

公開講演会記録

持続可能な人工光型植物工場の 実現方法と社会貢献

千葉大学名誉教授 古在豊樹



1. はじめに

本稿では、人工光型植物工場（以下、植物工場）が世界の食料・資源・環境・生活の問題の同時並行的解決に貢献し、SDGs（持続可能な開発目標 Sustainable Development Goals）の実現にも貢献すると考えられる根拠を述べる。植物工場では、太陽光を通さない不透明な外壁で囲われた清潔な閉鎖型建物内に設置された多段棚の養液栽培システムで植物を人工光（LEDランプ）下で生産をする（写真1）。一見、省資源的でも環境保全的でもなさそうにも思えるLED植物工場が、持続可能な野菜生産システムの有力候補の1つとして世界的に増え



写真1 人工光型植物工場の一例（栽培棚10段、リーフレタス生産）（千葉大学・柏の葉キャンパス内）

はじめたのは2015年頃からである。植物工場の利点と将来性は大きいが、未解決な問題も多い。そこで、植物工場が今後の社会の諸問題の解決に貢献するのに必要な、設計、運営、利用の問題点および課題解決のための考え方と方法論についての概略を述べる（理論的根拠の詳細は参考文献を参照されたい）。

2. 背景

2.1 社会的背景

植物工場への市民の関心が増大している主因は、世界的な都市人口の増大および農業人口の減少と高齢化、さらには安全で良質な食料への保障要求である。他方、副因は、現在の食料生産の基盤であ

る、農地面積、農業用水および化学肥料の原料（リン鉱石、カリ鉱石など）の世界的な不足および偏在である。

農地は面積の不足だけでなく、不適切な農法に起因する塩類集積、微生物生態系の破壊などによる土壌劣化、および近年の高気温、乾燥、強風、豪雨、それらにともなう洪水、害虫発生なども問題である。さらには、農業生産の現場での化石燃料とプラスチック製品の多消費、半乾燥地における大規模な農地や牧草地における灌がい用水確保のための大量の地下水や河川水の汲み上げによる地下水位の低下や地下水源の枯渇などが問題である。

地球温暖化対策としてのCO₂排出量の大削減要求（すなわち、カーボンニュートラル）はもとより、貧困・差別問題の解決および環境保全さらには生活の質全般の向上を2030年までに実現することを目指すSDGsへの農業の貢献が求められている。SDGsにも関連して、安全かつ良質な食料の需要は今後とも増え続けるからである。前述の状況を考慮すると、今後とも高齢化が進む農業人口が、増大する都市人口に良質で十分な食料を提供するのはほぼ不可能である。また、現状のままでは、地産地消による地域毎の食料の安全保障の実現や地域・国

ごとの食料自給率の向上の実現が困難である。

2.2 技術的背景——閉鎖型生物生産システム——

前述の社会的背景の下で、近年、注目されているのが「閉鎖型生物生産システム」である。閉鎖型生物生産システムには、植物工場の他に、昆虫工場（コオロギ、ミズアブ「ハエ目」など）、陸上水産養殖工場（淡水魚、海水魚、貝類、魚のエサとしてのミミズ）、微生物工場（キノコ、発酵製品）などが含まれる。

家畜工場もあるが、家畜による肉・卵・乳製品などの生産には動物福祉の配慮が重要なので、別格となる。昆虫工場では、食用、飼料用（畜産・水産）および機能性製品用としての動物性タンパク質の生産がなされる。陸上水産養殖工場は、乱獲や海水温変化で枯渇しつつある水産資源の生産システムとして注目されている。微生物工場は長い歴史と実績をすでに得ている。植物工場を昆虫工場、微生物工場、陸上水産養殖工場などと組み合わせ、システム全体の廃棄物、CO₂排出量をゼロ化する試みが始まっている。

閉鎖型生物生産システムに共通する目標は、外界から隔離され環境制御された

最小限の空間に最小限の資源を投入し、良質な生産物を周年にわたり安定的・計画的に高い資源利用効率で生産することである。この目標が実現すれば、外界への廃棄物排出量は最小限となるので、環境保全的であり、かつ資源投入コストは最小となる。結果的に、この目標は、宇宙農場の目標と共通する面が多い。将来、人類が月や火星に長期間にわたり居住することになった場合、そこで必要となる食料は、最小限の空間と投入資源を用いた宇宙農場で廃棄物ゼロで地産地消することになる。

