

見解

施設園芸のグリーン化に向けた課題と展望



令和5年（2023年）9月28日

日 本 学 術 会 議

農学委員会

農業生産環境工学分科会

この見解は、日本学術会議農学委員会農業生産環境工学分科会の審議結果を取りまとめ公表するものである。

日本学術会議農学委員会農業生産環境工学分科会

委員長	仁科 弘重	(第二部会員)	愛媛大学学長
副委員長	後藤 英司	(連携会員)	千葉大学大学院園芸学研究院教授
幹事	荊木 康臣	(連携会員)	山口大学大学院創成科学研究科教授
幹事	広田 知良	(連携会員)	九州大学農学研究院教授
	高山 弘太郎	(第二部会員)	豊橋技術科学大学大学院工学研究科教授、 愛媛大学大学院農学研究科教授
	位田 晴久	(連携会員)	宮崎大学名誉教授
	遠藤 良輔	(連携会員)	大阪公立大学大学院農学研究科講師
	大政 謙次	(連携会員)	高崎健康福祉大学農学部長・教授、東京大学 名誉教授
	奥島 里美	(連携会員)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研 究機構企画戦略本部スマート農業事業推進室
	岸田 義典	(連携会員)	株式会社新農林社代表取締役社長
	古在 豊樹	(連携会員)	千葉大学名誉教授
	谷 晃	(連携会員)	静岡県立大学食品栄養科学部教授
	野口 伸	(連携会員)	北海道大学大学院農学研究院教授
	橋口 公一	(連携会員)	エムエスシーソフトウェア株式会社技術顧問、 九州大学名誉教授
	彦坂 晶子	(連携会員)	千葉大学大学院園芸学研究院准教授
	真木 太一	(連携会員)	九州大学名誉教授
	山形 俊男	(連携会員)	国立研究開発法人海洋研究開発機構アプリ ケーションラボ所長、東京大学名誉教授
	吉本真由美	(連携会員)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研 究機構農業環境研究部門 気候変動適応策研 究領域 主席研究員
	平野 高司	(連携会員(特任))	北海道大学大学院農学研究院教授

本件の作成にあたっては、以下の職員が事務を担当した。

事務	増子 則義	参事官（審議第一担当）（令和5年4月まで）
	根来 恭子	参事官（審議第一担当）（令和5年5月から）
	山田 寛	参事官（審議第一担当）付参事官補佐（令和5年3月まで）
	若尾 公章	参事官（審議第一担当）付参事官補佐（令和5年4月から）
	河野 道子	参事官（審議第一担当）付審議専門職（令和5年3月まで）
	増田 能伸	参事官（審議第一担当）付審議専門職（令和5年4月から）

要 旨

1 背景

近年、「経済と環境の好循環」を実現する産業政策に位置づけられる「グリーン成長戦略」の推進に向けて、食料安全保障の基盤を担う農業においても、環境に配慮した発展や持続性の確保、すなわち「グリーン化」の重要性が増している。栽培環境を改変することで市場価値の高い園芸作物を効率的に生産する施設園芸においては、環境制御にエネルギーを使用することなどから温室効果ガス（GHG）の排出が多くなるため、省エネルギー化や環境負荷低減がより一層求められる。政府が定めた「みどりの食料システム戦略」においては、農業全体のCO₂ゼロエミッション化が掲げられ、施設園芸分野では「2050年までに化石燃料を使用しない施設への完全移行」が目標となっている。これらの背景のもと、日本学術会議農業生産環境工学分科会では、植物工場を含めた施設園芸のグリーン化に向け、ゼロエミッション（GHG排出削減、資源循環など）の観点から、必要な研究・技術開発の方向性について、農業工学的な視点で議論し、本見解を取りまとめた。

2 施設園芸のグリーン化に向けた課題

施設園芸では、栽培環境を改変するために、エネルギーを消費したり、石油化学資材を使用したりする。このことはGHG排出に直結する。実際、作物種にもよるが、栽培過程におけるCO₂排出は、露地栽培の数倍となりうる。現在の施設園芸におけるエネルギー消費の主プロセスである暖房においては、化石燃料燃焼が90%を占め、まずは暖房をCO₂排出の少ないエネルギー源にいかにか切り替えるかが重要となる。このためには電化が重要な手段となりうるが、電気ヒートポンプ導入におけるコスト高だけでなく、栽培施設用電力をいかに供給するかが重要な課題である。GHG排出削減に大きく貢献するためにも、グリーン電力としての再生可能エネルギーの活用促進が不可欠である。自律型電力供給源として期待できる太陽光発電においては、太陽光パネルの設置場所の確保や需要が高い夜間における電力供給といった課題の解決が必要となる。一方、施設園芸では、養液栽培の活用や栽培施設の閉鎖化により、資源循環促進の可能性を有しており、環境負荷低減に向け、この観点からの積極的な技術開発が望まれる。ゼロエミッションの実現に向けては、園芸作物生産における環境負荷を総合的に評価するライフサイクルアセスメント（LCA）手法の確立が必須であり、適切な評価に基づき、産業としての施設園芸の持続性の強化を図る必要がある。

