりの年間生産量を、20株または30株とすると、植物工場での土地面積当たりの年間生産量は、それぞれ、露地栽培の115 (=2300/20) 倍または約77(=2300/30)倍となる。植物工場レタスの価格は露地のそれより30%以上高いことが多いので、生産額はそれだけ高くなる。葉もの野菜の場合、植物工場の年間の土地生産性が

露地のその100倍程度となる根拠を表4に示す（もちろん、初期コストと生産コストはそれなりに増大する）。

表4 露地型野菜生産に対する人工光型植物工場による野菜生産の相対的な土地生産性の概算例。番号6の要因は、相対的収量だけでなく、その商品価値(販売価格)にも関係する。

番号	土地生産性増大要因	生産性倍化係数	累積係数
1	栽培棚を10段にすることで10倍(N段でN倍、N=5~20)	10	10
2	環境調節により苗移植から収穫までの日数を半減	2	20 (=10x2)
3	年間栽培日数を倍化。収穫翌日の苗移植により、年間360日栽培。	2	40 (=20x2)
4	栽培棚面積当たりの植物本数を、収量低下を伴わずに、1.5倍にする	1.5	60 (=40x1.5)
5	病虫害、高低温、強風、豪雨、乾燥などによる収量低下が無いので、1.5倍	1.5	90 (=60x1.5)
6	収穫時および収穫後のロスが少なく、また、高品質である	1.3	117 (=90x1.3)

7. 初期設備コストと運転コストの一例

2012年時点におけるLED植物工場設備の初期投資とその内訳の例を、安部恒夫氏の資料に基づいて概略を示す。建屋の建設コストは含まれていない（既存建物を使用している）。一般には、設備コストと建屋コストはおおよそ等しいと言われている。

阿部氏によると、2013年時点では、LED照明設備のコストは蛍光灯設備コストの2倍程度である。他方、電気料金はLED照明の方が安価になる。照明設備、栽培ベッド・栽培棚のコスト低下、次いで、空調設備、電気・電源設備のコスト低下が重要である。なお、安倍氏の資料では、室内空気攪拌設備がやや割高となっている。

上述のLED植物工場におけるリーフレタス（生体重量100~120 g/株）の運転コストとその内訳の例を示すと、人件費、電気料金（消費電力量の70% は夜間時間に使用）および設備減価償却のコストの合計が61%を占める。CO₂、肥料、水道水のコストは今後のシステム改善により相当の削減が可能である。現在は約500~1000 kmの距離を輸送している物流コスト、出荷用段ボール箱、プラスチック袋などのコストを、今後、植物工場の直近で販売すれば、削減し得る。以上から、100 g程度のレタスの販売価格が100円/株前後であり、生産物の90%以上が販売できれば、当面は採算が合うビジネスとなり、日本ではそ

のような例が増えつつある。

8. 植物工場の採算性とその要因

2013年5月現在、日本で野菜などの生産と販売をしている植物工場の数は150程度と推定される。減価償却も含めて、植物工場の約20%が黒字経営、約20%が赤字経営、残りの約60%の収支はバランスしていると推定される。黒字経営の企業比率は過去数年上昇し、今後とも上昇すると考えられる。黒字経営企業では、1) 最大生産能力に近い生産量を実現し、2) 生産物の90%程度を販売し、3) 施設栽培野菜の価格のおよそ1.5倍前後の価格で販売できる売り先を確保し、4) それを可能にする高い品質の野菜を計画的に周年生産し、さらには、5) 品質と収量の向上と生産コストの低下を継続して追及している。

9. 生産コストの削減例

生産コストの内訳は、政府・自治体等からの補助金が無い場合、減価償却コストが約30%、人件費が約25%、光熱水料（主に電気）が約20～25%と言われている。電気料の生産コストに占める比率が25%より高い植物工場では、電気エネルギーの利用法が効率的でないと考えられる。

(1) 照明コストと空調コストの比

植物工場の栽培室が高断熱・高密閉で高性能のエアコンを利用すれば、照明電力と栽培室の空調（冷房と除湿）電力の年間消費量の比は、5対1程度であることが理論的にも実験的にも証明されている^{2・5}。他方、現実には、CO₂施用と冷房をしながら換気をするなどの非効率な電力使用が多く、2対1程度の植物工場が数多い。栽培室の照明と空調の消費電力量を個別に計測し、両者の比を監視する必要がある。