この閉鎖型生物生産システムは、立地を選ばず多段式に構築できるので、都市内での生産にも適している。また、このシステムの最小単位をモジュール化することで、家庭用冷蔵庫サイズから高層建物サイズまで自由に設計できる。後者のサイズのもものは、一般的には、「垂直農場（vertical farm）」と呼ばれて、近年、世界的に注目されている。これらシステムに人工知能（AI）、IoT（Internet of Things）、高速ネットワークなどの技術の導入が進められているが、その実用的成果が得られるのはこれからである。

2.3 主な用途と利用拡大の背景

2020年の時点で、日本での植物工場の稼働数は200を超えている。日本における植物工場当たりの日生産量は、その生産規模により、100kg～1000kgと広範囲である。植物工場で生産されているのはリーフレタス、ミズナなどの葉もの野菜がほとんどで、イチゴやトマトなどの果菜類、根菜類、キャベツや白菜などの結球野菜の生産は初期段階である。植物工場とは認識されていないが、閉鎖型人工光苗生産システム（商品名：苗テラス）は日本では数百セットが普及している。信頼できる統計は存在しないが、世界的には、大小の生産規模の植物工場の総数は1000をかなり超えていると想像されている。この数は今後増加すると予測されている。

日本での植物工場の野菜生産量の約60%は業務用で、約40%が小売り用と推定されている。業務用の多くは1kgの袋詰め販売され、サンドイッチ、ハンバーガー、ミックスサラダ、各種料理の付け合わせの具材として、チェーンレストランやコンビニでの販売用のセントラルキッチンおよび中食産業で使用されている。小売り用の大半は、およそ100g単位で袋詰めされ、スーパーマーケットなど

で販売されている（写真2）。定期的透析が必要な腎臓患者用の低カリウム野菜はすでに販売されているが、今後、用途目的を限定した付加価値野菜の生産には植物工場が適している。植物工場産の葉もの野菜が葉もの野菜全体に占める市場占有率は、2020年現在、1%前後と推定されるが、2021年以降、かなり増加すると考えられる。

畑地またはハウス栽培の野菜を業務用に大量に使う場合は、安全性確保のため



写真2 千葉県柏市のスーパーマーケット内で販売されていた植物工場産のレタス類(約100グラム/袋)

に、殺菌水（次亜塩素酸ナトリウムなどの希釈液）での予備洗浄、殺菌水臭除去のための浄水でのすすぎ洗浄、異物混入検査、傷んだ葉の除去などに時間とコストを要する。加えて、繰り返し洗浄中に水溶性栄養素の漏出や食味の低下が生じる。したがって、植物工場産野菜は、安全性、コストおよび品質の点で、有利な点がある。

3. 温暖地の平均的な畑地栽培と比較した場合の長所

3.1 生産者側の長所

①土地面積当たりの年間収量が安定的に100倍以上である（栽培棚は10段と仮定）（表1）。将来的には200～300倍になると期待されている。②気象（強風、大雨・長雨、雹など）・土壌特性・害虫発生などの外部環境の影響を受けない。③植物から蒸散した水蒸気を冷房時のエアコン冷却板に結露させて回収し、それをかん水に再利用するので、必要な正味かん水量は20分の1～10分の1である（根から吸収した水のうち植物体内に保持された水以外は葉から蒸散する）。結露水そのものは不純物を含んでいない蒸留水と同等である。④養液栽培では希釈

表1 畑地栽培と比較した場合の葉もの野菜植物工場（栽培棚10段を仮定）
の土地面積当たりの年間生産量の倍率試算の一例

	要 因	倍率	累積倍率
1	栽培棚が10段（土地面積当たりの栽培面積が10倍）	10	10
2	1作の播種から収穫までの日数が半減（72日→36日）と年間栽培日数の2.5倍増（144日→360日）で、年間作付け回数が5倍（2回→10回）（畑地では、春と秋の2作を仮定）	5	50
3	栽培面積当たり、1作当たりの生産量が2倍（密植による）	2	100
4	異常気象、病虫害による減収がない（1.2倍の増収を仮定）	1.2	120

した液体肥料を循環利用するので、肥料利用効率が高い。また、種子の98%前後が正常に成長して可販商品になるので、種子利用効率が高い。⑤生産目的に添った環境制御により、同じ品種の種子から