3 施設園芸におけるゼロエミッションに向けた方策

(1) 省エネルギー化と再生可能エネルギー利用の促進

施設園芸のCO₂ゼロエミッションの実現には、電化を進めつつ再生可能エネルギーの利用促進を図ると同時に、施設環境制御における省エネルギー化を推進

することが不可欠である。省エネルギー化に向けては、まずは施設の基本性能（断熱性・光透過性・耐久性）の向上が重要となる。資材・部材の性能向上に加え、夜間の放熱を抑える仕組みや設置場所の気象条件にあった構造の最適化など、新技術のみならずこれまでに得られている知見について、コストだけでなく省エネルギー化の観点から再評価して、普及に向けた検討を行うことが重要となる。さらに、赤外線反射資材など、近年技術進歩が著しい波長変換被覆資材の利用も有望である。また、生育モニタリングに基づいた環境制御は、省エネルギーに資する可能性を有する。特に、作物の状態の適切なモニタリングに基づいた環境制御設定値の見直しは、エネルギー消費量の低減に直結する。

再生可能エネルギー利用促進に関しては、地域の気候・自然資源を活かした小規模分散型の発電設備などとの連携が重要である。さらに、栽培施設用太陽光発電装置や地中熱交換器など再生可能エネルギー利用に関するハードウェアの開発のみならず、気象条件などに対応していかにシステム全体を稼働させるかといったソフトウェアの開発が必須となる。

(2) 資源の効率的利用

まず農業分野内での資源循環を促進する必要がある。資材の再利用や培養液の循環利用に加え、畜産を含め農業分野で排出される有機性廃棄物の有効活用が不可欠である。要素技術としては、有機性廃棄物を利用したメタン発酵によるエネルギー生成とその際に生じるCO₂や消化液（メタン発酵を行った後に残った液）の栽培資源としての利用を促進する研究開発を推進すべきである。さらに、農業に限らず人間活動に伴って発生する有機性廃棄物の栽培資源化に向けた技術開発や、それらの利用を促進する社会的仕組みの構築も重要な意味を持つ。また、植物工場などの閉鎖度を高めた栽培システムでは、水を含めた栽培資源の利用効率を高める可能性を有しており、その有効性の適切な評価に基づいた技術開発を推進する必要がある。

(3) 栽培施設の設置場所の最適化

省エネルギーや資源循環を多少でも実現する方策として、GHG 排出削減という観点から、栽培施設の設置場所の最適化についても検討する余地がある。人間活動で排出される熱や有機性廃棄物の効率的な活用を可能にする配置、すなわち、排出される場所の近くに栽培施設を配置することは、廃熱活用や資源循環を促進し結果としてGHG 排出削減の可能性を有している。また、都市域での施設園芸は、前述の人間活動で排出される熱や有機性廃棄物の活用の可能性に加え、地産地消の促進、さらには旬菜旬消やフードロス削減などの観点からのGHG 排出削減への寄与が期待できるが、その有効性の検討には、詳細かつ適切なデータに基づいたLCAが必要である。さらに、環境制御と適地適作の融合、すなわち、地域気候資源を活かし、エネルギーを要する環境制御を最小限に抑えるような栽培施設の設置場所の検討も重要であり、どこで、どのような形態で、何を栽培するかの検討において、低環境負荷の観点を取り入れる必要がある。

目 次

1	はじめに	1
2	施設園芸のグリーン化に向けた課題	2
(1)	施設園芸における GHG 排出と環境負荷	2
(2)	グリーン電力施設園芸の実現への課題	3
3	施設園芸におけるゼロエミッションに向けた方策	4
(1)	省エネルギー化と再生可能エネルギー利用の促進	4
①	施設の基本性能の向上の方向性	
②	空調システムの電化・効率化	
③	植物工場の GHG 排出とゼロエミッション化	
④	再生可能エネルギー利用の推進	
⑤	生育モニタリングの活用	
⑥	環境制御設定値の見直しによる省エネルギー化の可能性	
⑦	パッシブ制御の活用	
(2)	資源の効率的利用	8
①	化学肥料への依存を抑えた養液栽培の展開	
②	地域で発生する有機性廃棄物の栽培資源化	
③	閉鎖度を高めた栽培システムの有効性	
(3)	栽培施設の設置場所の最適化	11
①	人間活動で排出される熱・有機性廃棄物の効率的な活用を可能にする配置	
②	都市域での施設園芸のゼロエミッションに向けた可能性	
③	環境制御と適地適作の融合	
4	さいごに	14
	<用語の説明>	15
	<参考文献>	17
	<参考資料 1> 審議経過	19
	<参考資料 2> 公開シンポジウム	20

