

4

# サステナブル人工光型植物工場の 実現方法

Realizing sustainable plant factories with artificial lighting

こざい とよき  
古在 豊樹

植物工場研究会 (NPO)  
会長



古在 豊樹 Toyoki Kozai  
1967年 千葉大学 卒業  
'72年 東京大学大学院博士課程  
修了  
'95年 千葉大学園芸学部 教授  
2010年 植物工場研究会 (NPO)  
理事長  
'17年 植物工場研究会 (NPO)  
会長

Keywords : エネルギー自律, 自然エネルギー発電, 資源利用効率, 生産性

Abstract: 生態的, 環境的, 経営的に持続可能で, CO<sub>2</sub> 排出量削減および SDGs (Sustainable Development Goals) の達成にも貢献する人工光型植物工場の必要条件は, ① 栽培室への投入資源量, 生産物の量と質, 栽培環境, 機器稼働, 植物表現型などの連続計測, ② 連続計測値を用いて算定した資源利用効率および資源生産性と金額生産性の逐次的向上, ③ 密閉・断熱された栽培室の設計と最適化運転, ④ 自然光, 風力などで発電した電気による自律運転, ⑤ 生産物重量当たりの温室効果ガス排出量の最小化, および ⑥ 栽培室とその内部の拡大・縮小・変更が可能な栽培室のモジュール化と知能化である。本稿では, 前記必要条件の根拠と持続可能な植物工場実現方法の概要を検討する。

## はじめに

現存する人工光型植物工場 (以下, 植物工場) は持続可能な植物生産システムとは言えないので, それを持続可能にするための必要条件と方法論を検討する。緑色植物の光合成による成長は, 基本的には, 光照射下で葉からの CO<sub>2</sub> の吸収と根からの水と無機肥料の吸収に依存している。田畑での植物生産では, 光は日射から, CO<sub>2</sub> は大気からコストがゼロで得られる。かん水と施肥のコストはゼロではないが比較的小さい。それでも, 現在の露地や施設での園芸作物生産システムのほとんどおよび植物工場のすべては持続可能であるとは言えない<sup>1)</sup>。この現状

下で, 植物工場が, 生態的, 環境的, 経営的に持続可能な植物生産システムであり, 省資源的, 環境保全的な植物生産をし得る根拠と方法論を本稿で考察する。ただし, 経営的に持続可能なのは機能性植物 (園芸植物, 薬用植物など) であり, 食用植物 (イネ, コムギ, トウモロコシなど) は本稿の対象外である。なお, 世界および日本の社会と農業の現状と問題点に関しては, 本特集の他稿を参照されたい。

## 1. 植物工場の目標とその実現方法

持続可能な植物工場の建設・運営目標は, 第一に, 最小限の投入資源量で最大限の生産量と

Toyoki Kozai : Honorary President, Japan Plant Factory Association

生産価値を気象条件に影響されずに安定的に実現することである。第二に、植物工場の建設と運営に際して排出されるCO<sub>2</sub>量が最小であり、植物工場の耐用年数中のCO<sub>2</sub>排出量が生産物のCO<sub>2</sub>吸収量より少ないことである。このCO<sub>2</sub>排出量は、ライフサイクルアセスメント(Life Cycle Assessment: LCA)法で算出され、正しくは、メタンガスなどを含む地球温暖化ガス排出量と呼ぶべきである。植物工場への投入資源には、土地、建物、栽培機器、電気エネルギー、水、肥料、CO<sub>2</sub>、作業時間などが含まれる。生産物は販売または利用し得る植物体部分である。廃棄物には排水、排熱、植物残渣、使用済み消耗品、CO<sub>2</sub>などが含まれる(図1)。

前記目標の継続的実現には、栽培室への各資源の投入量、生産物の量と質、廃棄物量、環境要因、栽培管理情報および植物表現型(葉面積、生体重、各種化学物質濃度など)の経時的な計測が必要である。IoT(Internet of Things)を

利用して得たこれらの計測値から、各投入資源の利用効率(=生産物への取り込み量/投入量)、各資源(電気エネルギー、作業時間および栽培面積・時間など)に関する生産性(=生産物量/投入資源量)が経時的に算定される。金額生産性は(商品単価/資源単価)×資源生産性として算定できる<sup>2)</sup>。前述の計測と算定が継続的に可能なことが、持続可能な植物工場の必要条件である。