異なる品質の生産物が得られる。⑥断熱性と密閉性が高い栽培室での照明に伴うLEDランプからの発熱で、外気温がマイナス40度の冬期夜間でも暖房が不要である（逆に、害虫の侵入遮断、施用したCO₂の外部への漏出防止などのために、室温が外気温より高くても、換気で室温を低下させることはできないので、年間を通じて冷房が必要である）。⑦気温、CO₂濃度などが最適に制御されているので、植物による光エネルギーの利用効率がハウス栽培に比較して2倍前後高い。⑧栽植密度が高く、必要日数が2〜3週間の無病苗生産には最適であり、日本では、すでにかなり普及している（2.3主な用途と利用拡大の背景」で既述）。苗当たりの電気コストは1〜2円程度。⑨栽培室が閉鎖空間で環境が安定しているので、最新技術を導入しやすい。

3.2 消費者側と生産者側の長所

①無農薬栽培で生産物が清浄なので、無洗浄で新鮮野菜を販売できる。ただし、そのためには、食品工場並みの衛生管理が必要（加熱加工用または利用前に洗浄する植物の栽培には前述ほどの厳格な衛生管理は不要）。②生産物収穫後の微生物繁殖による傷みが少ないので、購入後

の日持ち日数が倍増する。③生産能力、品質および生産コストを、年間を通じてほぼ一定にできる。④周年計画生産ができるので、周年雇用が可能（露地栽培と施設栽培では必要労働力の季節変動が大きい）。⑤消費地（都市内など）で生産可能なので、輸送に関わる時間、傷み損失およびコストが低下する。⑥生産過程における環境、作業などの詳細な履歴を自動収集できる。

4. 短所（今後改善が必要な点）

4.1 消費電力量が大きい

現在、生産物1kg当たりの消費電力量は約10kWhである（1kWhは1kWの電力を1時間使用したときの電力量）。現在の生産コストの内訳は、日本での葉もの野菜生産の場合、電気コストが約20%を占め、人件費約35%、減価償却費約25%、および消耗品・維持費など約20%である。

消耗品に含まれる化学肥料のコストは1%前後であるが、その製造時に比較的多量のCO₂を排出するので、その削減は急務である。光合成促進に施用されるCO₂のコスト比率も日本では1%前後であるが、温暖化ガスであるので室外へ

表2 平均的な畑地栽培と比較した場合の植物工場栽培の特徴（長所と短所）

No.	畑地栽培	植物工場栽培
1	収量と品質が気象の影響を受ける	収量と品質は年間安定し、年々向上する
2	作業時間の季節変動が大きい	作業時間は年間安定し、周年雇用が可能
3	日当たりが良く肥沃な土壌が好適	日陰地で荒地・瓦礫地でも問題なし
4	生産量の増大には広い農地が必要	土地面積当たりの収量は畑地の100倍以上（表1）
5	無農薬栽培には多大な人手作業が必要	密閉栽培空間内の衛生管理により無農薬栽培が容易（衛生管理は重要）
6	かん水設備、排水設備の有無は収量と作業量に影響	植物からの蒸散水の再利用により、必要なかん水量は1/10～1/20で、養液のかん水は自動化
7	播種、育苗、収穫、選別、梱包などの機器の年間稼働日数が低い	ほとんどの機器類はほぼ毎日使用する
8	フードマイレージ（輸送距離・時間・コスト）と輸送中の傷み損失が問題	フードマイレージと輸送中の傷み損失は比較的軽微（地産地消が可能）
9	環境、作業などの自動履歴収集が複雑	環境、作業などの自動履歴収集が容易
10	気象、作業と収量・品質の複雑な関係の習得に年数と観察力が必要	環境、作業と収量・品質の関係が比較的単純で、データの自動記録・解析が可能
11	電気使用量はわずか。農業機械の運転には燃料が必要	照明と空調用の電気使用量が多い（本文参照）
12	農地での栽培には種々の公的支援を受けやすい	植物工場での栽培には公的支援を受けにくい
13	土地面積当たりの初期投資額はほどほど	土地面積当たりの初期投資額は多大
14	生産管理のデジタル化が進行中	生産管理にはデータ処理の上級人材が必須
15	土壌管理の理論と経験が必須	養液栽培の理論と経験が必須