1 はじめに

近年、甚大な気象災害の多発や農作物への影響など、気候変動（climate change）に起因すると思われる事象が身近に感じられるようになってきている。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）では、現在の地球温暖化に、人的要因が関わっている可能性が高いことを指摘し[1]、2018年に公表された IPCC「1.5℃特別報告書」[2]では、世界全体の平均気温の上昇を、産業革命以前に比べて1.5℃の水準に抑えるためには、CO₂排出量を2050年頃までに正味ゼロとする必要性が訴えられた。これを受け、2050年までの「カーボンニュートラル¹⁾」を目標に掲げる動きが世界各国で広がっている。「カーボンニュートラル」とは、人為的活動において、CO₂をはじめとする温室効果ガス（GHG）の排出量から吸収量を差し引いて、合計を実質的にゼロにすることを意味する。他方、「ゼロエミッション⁵⁾」という語句も環境負荷低減を表す概念として多用される。これは、GHGに限らず環境汚染を引き起こす物質の排出を、リサイクル等の推進により、実質的にゼロにすることを意味する[3]。どちらも持続可能な社会の実現には不可欠な概念であり、環境に配慮した経済発展をめざす、すなわち、経済的な成長を実現しながら我々の暮らしを支えている自然資源を維持し、その恵みを享受し続けることをめざす「グリーン成長」の中心的な目標となっている。この経済と環境の好循環を実現する産業政策に位置づけられる「グリーン成長戦略」[4]の推進に向けて、食料安全保障の基盤を担う農業においても、環境に配慮した発展や持続性の確保、すなわち「グリーン化²⁾」の重要性が増している。政府は、食料・農林水産業の生産力向上と持続性の両立をイノベーションで実現するため、「みどりの食料システム戦略」[5]を策定し、2050年までに達成すべき目標を段階的に設定しているが、この実現には、多くの技術革新が必要であり、産学官の連携による課題解決が不可欠である。

本来、施設園芸は、栽培環境を改変することで、市場価値の高い園芸作物を効率的に生産するものである。そのため、環境制御にエネルギーを消費したり石油化学資材を使用したりすることで、露地栽培と比較して、GHGの排出が多くなるのが実情であり、省エネルギー化や環境負荷低減がより一層求められている。「みどりの食料システム戦略」の中でも、農業全体のCO₂ゼロエミッション⁴⁾化、および施設園芸分野の2050年までの目標として、「化石燃料を使用しない施設への完全移行」が掲げられている。これ以外にも、全体目標として掲げられている輸入原料や化石燃料を原料とした化学肥料使用量の30%低減などの目標も、施設園芸において目指すべき課題となっている。市場性の高い園芸作物を効率的に生産できる可能性を有している施設園芸の振興は、農業の産業としての競争力強化に不可欠なものである。低環境負荷型施設園芸は、この特長の強化につながり、持続可能な社会を構築するうえで重要な役割を果たす。

このような背景を受け、日本学術会議農学委員会農業生産環境工学分科会では、植物工場を含めた施設園芸のグリーン化に向け、GHG排出削減や資源循環などの観

点から、必要な研究・技術開発の方向性について、農業生産環境工学的な視点で議論を行い、本見解を取りまとめた。

2 施設園芸のグリーン化に向けた課題

(1) 施設園芸における GHG 排出と環境負荷

本来、生物の利活用を促進する農業は持続可能な社会の根幹をなすものであるが、世界的にみると、全体の 10%以上を占める GHG 排出源となっている。日本においてはその割合は若干低いものの、それでも 4%以上を占めている[6]。我が国の農業における直接的な GHG 排出源は、主に、農業機械の稼働や施設の環境制御に係る化石燃料消費、土壌や家畜からの放出である。これ以外にも、生産に使用する資材等の原料調達も含めたライフサイクル全体での環境負荷を評価するライフサイクルアセスメント (LCA)⁹⁾ の観点からは、化学肥料や化学農薬、農業資材の生産過程での排出、農産物の輸送に係る排出を考慮する必要がある。また、農業における GHG 排出以外の環境負荷としては、化学農薬や化学肥料などの系外拡散や農業資材や作物残渣の廃棄などが挙げられる。

施設園芸では、栽培空間を被覆資材等で囲み、栽培環境を改変する。被覆資材等にはプラスチック資材が多く使用されるため、それらのリサイクル促進、資材の長寿命化による使用量の低減、生分解性素材への代替の促進などは重要な課題である[7]。また、環境の改変には電力消費や化石燃料燃焼を伴うことが多く、生産時の GHG 排出量は露地栽培と比較して多くなる。例えば、加温を行う温室栽培における GHG 排出量は、品目にもよるが、露地栽培の 2～4 倍程度となる[8]。よって、環境の改変に係るエネルギー消費をいかに抑えるかが重要な課題である。施設園芸で使用される温室は、資材や部材の種類や構造などから、プラスチックハウスとガラス温室に分類されるが、令和 2 年度の調査[9]では、面積比で 95%以上がプラスチックハウスである。また、温室の 40%以上が加温装置を有しており、現在の施設園芸においては、暖房がエネルギー消費の主プロセスである。そして、暖房方式としては、化石燃料による燃焼式暖房が 90%を占める[9]ため、これを CO₂ 排出の少ないエネルギー源にどのように置き換えるかが重要となる。なお、本見解では、人工光源を用いた「植物工場」も施設園芸の一形態として、その対象としているが、環境改変に係るエネルギー消費は、温室に比べ増大する。