(2) 照明時間

1日の照明時間は、24時間の場合もあるが、15～16時間が普通である。長い照明時間が植物の生理障害を与える場合以外は、照明時間を長くするほど光強度が低くても同様な成長量を得る。他方、安価な夜間電力量料金を可能な限り利用するために10～12時間に行っている場合がある。照明時間を短縮すれば植物の成長が遅くなり、生産量が低下する。その成長の遅れを解消するために光強度を高めると、電気料金はそれだけ高くなるので、一般的には、生育障害や成長遅延が生じない範囲で、照明時間を長くして光強度を適度に低くするのが好ましい。

電気料金は基本料金と従量料金の合計であり、基本料金は過去1年間の最大需要電力に基づく契約電力で決まるので、1日24時間の消費電力を平準化すると基本料金が低くなる結果、電気料金が低くなる。つまり、植物工場のランプを一斉点灯・一斉消灯しないで、栽培棚毎に点灯時間帯をずらすなどして、栽培室内のランプの点灯数を1日中同様とすると、照明に関する年間最大消費電力は約2/3に抑制できる。同時に、暗黒にすることによる栽培室の相対湿度の上昇を防げる。さらに、非照明下の植物が暗呼吸により放出するCO₂

を照明下の植物の光合成により吸収させることが出来る。また、冬季夜間の暖房が不要になるだけでなく。冷房用電力の消費量を節減できる。

(3) 植物体の受光率と受光均一性

電気エネルギー利用の最大のムダは、ランプからの光エネルギーの大半が植物の葉に照射されていない時に生じる。植物の葉に吸収されない光エネルギーの割合は、通常の植物工場では50%前後で、育苗時には90%に達する。このムダを改善しないにおいて、LED（発光ダイオード）を導入しても生産コストの大幅な低下は望めない。

同一量の光エネルギーを消費する場合、それを植物体のすべての葉に均一に照射したときに、植物体の光合成量は最大になる。実際には、植物体の上部の葉に多くの光エネルギーが吸収され、下部の葉は生存に必要な光エネルギー量を受け取れず、黄化、枯死している。この問題を解決するには上方光照射法がある⁵⁾。

(4) 葉もの野菜の成長曲線とスペーシング

播種から収穫まで35日前後の葉もの野菜の重量が急激に増えるのは播種後20日以降である。子葉展開以降の植物体間隔をこの成長曲線に、可能な限り、合わせて広げるのが、植物体受光率を高める上でも、床面積を有効に利用する上でも重要である。たとえば、30 cm x 60 cmの播種トレイは300のセル(3 cm x 3 cm)に分かれ各セルに1粒を播く。そして、播種後10日前後に24穴の育苗パネルに移植する。そして、播種後20日後に6穴の栽培パネルに定植する。育苗パネルと栽培パネルは播種トレイと同一サイズで発芽率96%（この程度の発芽率は植物工場では十分可能）だとすると、1枚の播種トレイは12枚の育苗パネルに移植され、それは48枚の栽培パネルに定植される。結局、栽培パネルの合計面積は、播種トレイ、育苗パネル、栽培パネルの合計面積の約80(=100 x 48/(1+12+48)) %を占める。栽培棚の上下間隔が約40 cmであるのに対し、発芽棚と育苗棚の上下間隔は、約10 cm、約20 cmであるとする、床面積比率は、1 : 24 : 192となる。

なお、栽培棚における葉もの野菜が急成長すると、根で吸収されたカルシウムイオンの葉先への移動が追い付かず、チップバーンと呼ばれる生育障害が葉の縁に生じる。これは、葉先に新たな細胞壁を構成するのに必須なカルシウムが欠乏するからである。この症状は栽培時期の急激な成長をやや遅らせるための照明時間の短縮や光強度の低下で軽減されるが、より前向きな解決法が望まれている。

(5) その他

人件費の削減には、手作業の自動化または半自動化が必要である。今後の技術開発課題を表7に要約して示した。他にも、現存の植物工場における投入資源のムダは枚挙にいとまがない。建物、設備、人件費のコストに関しても同様である。上述の項目以外については、参考文献を参照されたい。植物工場技術の今後の改善により、初期投資コストおよび運転コストは現在の半分程度となり、同時に、生産物の付加価値は機能性成分の強化などにより2倍前後になり得る。