のムダな漏出は防止するべきである。同じく消耗品に含まれる水のコストは日本では1%前後であるが、乾燥地域などでは生産コストの数%を占める。

高断熱・高密閉栽培室の場合、温暖地での消費電力量の内訳比率は、照明約75%、空調（冷房）約20%、各種機器約5%である。断熱性と密閉性を高めた栽培室および非常時の強制換気システムの設備の合計コストは、おそらく、全建設費の数%を占める。平均的な畑地栽培と比較した場合の植物工場栽培の上述の長所と短所を表2に要約して示した。

4.2 コスト要因別のコスト動向

生産物1kg当たり電気コストは、LEDの性能向上、照明・栽培システムの改善、品種改良、発電コスト低下などにより、今後、かなり低下し得る。他方、労働時間単価と労働環境改善コストは増大するので、省力化設備または自動化設備導入が不可欠となる。この導入は、他方では、減価償却費を招くが、電気コストの増大は軽微である。

4.3 土地面積当たり初期投資額

土地面積当たり初期投資額が露地栽培の100倍以上である（言い換えれば、

植物工場と畑地栽培の生産能力当たりの初期投資額はほぼ同じ。生産量当たりの必要な土地面積は100分の1以下になる。

4.4 今後の開発課題

植物工場の長所を活かすには、以下のシステム開発と人材育成が必要。(1) 衛生・安全・環境・労働管理に関するデータの収集・解析システム、およびそれを利用した生産管理・経営管理を実施できる上級人材の育成。(2) 生産・経営管理工程の省力化と見える化に適したソフトウェア。(3) 植物工場での栽培に適した品種、栽培システムの開発。(4) 果菜類、根菜類、葉用植物、花き植物の本格的な商業生産システム。

5. 食品廃棄率が高いことの遠因

本稿の主題からややはずれるが、個人・家庭、生鮮物小売業および生鮮物調理加工業における食品廃棄率の高さはしばしば問題になる。この原因は多岐にわたる。例えば、(1) 安心・安全の保証との兼ね合い、(2) 保存と廃棄の期間とコストとの兼ね合い、(3) 生鮮物保存技術の不足、(4) 結果としての経営収支と

の関係、および(5) 業界あるいは企業内の安心安全ガイドライン、などがある。

前述とは視点が異なる間接的原因として、前述の廃棄関係者による農産物生産現場への訪問、見学あるいは栽培体験の回数がかなり少ないことによる、生産者と利用者との心理的乖離があると考えられる。逆の例は、家庭菜園からの収穫物の廃棄率が、品質の高低にかかわらず、低い現象である。野菜生産の現場まで出て、生産者と話し合った上で買い付けたシェフや市場関係者の野菜廃棄率も相対的に低い。ここでは、両者の顔が見え、声が届き、さらには生産過程が見えるからである。

とすると、都市の市民の住居の近隣に植物工場が存在し、そこを職場とする幅広い年齢層の市民、植物工場での栽培を体験する機会が得られた市民、見学し試食する機会を得た市民が増大したら、家庭での野菜廃棄率が低下すると期待できる。それらの体験がきっかけで家庭菜園を始める市民が現われ、作物栽培の楽しさと大変さを実感することが期待できる。さらに、多くの市民が作物栽培の最小限の知識と体験を共有することは、食料、環境、資源、生活の質を総合的に理解し、体験するきっかけとなり得る。加えて、

その経験者はいざというときの自活用食料の生産予備軍となり得る。その意味では、家庭用冷蔵庫サイズの小型植物工場は、学校教育や家庭での野菜栽培のツールとしての意義がある。

6. 持続可能な植物工場の基本要件

3と4では、植物工場の現状を踏まえて、長所と短所(解決すべき問題)を論じた。ここでは、世界の食料・資源・環境・生活の問題の同時並行的解決に貢献し、SDGsの実現にも貢献するための「持続可能な植物工場の基本要件」について述べる。

6.1 エネルギー自律

照明、空調、機器運転などに必要な電気エネルギーのすべてを、自然エネルギー(太陽光、風力、水力、バイオマス、地熱など)を利用した発電でまかなう。太陽光、風力などによる発電コストは今後とも低下する傾向にある。蓄電池(バッテリー)の製造および再利用のコストも低下傾向にあり、小型化も進展している。技術的にもコスト的にも数年以内の実現に近づいている。