本稿で想定する密閉性と断熱性が高い栽培室では以下が可能になる(栽培室の火事、エチレンや揮発性ガスの集積などの事故時には強制換気される)。1) 気象条件の影響排除、2) 室内への昆虫・微生物などの侵入阻止、3) 栽培室から屋外へのCO<sub>2</sub>および水蒸気の損失の阻止。4) 室内壁面の結露防止、および5) 正確な計測値に基づく資源利用効率と生産性(後述)の高精度な推定。1)~5)の理由により夏期で設定室温が外気温より高くても栽培室は換気で

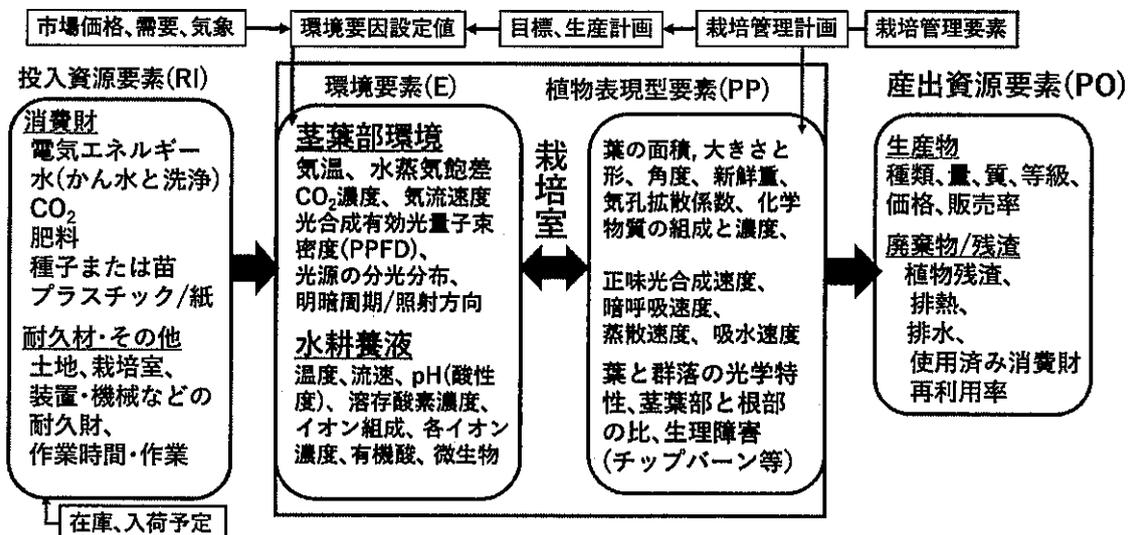


図1 人工光型植物工場の栽培室における投入資源要素(RI)、環境要素(E)、植物表現型要素(PP)および産出資源要素(PO)

栽培室の断熱・密閉性が高いほど、EおよびPPの計測精度が高い。RIの計測精度は常に高く、POの計測精度もかなり高い。PPの計測は多くは、複数の各種カメラ(可視、遠赤、近赤外、赤外)または環境センサー計測値と物質・エネルギー収支表から算定される。本図の要素情報のすべてが、多次元時系列データセットとして蓄積される。

きない。大量な時系列データを各種モデル（メカニスティック、多変量統計、行動、人工知能）の構造と係数値の決定に用いたシミュレーションが生産性の逐次的向上をもたらす。

植物工場による葉もの野菜生産のコスト内訳比率は、2022年現在、減価償却30%、人件費30%、電気代20%、その他（培地、種子、各種プラスチック製品など）20%前後である。白色LEDの高性能化と低価格化などの節電努力により、電気代比率は2015～2022年の間に50%程度低下している。密閉・断熱された栽培室の電気消費量の内訳比率は、概ね、照明75～80%、空調（主に冷房除湿）15～20%、その他の電気機器5%である（図2）。空調用エアコンのエネルギー効率（成績係数）は外気温の上昇に伴い低下するので、空調用電力量の比率は夏期に高く（20%）、冬期に低い（15%）。栽培室以外の電気消費量は条件により大きく変わるので本稿の考察対象には含めていない。