表5 電気エネルギーが光エネルギーに変換され、さらに植物体の化学エネルギーへ変換される過程における個別比率と累積比率の概算値の一例。累積比率の可能最大値は5~6%であるので、今後、番号2, 3, 6, 7, 8の改善により、累積比率を数倍に向上し得る。

No.	項目	個別比率(%)	累積比率(%)
1	電気エネルギー	100	100
2	光源から発せられる光合成有効放射	25	25
3	植物体の受光率(栽培期間平均)	60	15
4	葉面の受光率(茎枝等を除く葉の受光比率)	85	13
5	葉面吸光比率(反射と透過を除いた受光)	90	11
6	化学エネルギー固定比率	20	3
7	光呼吸・暗呼吸損失率	50	1.5
8	商品化率(例: 歩留り割合×タス地上部重量/植物体重量)	70	1.0

10. 投入資源の利用効率

(1) 植物工場の基本構造・基本要素と投入資源の利用効率

植物工場の基本構造と6つの基本要素を図2に示す。植物工場の基本は、電気エネルギーまたは光エネルギー、水、CO₂、無機肥料および種子または苗の投入量と熱の排出量を適切に制御して、最大の資源利用効率で植物を成長させることである⁵⁾。それぞれの資源の投入量に対する植物の保持(固定)量の比は利用効率(use efficiency)と呼ばれ、電気エネルギー利用効率(EUE)、光エネルギー利用効率(LUE)、水利用効率(WUE)、CO₂利用効率(CUE)および無機肥料利用効率(FUE)などが定義できる(図3)。植物工場とは、各資源の利用効率を理論的な可能最大値に近づけることを目指すシステムである。WUEとCUEの可能最大値は1.0である。EUEとLUEの可能最大値は、それぞれ、0.05と0.1程度である。なお、高断熱・高密閉の植物工場ではランプからの発熱が間接的に十分な暖房熱源となるので、冬期夜間においても暖房コストはゼロである(冷房する必要がない)。

(2) 施用CO₂利用効率

植物群落の正味光合成速度は、CO₂濃度が2000 ppm程度までの範囲でCO₂濃度が高いほど増大する。そこで、室外大気CO₂濃度400~450 ppmであるのに対し、照明下の栽培室では1000~2000 ppm程度にする。栽培室のCO₂濃度を2000 ppmに維持しても、栽培室の密閉度が高く、植物が成長していれば屋外に漏出するCO₂の比率は10%程度である。CO₂

の価格は100円/kg前後なので屋外漏出は無駄なコストであるが、CO₂濃度を外気のそれより高めない植物工場は存在意義がほとんどない。栽培室の密閉度は換気回数（時間当たり換気量/栽培室空気容積）で現わされ、0.01回/時～0.02回/時にすべきである。

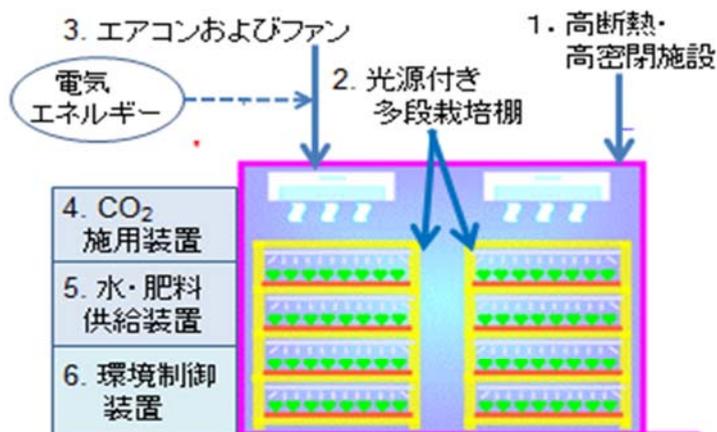


図2 人工光型植物工場の栽培室の基本構造と6つの基本要素。栽培室における電力消費比率は、光源80%、エアコンとファン15%、その他5%程度である。電気、光エネルギー、CO₂、水および肥料の利用効率は、投入量に対する植物の保持(固定)量の百分率として定義される。電気利用効率は1～3%程度、光エネルギー利用効率は2～6%程度、水利用効率と肥料利用効率は、共に、95%程度である。電気利用効率と光エネルギー利用効率の向上が望まれる。