6.2 エネルギーの高効率利用

エネルギー自律を実現するにはエネルギーの効率的利用が欠かせない。照明、空調、機器運転などにおける電気エネルギーの高効率利用は今後も進展し、生産物1kg当たりの電気エネルギー消費量は2021年と比較して、2025年には30%減、2030年には半減すると期待される。エアコン冷房時に室外機で得られる排熱(40度前後)は、含水率の多い物質の乾燥、温水製造あるいは各種施設の暖房熱源に利用し得る。

6.3 ネガティブ・カーボン収支(CO₂吸収量VCO₂放出量)

植物は空気中のCO₂を葉の気孔から内部に取り込み、光合成で葉内に炭水化物を生産することで成長している。つまり、生産過程では、植物は空気中のCO₂を吸収している(短期的ネガティブカーボン収支)。他方、現状では、植物工場の建設および操業時に使用される消耗品の生産に多量のCO₂を排出しているの

で、その排出量的大幅節減が必要である。(1) 建設時：植物工場建設時に多用されている、金属材、プラスチック製品およびセメントの製造時には多量のCO₂を排出するので、それらの使用量を節

減して、金属材の代替としては直交集成板(LCT:laminated cross timber)などの強化不燃性木材、プラスチック製品の代替としてはバイオマス由来製品、セメントの代替としては多孔セラミック、廃ガラス粒などの利用を進める。

(2) 栽培時：養液栽培で利用されている化学肥料の製造時には多量のCO₂を排出する。他方、この無機肥料は植物残渣などのバイオマスを微生物分解して得られる。そこで、植物残渣由来の無機肥料の効果的製造法を開発し、その利用を推進する(すでに、一部では実施されている)。

光合成促進のために照明中の栽培室のCO₂濃度は1000ppm前後に維持されている(外気のCO₂濃度は約400ppm)が、密閉度が高い栽培室内で施用されたCO₂のほとんどは植物に吸収され、外部には漏れないので、CO₂利用効率が高い。また、前述のとおり、かん水の必要量は畑地栽培の約20分の1(5%)以下である。他にも、石油由来消耗品をバイオマス由来の消耗品に変更するなどして、石油由来消耗品の使用量を大幅節減する。以上により、今後、植物工場は、大幅なネガティブ・カーボン収支(CO₂吸収量VCO₂放出量)を

実現し得る。

6.4 高い資源生産性と金額生産性および高い生産性の継続的な向上

資源生産性は投入資源量に対する生産量の比として算定され、金額生産性は投入金額または投入資源量に対する生産物の経済価値(単価×生産量)で資源別または全資源に関して算定される。この2種の生産性は、植物工場では計測値および投入資源と生産販売物の単価などから自動的に算定できる。本方法のオンライン・システムの開発により、高収量と高品質が安定的に同時達成される。

この方法をもっとも容易にかつ精度高く実現するための基盤が、高断熱・高密閉のモジュール化された栽培室である。高断熱・高密閉の栽培室では、外乱がほとんどないので、投入資源、室内環境などの計測精度と制御性が高い。その結果、それらの要因の追跡性(traceability)、再現性(reproducibility)、予測性(predictability)が高い。高断熱・高密閉だと、栽培室のCO₂収支、水収支およびエネルギー収支を正確に算定できることから、栽培室内植物群落の正味光合成速度、吸水(蒸散)速度の連続測定が可能である。また、複数の可視光カメラ、遠

赤外線カメラ、近赤外線カメラ、暗視カメラを用いて、その他の植物特性値（葉面積指数、草丈など）の連続計測が比較的容易になる。さらには、電気エネルギー、水、CO₂、肥料成分、種子、作業時間、栽培面積などの投入資源別の利用効率、資源生産性、金額生産性のオンライン算定可能である。加えて、環境、植物特性値、生産管理作業項目に関する連続計測値の品種別データセットを用いて、AI手法を含む多様なモデリングとシミュレーションが可能となる。

6.5 農耕不適地における生鮮食料生産
不良土壌地（痩せ地、荒地、土壌汚染地など）および極寒地、酷暑地、乾燥地あるいは災害地・難民避難地などにおいても、気候温暖・土壌肥沃地の植物工場と同等の資源生産性で、安心・安全な生鮮食料などを地産地消で周年生産できる。これを可能にするのは植物工場の基本構造と利用が汎用的で、かつ関連する詳細情報がインターネットを介して入手・配信できるからである。