一方、施設園芸では、養液栽培の活用や栽培施設の閉鎖化により、栽培資源の系外への廃棄を抑制し、資源利用効率を高められる可能性を有している。空气中に放出された水蒸気の回収や、養液の再利用により、栽培におけるリサイクルを促進することができ、また、CO₂ 施用³⁾ に関しても、閉鎖化による外気への CO₂ 排出の抑制が可能になる。環境負荷低減に向け、これらの観点からの積極的な技術開発が望まれる。

農業における GHG 排出削減は、国際的にも喫緊の課題である。EU では、農場から食卓までの総合的なグリーン化をめざす Farm to Fork 戦略[10]を掲げ、有機農業の拡大、再生可能エネルギーの利用促進、資源循環の促進などを進めようとしている。施設園芸における GHG 排出削減シナリオとしては、施設園芸先進国のオランダでは、地熱利用、再生可能エネルギー利用、環境制御の効率化、ハウス資材や構造の改良などが組み込まれている[11]。これらのオプションの効果や実現可能性は、各国の気候資源やエネルギー事情などにより異なることから、我が国に適した方策の検討が不可欠である。その際、重要となるのが、GHG 排出削減や環境負荷低減に向けた評価の適正化である。施設園芸における環境負荷を総合的に評価する LCA 手法の確立（システム境界の拡大、標準化）が必須であり、適切な評価に基づき、産業としての施設園芸の持続性の強化を図る必要がある。

(2) グリーン電力施設園芸の実現への課題

電力供給システムにおいては、国際社会情勢に起因する発電燃料コスト変動の影響を受け、栽培時の電力コストが不安定になる可能性があり、積極的なグリーン電力発電システムの活用が望まれる。施設園芸へのグリーン電力の供給源としては、地域の気候・自然資源を活かした太陽光発電、風力発電、水力発電などが挙げられる。エネルギー源として地中熱も想定されるが、コストの問題、地下水や地盤環境への影響評価の課題があり、今後のそれらの課題解決に向けた技術開発が待たれる。一方、太陽光発電はグリーン電力の主力であり、園芸施設の点在と多様な規模を考慮すると、小規模分散型の発電設備や蓄電設備との連携が重要である。太陽光パネルの設置場所の確保やソーラーシェアリング⁶⁾の場合は発電利用により減少した栽培環境の日射不足、また低温期の暖房需要の多い夜間における電力供給も課題である。

燃焼式暖房の代替としてグリーン電力を活用するには、電気を用いるヒートポンプ⁷⁾空調機（以下、電気ヒートポンプ）の導入が基本となるが、現状、燃焼式暖房機に比べて導入コストが高い、低外気温時の効率低下などの問題がある。これらの問題の解決を目指すとともに、温室の性能向上も重要である。

3 施設園芸におけるゼロエミッションに向けた方策

(1) 省エネルギー化と再生可能エネルギー利用の促進

① 施設の基本性能の向上の方向性

温室の冷暖房時の省エネルギー化に向けては、まず施設の基本性能（断熱性・光透過性・耐久性）の向上が重要となる。資材・部材の性能向上に加え、積雪の有無、太陽高度の高低、最大風速の大小などの設置場所の気象特性にあった構造の最適化を進める必要があるが、これらに関しては、これまでに多くの研究がなされている。既存の知見を活かし、イニシャルコストとランニングコストに加えて、省エネルギー化の観点から、既存の技術の再評価も含め、優れた技術の普及に取り組むことが求められる。

赤外線反射資材などの近年技術進歩が著しい波長変換被覆資材の利用も有望である。たとえば赤外線カット資材ともいわれる赤外線反射資材は、日射のうち、植物生育に直接寄与しない800 nm以上の放射を反射する。これを温室の屋根面と側面に展張すると、温室内への入射熱量が減少する。その結果、高温期は冷房負荷を低減することができる[12]。夏秋期、日中の温室内は栽培適温よりも高温になることがあり、一般に、換気をして内気温の上昇を抑えている。ここで赤外線反射資材を導入すれば、換気を抑制することができ、無駄の無いCO₂施用が容易になり、かつ光合成の促進も期待できる。このような高機能の資材の利用は、複数の環境要素の制御性の向上につながるため、実用化が期待される。

② 空調システムの電化・効率化

燃焼式暖房の代替として有望な電気ヒートポンプには、導入コストが高い、低外気温時の効率低下などの問題があるが、一方で、施設園芸において、電気ヒートポンプは暖房だけでなく、冷房、除湿にも利用することができる。

電気ヒートポンプの利用においては、低温期は施設の保温性の向上による暖房負荷の低減技術の開発も必要である。保温性の向上は、保温カーテンを含む被覆資材の改良がキーとなる。これは燃焼式暖房機の時代から継続的に取り組まれているが、ゼロエミッションの観点からは、資材の原料および廃棄を考慮した資材の開発が求められる。

高温期は遮光、換気などを組み合わせた冷房負荷の低減技術および温湿度の制御技術の開発が求められる。電気ヒートポンプで冷房するとき、温室内空気の冷却除湿の工程によって空気中の水蒸気の一部が凝結し、凝結水が得られる。その結果、温室内空気は乾燥する。湿度が適切な範囲で制御されていけば問題はないが、生育に好適な範囲よりも低下することがある。この場合は、作物の生育が抑制されるため、それを回避する湿度管理がキーになる。加えて水の再利用の観点からは、凝結水を養液栽培の水として再利用したり、加湿器の水源にすることが望ましい。