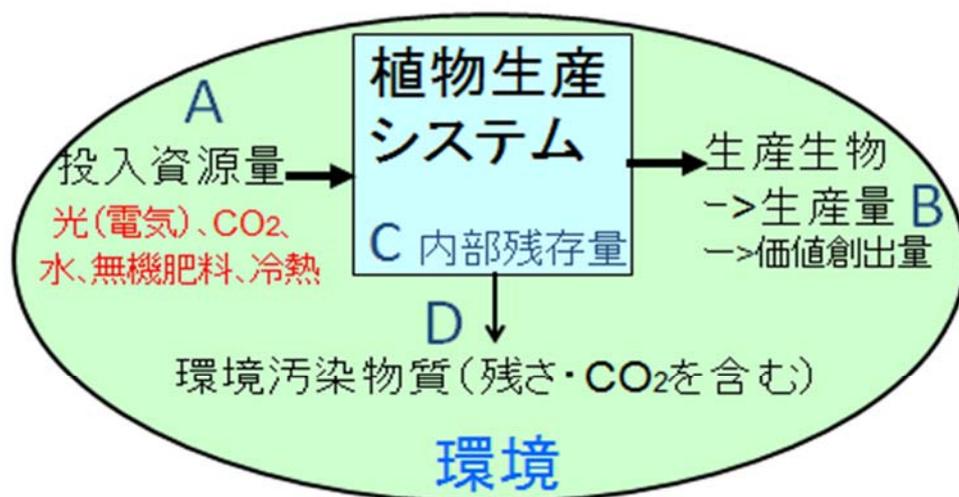


図3 投入資源利用効率(B/A比)の定義とその意味
投入資源利用効率(Aに対するBの比)を最大化(環境汚染物質排出量Dと内部残存量Cを最小化)すると、投入資源コストが最小化される。可能最大なB/A比を実現し得るのが、閉鎖型植物生産システムである。

(3) 園芸施設における資源利用効率との比較

植物工場における各利用効率は、施設栽培に比較して格段に高い。その高い利用効率は、光合成に適切な環境に調節できること、および投入資源が栽培空間の外部に漏出することがないことによる。WUE、CUEおよびFUEに関しては、理論的な可能最大値の90～95%を既に実現している植物工場が存在する。

一般の園芸施設と比較して、WUEは約50倍（図4）、CO₂施用装置を備えた園芸施設と比較して、CUEは約2倍である。土耕栽培の園芸施設と比較して、FUEは2倍以上である。LUEは一般の園芸施設の数倍であるが、未だ、理論的可能最大値の数%であり、今後、2倍以上の改善が見込める（表8）。EUEとLUEを向上させれば電気エネルギーの消費量が少なくなり、電気コストが低下する。