6.6 植物工場とアプリ利用
古来、畑地や水田での栽培方法は、その土地の風土、資源（土壌、気候、現地

入手資材など）および文化に合わせて発展してきた。この方法の継承は、今後も重要である。

他方、植物工場およびその栽培システムは、現在、世界的に普及しているスマートフォン（スマホ）の考え方と方法に近い。スマホの基本ハードウェアと基本ソフトウェアは世界ほぼ共通である。ただし、各人のスマホに任意で導入（インストール）されているアプリケーションソフトウェア（アプリ）と周辺機器（特殊イヤフォン、外付きカメラ、環境センサーなど）の種類は、地域、文化、世代、ジェンダー、個人的嗜好によって異なる。利用法も個人生活、グループ活動、ビジネス、行政サービスなど多様である。これらのアプリの多くは無料でダウンロードし利用することができ、頻繁に利用されるアプリはバージョンアップ（改定版）がたびたび行われる。それらアプリに利用者グループが結成される。アプリ利用法はYouTubeなどの動画アプリで容易に習得できる。すなわち、スマホの基本技術はユニバーサルだが、個人が所有しているスマホの利用法は多様で、パーソナルかつローカルな面が多い。

植物工場利用に特化した無料または有料のアプリが現れ始めている。植物工場

モジュールの設計図をダウンロードして、3次元（3D）プリンタを利用して小型植物工場全体や大型植物工場の部品を自作する人が現れ始めている。植物工場のモジュールが、スマホの基本ハードウェアに相当する。前述の動きが世界的に広がり始めたときが、植物工場の真の普及段階である。

6.7 最適環境条件・最適栽培条件の自動探索システム

栽培室の最適環境条件は、（1）栽培品種の生理生態特性、（2）生育段階、（3）栽植密度、（4）栽培システムなどに依存するだけでなく、（5）生産目的・目標、（6）栽培時点での各種投入資源の価格、（7）生産物の販売想定価格、（8）投入し得る人的および物質的資源の量と質にも依存する。さらに、今後、市場に現れる植物工場専用品種は従来のそれとは異なる生理生態特性を有する。

環境要因に対する植物の生理生態的応（例えば、光合成）は、複合的かつ相互作用するのである。たとえば、植物群落光合成に最適な光合成有効放射のレベルは、CO₂濃度、気流速度、光の波長分布などの環境要因に依存するだけでなく、植物群落の葉面積指数、葉の傾斜角、生育

段階などに依存する。他方、植物群落の生理生態的特徴は群落内環境に影響を及ぼす。

畑地栽培やハウス栽培では、前述の因子は制御できないし、因子間の関係が複雑すぎて計測・解析が困難である。しかし、植物工場では、それら因子の大半は計測・制御が可能である。植物工場が有するこの計測制御の可能性を活かした、進化型の環境制御法、生産管理法が今後の研究開発課題である。例えば、自然界では生じ得ない環境要因の組み合わせが生産目的に最適である可能性がある。例えば、空気と光を植物の根の位置（栽培パネル面）から上方に向けて与えたら、植物はどのように反応するだろうか。言い換えれば、「現在の植物工場の環境条件は最適に制御されている」というのは事実とはかけ離れている。植物工場の最適環境制御は人類の新たな課題とも言える。

7. 開発すべき栽培室の基本要件

植物工場は、栽培室、調整室、予冷库、出荷室、休憩室、更衣室、事務室、物品倉庫、駐車場などで構成されるが、その重要部分である栽培室の開発上の基本要

件を以下に述べる。①高密閉・高断熱は、衛生、害虫や塵埃の侵入や結露の防止に有効である。洗浄水はろ過・殺菌して再利用する。高密閉・高断熱と日射不透過の栽培室内では、蒸散水は、冷房用エアコンの冷却板で結露し、養液タンクに回収され再利用される（前述）。蒸散した水蒸気は屋外に漏出しないので、植物が吸水した水のうち、植物自身が保持した水以外の殆んど全部は、結露水として回収再利用される。②最小量の最適組成の養液を必要量だけ栽培システムに供給して、養液排水量をゼロ化（非循環）することで、循環用のパイプと養液タンクが不要になる。これにより、養液の保持必要量が大幅に減少する。また、循環養液のpH（酸性度）とイオンバランスの経時的調整が不要になる。ただし、養液非循環で高い生産性を実現するには新たな技術開発が必要である。③養液栽培システムを含む栽培室のモジュール化により、モジュールの拡張性、柔軟性、適応性、多様性が高くなることで、コストパフォーマンスが向上し、多様な用途に利用可能となる。このモジュールは、ネットワーク化、標準化され、進化的なシステムとなり得る。