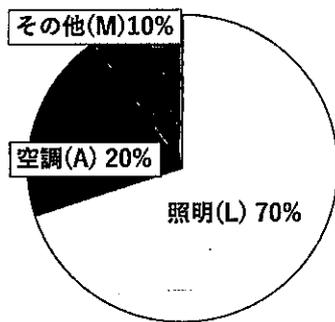


図2 断熱性と密閉性が高い栽培室における照明(L)、空調A(冷房・除湿)およびその他の電気機器M(ポンプ、ファンなど)の消費電力量の百分率の夏期における代表例(文献7より)

日平均外気温が室温より高い時間帯では密閉度と断熱度が低いほど、Aの比率が高くなる。断熱性と密閉性が高い栽培室では、比(M+L)/Aはエアコン冷房時の成績係数(COP)にほぼ等しい。本図の冷房時COPは4(=(10+70)/20)。日平均の冷房時COPは夏期に低く、冬期に高い。関東地方では、COPが3～8の範囲で日変化、周年変化する。エアコン暖房時のCOPは(M+L+A)/A=(M+L)/A+1で、冷房時COPより1高い。

## 2. 生産物あたりCO<sub>2</sub>排出量の削減<sup>1,3)</sup>

植物工場の運転時の消耗品の中で、製造時のCO<sub>2</sub>排出量が多いのは、電気エネルギー、化学肥料およびプラスチック製品（栽培トレイ、袋、箱、培地、フィルム、ヒモなど）である。植物工場建設時に用いる資材で、製造時のCO<sub>2</sub>排出量が多いのは、金属材（鉄、アルミニウム、合金、銅など）、セメント、塗料、建設機械動力である。前記資材の使用量削減はCO<sub>2</sub>排出量と生産コストの削減に共に貢献する。自然エネルギー（太陽光、風力など）による発電の場合の電気エネルギー1 kWh当たりのCO<sub>2</sub>排出量は、化石燃料の場合のその1/10以下である<sup>4)</sup>。自然エネルギー利用の発電コストは化石燃料利用の発電コストに日本でも接近し、また蓄電池のコスト低下も急激であるので、自然エネルギー発電の利用は今後の必須事項である。2019年現在、日本での植物工場での生産物1 kg当たりの電力消費量は7～11 kWh程度であるが、今後、照明および栽培システムの改善による収量と品質の向上と廃棄物量の削減、環境調節全般の改善、品種改良、マーケティングなどにより、生産物1 kgあたりの電力消費量は半減し得る（図3）。プラスチック製品の多くは、不使用、簡易品使用、各種の紙製品、生分解性プラスチック製品での代替が可能である。また金属部材の一部は直交集成板（CLT）などの利用や構造の簡素化で、またセメント床は多孔コンクリートなどで代替できる。以上により、生産コストの半減と生産物あたりCO<sub>2</sub>排出量の75%削減を当面の目標とし得る。なお、北欧の植物工場における葉もの野菜1 kgあたりのCO<sub>2</sub>排出量は、Life Cycle Assessmentによると、0.27～0.74 kgである<sup>5)</sup>。