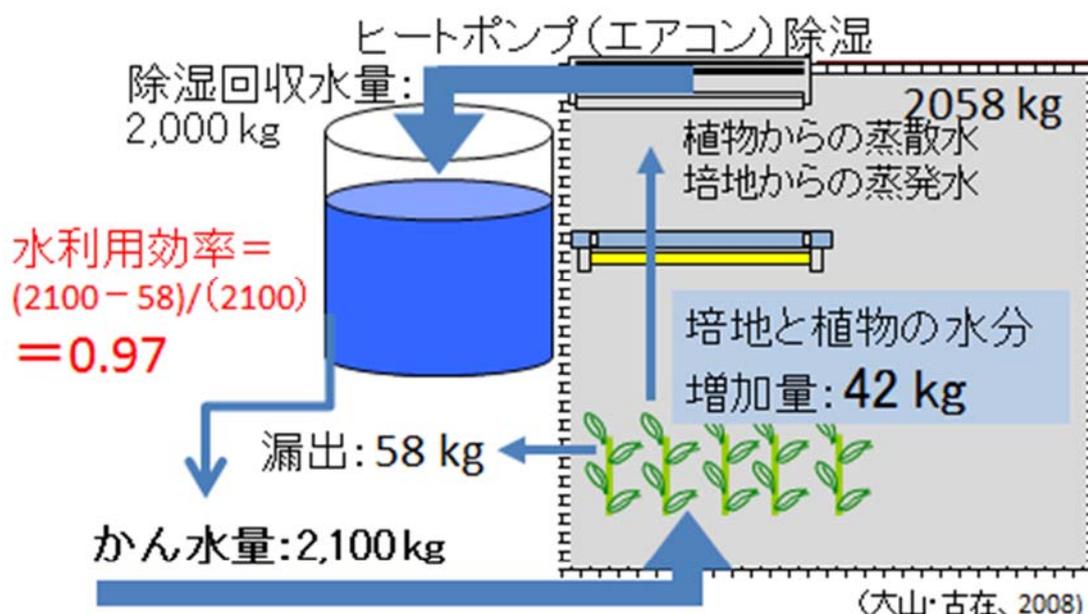


図4 閉鎖型植物生産システムにおける水利用効率の実測例

温室でかん水した場合、蒸散・蒸発した水蒸気は回収できないので、水利用効率は0.02(=2100-2058)/2100kg)となり、48倍(=0.97/0.02)以上の水量を必要とする。

(4) 資源の投入速度と利用効率の連続計測と制御

植物工場では、各資源の投入速度の計測と資源利用効率の算定を連続的に行うことが可能である。また、正味光合成速度、暗呼吸速度、吸水速度などの連続計測も可能である。それらの見える化と解析により、生産しながら資源利用効率を向上させることが出来る。このことこそが、植物工場の最大の利点である。

ただし、植物工場の実際の広い普及に際しては、生産過程における資源消費だけでな

く、植物工場の建設とその将来における維持・廃棄に使用する資源消費を含めた、LCA (life cycle assessment) が不可欠である。なお、冬季に暖房する園芸施設における資源消費の大半は暖房用燃料であるが、植物工場ではランプからの発熱が寒地夜間においても十分以上の暖房熱源となるので、暖房コストはゼロである。

表6 人工光型植物工場の技術開発課題の例

No. 大項目	解決すべき小項目
1 照明	ランプ発光効率、光質、受光率・照明率、光分布、反射板、照射方向、電力消費平準化、照射角度可変照明、明暗サイクル
2 空調	空気分布、気温・葉温、CO ₂ 濃度、水蒸気飽差、気流速度、ヒートポンプCOP、結露液回収利用、殺菌・浄化
3 建屋・棚の構造	栽培棚と建屋の一体構造化、モジュール化、軽量化
4 断熱・気密	壁面と床面の熱貫流係数と換気回数最適化(最小化)
5 衛生・品質	病原菌・昆虫の侵入阻止、生菌数、機能性成分、食味、質感
6 サービス・デザイン	家庭、学校、ホテル、病院、各種店舗、公共施設、集合住宅
7 養液(肥料液)	肥料組成、液温、電気伝導度(EC)、pH、病原菌、根の残差処理
8 作業(半)自動化	種子処理、播種、スパーシング、定植、収穫、調整、搬送、袋・箱詰、予備冷蔵、出荷、計数・計量、サンプリング
9 計測・制御 メンテナンス	状態変数と速度変数の見える化、統合環境制御、時・日・週・月・4半期・年の自動報告、警報、画像解析、ネットワーク化
10 商品開発・育種	食味・色・形・機能性成分、成長・環境・生理病特性、小型植物
11 人材養成、認証	管理者・作業員・経営者研修、安全性認証、広報
12 商品開発	生鮮・漬物、ペースト・粉末加工、生薬・化粧品・香料素材、苗

11. 専用品種の開発と高機能性植物生産

植物工場専用の品種が開発されると、イノベーションを誘起する可能性が大きい。植物工場で栽培する品種は、耐病性や高温耐性、耐寒性、耐乾性などの環境ストレス耐性が不要である。弱光下の高密度栽植で機能性成分を含む矮性植物の育種が植物工場に期待される。耐病性と環境ストレス耐性が不要な育種を人類は有史以来経験したことがない。この育種は植物工場内で実施され、1年に数回の世代更新(受粉・開花・結実)が図れるので、品種育成までの期間が大幅に短縮できる。今後、想像を超えた高機能な遺伝的性質を有する植物工場専用品種が開発される可能性がある。薬草・薬用植物の現代的育種とその利用も広大なマーケットになり得る。