8. 植物工場におけるエネルギー植物生産

農業で生産される植物は、機能性植物（野菜、果樹、花き、薬用植物、工芸植物、各種の苗など）とエネルギー植物（コメ、コムギ、トウモロコシ、ジャガイモ、および木材用樹木など）に大別できる。エネルギー植物では、基本的には、それに含まれるデンプン、タンパク質、脂質のカロリー（熱）および繊維質が利用される（味、香り、色、食感、触感なども評価因子ではあるが）。

植物工場でエネルギー植物を生産するのは技術的には容易であるが、商業的には、機能性植物だけが生産されている第一の理由は、その乾物重量当たりの生産物単価がエネルギー植物のその10〜100倍だからである。加えて、生産物の乾物比率が比較的高く、長期間の貯蔵が可能で、輸送中の質的・量的な損失が少ないエネルギー植物は地産地消の要求度が相対的に低い。

他方、光合成に有効な光エネルギーの植物の炭水化物（化学エネルギー）への変換効率の上限はせいぜい10%前後であり、現存の植物工場では2%前後である。

LEDランプによる電気エネルギーから光エネルギーへの変換効率は50%以下であるから、電気エネルギーから植物の化学エネルギーへの変換効率は1%前後となる。言い換えれば、植物工場に投入された電気エネルギーの99%前後は栽培室内で熱エネルギーに変換され、エアコンの室外機から室外に排出される。このことが、植物工場は機能性物質の生産には適しているが、エネルギー摂取を主目的とする植物の生産には適していない本質的な理由である（特殊な機能性成分を含むイネやコムギであれば別であるが）。化石燃料や原子力で発電されたエネルギーを利用した植物工場で世界中でエネルギー植物が大量生産されたら、地球の気候に影響しかなない。

9. おわりに

植物工場の特徴や利用法の現状、次いで、植物工場の本質的な特徴を述べた。そして、今後、植物工場が、世界の食料・資源・環境・生活の問題の同時並行的解決に貢献し、SDGs（持続可能な開発目標）の実現にも貢献すると思われる根拠を述べた。現在の植物工場技術は未熟であるが、その可能性はかなり大きい。

参考文献

- 1 Kozai, T., Fujiwara, K. and Run-
kle, E.S. (eds.) (2016) LED Lighting
for Urban Agriculture, Springer, 454
pages.
 - 2 Kozai, T. (ed.) (2018) Smart Plant
Factory, The next generation indoor
vertical farms. Springer, 456 pages.
 - 3 Kozai, T., Niu, G. and Takagaki,
M. (eds.) (2020) Plant Factory: An
Indoor Vertical Farming System for
Efficient Quality Food Production,
Second edition, Academic Press, 487
pages.
 - 4 Kozai, T., Niu, G. and Masabni, J.
(eds.) (2021) Plant Factory: Basics,
Applications and Advances. Academic
Press, 444 pages.
- (2021年6月9日・オンライン講演
会)

筆者略歴 (じゅん ともき)

千葉大学園芸学部卒業、東京大学大学
院博士課程修了。大阪府立大学助手、
千葉大学園芸学部助教授、教授、同学
部長、環境健康フィールド科学センター
長、同大学学長、客員教授を経て、現

在は、千葉大学名誉教授、タイ王国・
Mahidol 大学名誉博士、植物工場研
究会会長など。日本農業気象学会賞、
日本植物工場学会賞、日本生物環境調
節学会賞、日本農業工学会賞、日本農
学賞、紫綬褒章、中国・国家友誼賞、
米国・培養生物学会生涯功績賞などを
受賞。

主な著書に、『人工光型植物工場』（オー
ム社）、『太陽光型植物工場』（オー
ム社）、『幸せの種』はきつと見つかる』
（祥伝社）、『図解でよくわかる植物工
場のきほん』（誠文堂新光社）など多
数。