一方、電気ヒートポンプを夜間冷房や夜間除湿に使用する場合は、日射による冷房負荷がないため、出力の低い運転モードで運転するのが望ましい。このように温室の電気ヒートポンプ利用では、目的に応じて適切な出力で運転をすべきであるが、現状の施設園芸用の電気ヒートポンプはインバータ制御の機能を有さないため、住宅用のエアコンに比べると制御性が低い。省エネルギー化のためには、暖房と冷房の両方の成績係数（COP）の向上が課題である。さらに、温室の規模に合わせて出力の異なる複数の機器を効率的に稼働させる制御方法の開発も重要である。

現在施設園芸における暖房機は 90%以上が化石燃料の燃焼を利用しており、この燃焼式暖房機を GHG 排出の少ない電気ヒートポンプに入れ替えるまでの期間は、燃焼式暖房機で CO₂ 排出を抑える機能の付加が有用である。その方法として、燃焼時の排気から CO₂ を分離・回収する技術がある。CO₂ の分離・回収には様々な方法があるが、この CO₂ を一次的に貯留して必要に応じて CO₂ 施用に用いれば、燃焼工程の CO₂ ゼロエミッション化が可能になる。

③ 植物工場の GHG 排出とゼロエミッション化

施設の閉鎖度を高めて外気との空気交換を最小限に抑え、光源に人工光を用いて作物を生産する「植物工場」では、人工光源および空調のエネルギーに電気を使い、すでに電化が進んでいるといえる。ここで植物工場の特徴は下記のようにまとめられる。

CO₂ 施用時に大気への CO₂ 拡散がないため、CO₂ 施用における GHG の排出はゼロである。温室では、換気下では CO₂ 施用を行わないが、植物工場では光合成に最適な CO₂ 濃度を常に維持できるため、光合成が促進される。また、養液に用いる水の一部は植物に保持されるが、90%以上は蒸散作用で水蒸気として室内に放出される。電気ヒートポンプは照明熱を除去するために冷却除湿を行うため、余剰の水蒸気は凝結水として回収し、養液に再利用できる。他方、温室で換気を行う時は、水蒸気は温室外に放出されるため回収できない。

これらの理由から、植物工場は、極めて高い CO₂ 利用効率と水利用効率を達成しながら光合成と成長を促進し、収穫量の増大を可能にする。他方、現状では、植物工場の GHG 排出はかなり多い。例えば、レタスを植物工場で作る際の生産物 CO₂ 排出係数（1 kg の農作物を生産する際に発生する CO₂ 量）は、温室周年栽培トマトの 8 倍以上になるとの試算がなされている [13]。しかし将来、グリーン電力の使用が可能になれば、植物工場における GHG 排出量は削減できる。温室でも電化が進み、植物工場と温室が同一のエネルギーを用いる生産体系になることで、グリーン電力の農業地域への普及とともに、施設園芸地域において、植物工場を導入するケースが増える可能性もある。

④ 再生可能エネルギー利用の推進

施設園芸の CO₂ ゼロエミッションの実現には、温室内の燃焼式暖房機からヒートポンプへの切り替え等の電化を進めるのと同時に再生可能エネルギーの利用を促進することが不可欠である。施設園芸への電力供給源や熱源としての再生可能エネルギーの利用においては、自律性の向上を目指し、地域の気候・自然資源を活かすことが重要となる。このためには、栽培施設用太陽光発電や地中熱利用などに関するハードウェアの開発のみならず、気象条件などに対応していかシステム全体を稼働させるかといったソフトウェアの開発が必須となる。一例として、温室の環境シミュレーションは、温室の規模に関わらず、施設の最適設計にも、システム稼働の最適化にも有効である。これは温室内外の熱収支を基礎として、被覆資材の熱貫流率、換気特性、土壌面の熱移動、冷暖房機の運転能力などを変数として、異なる気象条件下で温室内の温湿度の推定と環境制御に要する冷暖房量の算定などを行うシミュレーションである。最近各地の気象データベースが整備されており、日射、温湿度、風向風速などの値が蓄積されている。そのデータを用いれば、立地特性を考慮した環境シミュレーションが行える。再生可能エネルギーの発電量と蓄電特性のシミュレーションを連動すれば、温室の運用時の省エネルギー化および CO₂ ゼロエミッション化の達成度を推定し、評価することができる。さらには気象条件を考慮した温室の立地の選定、建設前のランニングコストの試算、省エネルギーを達成するための冷暖房の運転方法の決定などが可能になる。

⑤ 生育モニタリングの活用

生育モニタリングに基づいた環境制御は、省エネルギーに資する可能性を有するが、これまでは、GHG 排出削減のための栽培管理（環境制御と植物体制御）ノウハウの構築については、生産現場への実装が可能な仕組みとして提案がなされておらず、カーボンニュートラル技術としての位置づけが不明確であった。しかしながら昨今、生産現場に実装可能な植物生体情報計測技術の開発や実証が急速に進められており、GHG 排出削減を KPI（Key performance index）においた生育モニタリングに基づいた栽培管理ノウハウの構築が模索され始めている。