12. 今後の課題

植物工場の土地面積当たりの初期投資は、一般の園芸施設に比較して10倍以上ではあ

るが、年間の生産能力が 10 倍以上（露地における年間生産能力の約 100 倍）であるので、年間生産能力当たりの初期投資は植物工場と園芸施設で大差ない。他方、園芸施設と比較して 1/10 以下の土地面積での生産能力が園芸施設と同じであれば、植物工場の生産量当たりの作業時間は必然的に少なくなる。この 2 点に注目した今後の植物工場の設計と運営の改善が望まれる。

初期投資コスト（初期資源量）の半減と運転コスト（運転資源投入量）の半減が人工光型植物工場の当面の開発目標であるが、遠からず実現し得る。次の目標は、植物工場による生産物の機能性の増大に関する環境調節法と品種の開発である。並行して、植物工場の病院、ホテル、学校、家庭、レストラン、福祉介護施設などでの多様な利用法に関する開発が望まれる。同時に、植物工場の特徴に関する社会的理解を進めることが重要である。

13. おわりに

植物工場は農業における多様な植物生産システムの一形態である。同時に、節電・省資源・環境保全、情報工学、自動化、衛生・品質管理などの幅広い工学技術と植物生理生態・バイオテックを取り入れた植物生産システムである。植物工場は、農業と他産業および農業と市民生活の距離を大幅に縮めることで、農業に対する市民の理解を深める役割も演じる。さらには、農業の新分野を目指す農業経営者が増える契機を提供する。将来的には、環境健康産業の柱になり得る。

農業に関わる私たちは、自身の創造的感性と合理的努力さらには各分野の専門家との協働により、農業関係者の生活の質の向上に加えて、食料生産・環境保全・省資源による次世代を含めた市民の生活全般の質の向上に、伝統農業と自然環境を守ることと併せて、貢献することが期待されている。なお、本稿は、古在(2013c)を加筆修正したものである。

参考文献

- 1) 古在豊樹、1999. 閉鎖型苗生産システムの開発と利用－食料・環境・エネルギー問題の解決を目指して－、養賢堂、191ページ
- 2) 古在豊樹・板木利隆・岡部勝美・大山克己、2005. 最新の苗生産実用技術 閉鎖型苗生産システムの実用化が始まった。農業電化協会、150ページ
- 3) 古在豊樹・後藤英司・富士原和宏、2006. 最新施設園芸学、朝倉書店、231 pp.
- 4) 古在豊樹編著、2009. 太陽光型植物工場－先進的植物工場のサステナブル・デザイン、オーム社、186ページ
- 5) 古在豊樹、2012. 人工光型植物工場－世界に広がる日本の農業革命－、オーム社、228ページ
- 6) 古在豊樹、2012. 植物工場の背景、課題および動向、冷凍 (88(10259)、3－10.
- 7) 古在豊樹、2012. 太陽光型植物工場. エネルギー・資源、33(4)、183－186

- 8) 古在豊樹、2013a. 小型植物工場ネットワーク、日本機械学会誌、116(1132)、168-169.
- 9) 古在豊樹、2013b. なぜ植物工場なのか—その背景、現状および社会的役割、バイオサイエンスとインダストリー、7(3)
- 10) 古在豊樹. 2013c. 人工光型植物工場の可能性. 農業電化. 66(4) : 2-10.
- 11) 古在豊樹、2013. 植物工場と垂直農場から都市農業と農業都市へ—21世紀における都市の食料・環境・資源・生活、植物工場システムと流通技術の最前線、477-490. NTS 出版
- 12) 古在豊樹、2014a. 都市農業における植物工場・施設園芸の役割、(監修：高辻・古在、生産者視点からの人工光型植物工場の運営・経営上の課題と対策、(株)情報機構 (5月発刊予定)。
- 13) 古在豊樹、2014b. 電力の効率的利用のための環境調節。(監修：高辻・古在、生産者視点からの人工光型植物工場の運営・経営上の課題と対策、(株)情報機構 (5月発刊予定)。