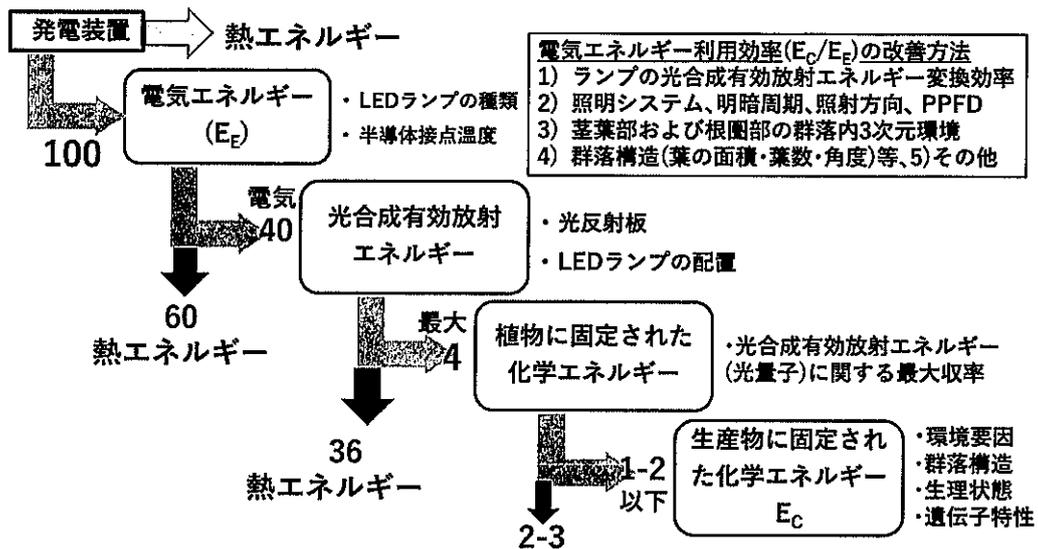


図3 栽培室におけるエネルギー変換過程の概要と数値例および電気エネルギー利用効率 ( $100 * E_c/E_e$ ) の改善方法 (文献7より)

### 3. 明暗期サイクルのずらしおよび正味光合成速度と蒸散速度の算定<sup>6)</sup>

植物工場では照明用 LED ランプを棚または栽培ラックを単位として3グループに分けて、その2グループを常に点灯するのが基本である(図4)。16時間明期の場合は、各グループの明期開始時間を8時間ずらすとそうなる。棚からの光の漏れは最小限とする。3グループ同時点灯/消灯に対する前記の明暗期サイクルの利点

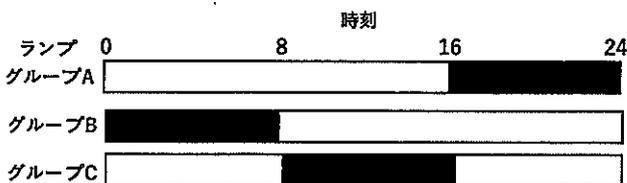


図4 栽培室のランプ点灯サイクルの基本  
栽培室でのエアコン冷房は必ず除湿を伴う。栽培室のランプを3グループに分けて、そのうちの2グループを常に点灯させると、周年・終日にわたり冷房・除湿され、種々の利点がある(本文参照)。3グループを同時時間帯に消灯すると、相対湿度は30分以内に100%近くになり、種々の障害の原因となる。

は、1) 照明電力が終日一定であり、最大照明電力が2/3になるので、電源設備費を削減できる。エアコンの必要冷房能力が2/3になるのでその設備費用も削減できる。2) 終日2/3照明なので、室内CO<sub>2</sub>濃度は終日1,000 ppm程度に維持する。3) 栽培室内のCO<sub>2</sub>濃度が一定で培地微生物からのCO<sub>2</sub>放出が無視し得る場合、栽培室内の植物全体の正味光合成速度はCO<sub>2</sub>供給速度に等しいとして連続的に算定できる。CO<sub>2</sub>濃度の変動、培地の微生物呼吸、作業者の呼吸などを考慮した正味光合成速度も算定できる。4) 終日照明なのでランプからの発熱を除去するためにエアコンで終日冷房する。冷房は除湿を伴うので終日除湿となり、結果的に、飽差(相対湿度)はほぼ適切に維持し得る。

他方、照明用ランプをすべて消灯すると、室内の相対湿度は数十分で100%近くまで上昇し、植物の徒長や生理障害さらには微生物の繁殖の原因となりやすい。5) エアコン冷却面での結露の主たる発生源は葉面からの蒸散した水蒸気である(培地や床面からの蒸発は最小限に抑え