施設園芸で導入されている環境制御技術の性能を十分に発揮させるためには、植物の生育状態に合わせて環境制御の設定値を適切に更新し続ける必要がある。「植物の生育状態の見極め」能力が生産性に直結することになる。近年のセンシングデバイスの低廉化と IoT の普及により、栽培施設内に実装可能な植物生体情報計測技術が提案されつつあり、データサイエンスや AI の活用により「植物の生育状態の見極めの数値化」が現実味を帯びてきている。スピーキング・プラント・アプローチ（SPA: Speaking Plant Approach）コンセプト[14]は、様々なセンサを用いて植物生体情報を計測して生育状態を

診断し、その診断結果に基づいて栽培環境を適切に制御するというものであり、施設園芸の生産性を最大化させるための切り札として世界的に注目されている。非破壊・非接触タイプの植物生体情報の計測技術は、SPA における最重要技術として位置づけられており、今後 3～5 年間の「人間（栽培管理者）の判断をサポートするための植物生育状態の数値評価技術」として生産現場に実装されるフェーズを経て、5～10 年後には、「人間の代わりに環境制御に関する判断を行う技術」として環境制御システムに組み込まれることが想定される[15]。

具体例として、近年、急激に普及しつつある作物個体群の光合成をリアルタイムにモニタリングする技術がある。これは、安価なセンサを用いているにも関わらず高精度計測が可能であり、生産現場に長期間設置して連続的にデータを取得することで、光合成を好適に保つための栽培管理戦略の構築を可能にする[15]。たとえば、LED 等の人工光源を用いた補光によって期待される光合成促進効果（CO₂吸収と増収）を定量化し、補光に要した電力（CO₂排出量と経費）を評価することで、最適な補光戦略の策定が可能である。また、植物生体画像情報計測ロボットは、幅数十 m の作物個体群の茎頂から果実までの植物体全領域を対象とした画像計測が可能である。全自動で取得される画像データを AI 等により解析することで、成長量評価や成長予測、さらには、果実の着色に基づいた熟度判定と収量予測などを行う。このような技術を用いた高精度な生育モニタリングによって、GHG 削減を目標にした日単位での栽培管理の最適化が可能になる。

⑥ 環境制御設定値の見直しによる省エネルギー化の可能性

作物の状態の適切なモニタリングに基づいた環境制御設定値の見直しは、エネルギー消費量の低減に直結する。現在、多くの施設園芸作物について、生育を良好に保つための夜間最低気温が提示されている。この値は、多くの実験的・経験的検討を積み重ねて導かれたものであり、生産現場における夜間気温の設定値として十分に機能している。他方、当然ではあるが、生育に悪影響を及ぼしうる夜間気温（ここでは、生育阻害気温とする）は、提示されている夜間最低気温よりも低いと想定される。さらに、作物の生育状態に応じて、日々の生育阻害気温は変化するものと考えられる。暖房時のコストや CO₂ 排出量は、施設内外の気温差に比例するため、夜間気温の設定値を下げることができれば、コストと CO₂ 排出量の削減に直結することになる。つまり、生育モニタリング技術を用いて、植物個体群の生育状態を日次で正確に把握し、良好な生育を維持しながら夜間気温を可能な限り低い値に設定することができれば、暖房時のコストや CO₂ 排出量の削減が可能となる。

このようなソフトウェア的技術は、前述の目に見えやすいインフラ（グリーン電力活用）、構造体・装置（断熱性向上、電気ヒートポンプ高性能化）

などのハードウェア的技術が発展したとしても必ず必要とされるものであり、ハードウェア的技術開発と並行して推進すべきものである。

⑦ パッシブ制御の活用

人為的なエネルギーを使用しないパッシブ制御の活用も、施設園芸のグリーン化には欠かすことができない。パッシブ制御は、電力機器や化石燃料由来のエネルギーを使用することなく、温室構造物自体が持つ熱力学的または力学的特性を利用して、環境の調節を行うものと定義され[16]、古くからある考え方である。例えば、被覆材の種類やかけ方を変えたり、内張りを施したり、天窗を設けたり、温室の構造を変えたりすることで、温室環境の改変を行う。パッシブ制御における最大の課題は、その効果が気象環境に依存するため、容易に結果を予測できない点である。自然任せの面が大きく、制御の目標値に達することができない可能性もある。パッシブ制御を活用し、エネルギーを投入する制御を最小限にするには、パッシブ制御の安定性および扱いやすさの向上が不可欠である。そのためには、施設内環境シミュレーションの活用に加え、近年進展の著しい AI 技術の利用が有望であり、生育・環境モニタリング手法と連携することで、その効果の向上が期待される。

(2) 資源の効率的利用

① 化学肥料への依存を抑えた養液栽培の展開

化学肥料は、窒素・リン・カリウムなどの作物に必要な栄養塩を必要な分だけ供給することができ、収穫量の増大や品質の向上、労働時間の短縮を始めとする農業生産性の向上に大きく貢献してきた。他方、近年の化学肥料利用量は過剰傾向がみられ、このことが逆に作物の生育不良や品質低下を招いているほか、未利用栄養塩の系外への漏出が水域の富栄養化のような環境問題を引き起こす要因となっている。さらに、化学肥料の生産それ自体が環境問題を引き起こしていることにも注目する必要がある。例えば、窒素肥料の製造は天然ガス資源に、また、リン肥料の製造は天然のリン鉱石資源にそれぞれ強く依存しており、地球温暖化や資源枯渇の問題を有している他、人為的な窒素循環、リン循環の変化が引き起こした環境負荷は地球の限界（プラネタリー・バウンダリー(⑨)）を超えているとも報告されている[17]。加えて、肥料原料の多くを輸入に依存している我が国では、これらの価格高騰も大きな問題となっている。今後、世界の人口が増加する中で化学肥料の需要はさらに増大することが見込まれている。このような中で、施設園芸で多用される養液栽培においても化学肥料への依存を抑えることが急務であり、その方策が多面的に検討されるべきである。

化学肥料の利用量の削減にあたっては、適正利用量の把握ならびに未利用肥料の再利用と、化学肥料の代替物の開発検討が重要となる。第一に、栽培

期間中の作物の無機栄養塩要求量を正確に把握して、栄養塩供給が過剰にならないように培養液の濃度・投入量を適切に管理する手法を確立する必要がある。これには、窒素・リン・カリウムなどの無機栄養塩に対するリアルタイムのモニタリング・制御の技術開発や、養液栽培における実用的な栄養塩吸収プロセスモデルの構築といった研究開発の深化が期待される。

培養液の廃液に未利用の栄養塩が含まれる場合は、施設の規模に関わらずできるかぎり回収して栽培に再利用することが望ましい。このことは、水域の富栄養化抑制の点からも意義がある。ただし、廃液には植物栽培に不要な成分や植物病害を引き起こす微生物といった有害成分が含まれるため、必要とされる栄養塩を選択的に回収・再利用する技術開発が必要となる。また、栄養塩を回収した後の廃液についても、有害成分を効率的に除去する技術の向上が求められる。

近年、堆肥化やメタン発酵による有機性廃棄物の分解産物が、化学肥料の代替物として注目されている。これらは地域社会の廃棄物系バイオマスに由来する再生可能資源であり、化学肥料の原料利用が引き起こしている環境負荷を軽減できる可能性がある。また、これら再生可能資源の利用は廃棄物減容につながるものとして期待されている。堆肥化やメタン発酵による有機廃棄物の肥料化については次項で詳述する。

以上のように、化学肥料の使用を低減するためには投入量の最適化と代替肥料の開発を推進することが重要である。同時に、化学肥料の低減が生産者にもたらすメリットを具体化し、その知見を基に生産者自身のモチベーションを高める仕組みづくりを検討していくことも肝要である。

② 地域で発生する有機性廃棄物の栽培資源化

畜産排泄物や作物残渣といった農業分野で発生する有機性廃棄物には、エネルギーや肥料成分が豊富に含まれている。これらを回収してメタン発酵等の技術を用いて資源に転換して循環的に栽培に利用することで、化学肥料の導入を抑制することができ、廃棄物の減容化やCO₂排出量の削減、地域の富栄養化抑制などが期待できる。さらに、人間活動に伴って発生する食品残渣や下水汚泥といった有機性廃棄物も対象に広げて栽培資源化できれば、地域社会全体のサステナビリティ実現に大きく貢献する可能性がある。この実現には、資源回収技術の開発や廃棄物利用を促進する社会的仕組みの構築が重要な意味を持つ。

有機性廃棄物から施設園芸に適した資源を回収する有望なバイオマス転換技術のひとつとして、メタン発酵技術が挙げられる。メタン発酵では、有機性廃棄物からメタン、CO₂、および無機塩類が溶存した消化液が得られる。このうち、メタンは熱や電力を作り出すための再生可能エネルギーとして、また、消化液は改質処理により作物生産のための培養液資源として利用できる。

ただし、これら資源の回収率ならびに利用率を高めるためには、有機性廃棄物の適切な前処理条件や、メタン発酵の運転管理条件、培養液への改質処理条件、栽培資源の利用先の確保などについて詳細に検討して知見を蓄積することが重要であり、これらの研究開発の推進が強く望まれる。

有機性廃棄物からの栽培資源回収技術には、他にも堆肥化や炭化等があり、それぞれ肥料、土壌改良材としての露地栽培での利用がすでに実用化している。他方、開放環境である露地栽培における堆肥や炭の利用実績は豊富であるものの、温室および植物工場における実績は十分でなく、これらの技術の導入が施設園芸における生産性に及ぼす影響は未知の部分が多い。したがって、この影響に対して物質収支を通じた定量的な評価が期待される場所である。