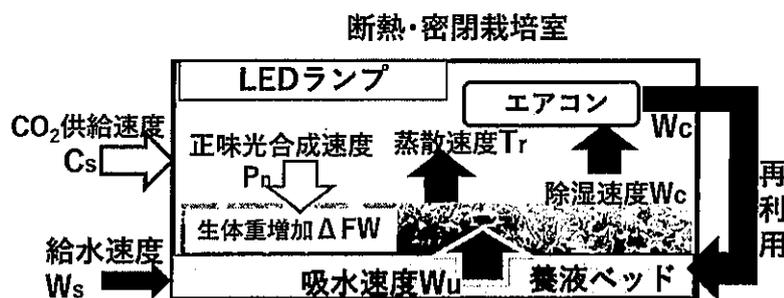


図5 断熱・密閉された照明下の栽培室における植物群落の正味光合成速度 (P<sub>n</sub>) と蒸散速度 (T<sub>r</sub>) の算定方法 (文献7より)

CO<sub>2</sub> 濃度が一定の場合、 $P_n = C_s$ 。培地などからの蒸発がなく、植物からの蒸散だけの場合は、 $T_r = W_c$ 。蒸発もあれば W<sub>c</sub> は蒸発散速度。CO<sub>2</sub> 濃度あるいは水蒸気飽差 (P<sub>a</sub>) の値 X が測定開始時刻 t<sub>1</sub> と終了時刻 t<sub>2</sub> で異なる場合は、補正項  $V_r \cdot (X_{t1} - X_{t2})$  を加える (V<sub>r</sub> は栽培室空気容積)。本方法で、断熱・密閉栽培室では、P<sub>n</sub> と T<sub>r</sub> が正確に計測できる。なお、 $W_s = (W_u - T_r) = \Delta FW$  なので、W<sub>u</sub> と T<sub>r</sub> の測定値から新鮮重量の増加分を推定できる (ただし、W<sub>u</sub> の計測には工夫が必要)。

る)。栽培室では、発生した水蒸気の95%以上は結露水として回収され、かん水に再利用し得るので、必要かん水量は植物が保持し栽培室外に持ち出された量だけとなり、畑や園芸施設のかん水量の1/10以下となる。6) 栽培室におけるエアコンでの結露速度は蒸散速度に等しいので蒸散速度を連続算定できる(図5)。7) 栽培ベッドへの養液の供給速度と栽培ベッドからの排水速度の差として植物全体の吸水速度を算定できるので、吸水速度と蒸散速度の差から植物全体の生体重増加速度が算定できる<sup>7)</sup>。8) 植物は光合成で葉内に固定したCO<sub>2</sub>の25%前後を暗呼吸と光呼吸で空气中に再放出するが、栽培室で再放出されたCO<sub>2</sub>は植物に再吸収される。9) 栽培室内壁面における結露を防止できるので、カビや小昆虫の増殖を防止できる。

#### 4. 養液循環方式から養液排水ゼロ化へ

現在のほとんどの植物工場で採用されている養液循環方式では、補充水、肥料原液およびpH調整液を、総イオン濃度とpH(酸性度)が設定値になるように養液タンクに加え、さら

に溶存酸素濃度と液温を調節した養液を栽培ベッドに戻す。この方式では個別イオンの濃度は調節しないので、植物に吸収されにくいイオン(Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>など)が養液タンクに集積しやすい。また養液タンクと栽培ベッドに藻類、有機酸、枯死した細根、病原菌などが蓄積しやすいので、養液の一部の排水・更新と栽培ベッドの洗浄などが適宜必要とされている。この問題の根本的解決のために非循環養液栽培システムを開発すれば、養液タンクと戻り配管が不要になり、運転コストおよび部品製造時、栽培時のCO<sub>2</sub>排出量は大幅削減されるが、各イオン濃度およびかん水量の調節などに複雑な未解決問題があり、開発に向けた学際的なイノベーションが期待される。

#### 5. 今後の開発課題<sup>6-9)</sup>

植物工場の持続可能性と生産性の向上には重要な技術ではあるが本稿で述べなかった課題には以下が含まれる。1) 非接触で小型かつ安価な表現型計測(phenotyping)装置とその環境制御および環境-遺伝的特性-表現型-栽培

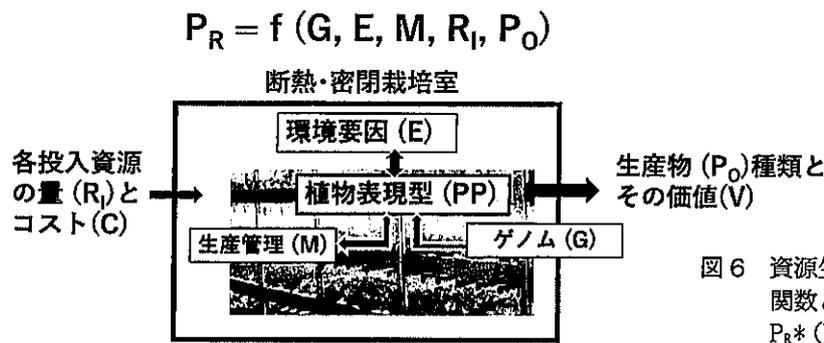


図6 資源生産性 ( $P_R$ ) は  $G, E, M, R_i$  および  $P_O$  の関数としてあらわされ、金額生産性 ( $P_M$ ) は、 $P_R * (V/C)$  として表現される (文献2, 3より)

管理の関数関係解明への利用 (図6)。2) 植物群落内の分光分布と気流速度の3次元均一化および計測制御。3) 品種の育成：目的とする機能性物質濃度の増大, 果菜の矮性化 (節間短縮, 芯止まり), 単為結果性付与 (受粉昆虫不要化), 脇芽成長抑制 (摘葉作業不要化), 葉もの野菜のチップバーン耐性付与と商品化部位比率の増大。4)  $CO_2$  濃度 2,000 ppm 前後の弱光下でも光合成促進。5) 栽培, 収穫, 調整作業の自動化, ロボット化。6) 果菜・小型果樹, 薬用・香料植物, 根菜・球根植物, 結球野菜などの生産。7) 有用微生物の利用。8) 微生物, 魚介類, キノコ類などの閉鎖型生産システムとの統合。9) 人間が働くのが楽しく, 生きがいを感じる植物工場。10) 樹木などを含む多様な植物苗および牧草の周年生産。11) 植物工場のローカル/グローバルなネットワーク。12) 多目的関数最適化のためのソフトウェアとネットワークおよびデータベース開発, 13) 生産, 育種, 研究開発の一体化と期間短縮, および 14) 国内的, 国際的は各種の連携。

### おわりに

現状の植物工場では, 慣行の露地栽培と比較して, 収量1トン当たり, 概ね, 土地面積は1/100以下, かん水量は1/10以下, 収量・品

質の年変動は1/10以下, 無農薬である。しかし, これだけでは, 持続可能な生産システムにはほど遠い。今後, 本稿で述べた方法論などを導入して, 現行の植物工場に比較して, 生産物1トン当たり, 概ね, 植物残渣1/5以下,  $CO_2$  排出量1/10以下, 作業時間1/4以下, 電気消費量1/2以下, 消耗品と建設資材重量2/3以下とすることが期待される。その詳細の多くは文献3) 6) ~ 9) に述べられている。

### 文献

- 1) 古在 (2022): 施設園芸における  $CO_2$  ゼロエミッション化に必要な技術. 施設と園芸 192 (夏号) 35-42.
- 2) 古在, 浦勇, 甲斐, 林 (2019): 人工光型植物工場に関する生産性指標の種類, 定義, 計算式および注釈. 農業および園芸 94 (8): 661-672.
- 3) Kozai, T., Hayashi, E. (eds.) (2023): *Advances in Plant Factories*. Burleigh and Dodds. (in press)
- 4) 今村, 井内, 坂東 (2016): 日本における発電技術のライフサイクル  $CO_2$  排出量総合評価. 電中研報告. No. Y06. 73 pages.
- 5) Martin, M., Molin, M. (2019): Environmental assessment of an urban vertical hydroponic farming system in Sweden. *Sustainability* 11: 4124 (14 pages).
- 6) Kozai, T. *et al.* (eds.) (2021): *Plant Factory*. Elsevier, 449 pages.
- 7) Kozai, T. *et al.* (eds.) (2020): *Plant factory* (2nd ed.). Elsevier, 487 pages.
- 8) Kozai, T. *et al.* (eds.) (2016): *LED lighting for urban horticulture*. Springer, 454 pages.
- 9) Kozai, T. (ed.) (2018): *Smart Plant Factory*. Springer, 456 pages.