有機性廃棄物の栽培利用を持続的に行っていくためには、技術開発だけでなく新しい社会システムの構築も重要となる。有機性廃棄物の収集・処理・利用を促進する法律ならびに規制を整備し、栽培利用に向けた技術や知見が円滑に社会実装される道筋をつけることが求められる。さらに、有機性廃棄物の栽培資源化の重要性について教育・啓発を通して広く国民全体で共有し、環境保護や資源再利用に対する意識を高めることが、資源循環的な食料生産技術を確立する上で重要である。

③ 閉鎖度を高めた栽培システムの有効性

植物工場や一部の温室のように、栽培空間の閉鎖度を高め、外部との物質のやり取りを制限した栽培システムでは水・ガス・栄養塩などの物質資源の利用効率を向上できる可能性がある。前述のように、植物工場では、蒸散により植物から失われた水蒸気を凝縮させて回収し、培養液の溶媒として再利用することが可能である。また、有機性廃棄物の堆肥化やメタン発酵の過程で生じるCO₂をCO₂施用に利用することも技術的に可能である。このような物質の循環利用は露地栽培のような開放系の生産体系では難しい。他方、閉鎖度を高めた生産体系ではこの効果を適切に評価しながら研究開発を進めることで、資源のさらなる効率的利用が推進できると期待される。

現在、完全な閉鎖環境である宇宙船あるいは月面で食料を持続的に生産する宇宙農業の研究開発が、官民間問わず世界各国で始まっている[18]。宇宙農業では、極めて限られた空間的ならびに物質的制約の中で、植物残渣やヒトの排泄物といった有機性廃棄物を最大限無機化して栽培資源に再生し、食料を繰り返し生産することが求められる。このコンセプトはこれまで述べてきた資源の効率的利用に対する考え方をさらにつきつめたものであり、これまでの地上での栽培システムのさらなる改善点や本質を見出すことにつながると期待される。

近年の、閉鎖度を高めた栽培システムにおける技術の進歩や低コスト化には目覚ましいものがある。同時に、窒素やリンなどを始めとした物質を地上で循環して利用する重要性は将来的にさらに高まることが予想される。このような中で、閉鎖度を高めた栽培システムの有効性を判断するためには、水や栄養塩の利用量や作物収量に加えて、エネルギー利用効率や、技術の導入・保守・運用コストについても定量的に評価しながら研究開発を進めることが重要である。加えて、環境ならびに生体のモニタリングに基づいて運転条件の最適化を継続的に行うことで、これらのシステムにおける資源利用効率と持続可能性のさらなる向上が期待できる。

(3) 栽培施設の設置場所の最適化

① 人間活動で排出される熱・有機性廃棄物の効率的な活用を可能にする配置

施設園芸のグリーン化を少しでも前進させるためには、GHG 排出削減という観点から、栽培施設の設置場所の最適化についても検討が必要である。人間活動で排出される熱や有機性廃棄物の効率的な活用を可能にする配置、すなわち、排出源の近くや利用しやすい場所への栽培施設の設置は、廃熱活用や資源循環を促進し、結果として GHG 排出を減らす方策となりうる。

工場、ごみ焼却場など排熱源を保持する施設に隣接する栽培施設では、暖房に排熱を利用できる可能性を有する。例えば、工場などからの排熱を蒸気の形態でパイプ輸送し、栽培施設内の暖房に利用する方法が考えられる。また、排出施設との隣接化により熱損失の少ない輸送手段が確保できれば、100℃以下のいわゆる低温排熱の温室暖房への積極的な活用も可能となる。さらに燃焼による排熱の場合、同時に発生する CO₂ の利用も期待できる。実際、オランダでは、既設のパイプラインを再利用してコンビナート等で発生した CO₂ を栽培施設に輸送し、CO₂ 施用に利用している[19]。ただし、燃焼排ガスからの CO₂ には不純物が含まれていることから、低環境負荷な分離・回収技術の開発も必須である。なお、他産業分野で排出された CO₂ の有効活用に関しては、CO₂ 吸着剤の利用が検討されているが、その運搬も GHG 排出につながるため、排出施設の隣接が重要となる。

有機性廃棄物の活用に関しても、食品を扱う大型商業施設、食品加工工場、廃棄物処理施設など、それらの排出の多い施設や集積施設の隣接地で、廃棄物の肥料や農業資材への転用や熱や電力の生成への利用を図ることで、輸送コストの削減につながる可能性がある。有機性廃棄物は、体積や重量が大きく、輸送過程で排出される GHG も大きくなるため、排出施設への隣接が有効となる。

現在、工場やごみ焼却場などに隣接した栽培ハウスで、排熱等を暖房に利用して稼働している例もある[20]。今後は、これらの事例について詳細な解

析を行い、排熱・排 CO₂ 施設に隣接する栽培施設が、実際にどの程度、GHG 排出削減できたかを検討するなど、施設配置の最適化に向けた知見の蓄積が望まれる。

② 都市域での施設園芸のゼロエミッションに向けた可能性

都市域においては、廃棄食品や生ごみといった有機性廃棄物に加え、人間活動で排出される熱が大量に発生する。都市域で行われる農業、すなわち、都市農業は、これらの利用による農業におけるゼロエミッションの推進、さらには都市全体のゼロエミッション化を後押しする大きな可能性を秘めており、都市農業振興は、近年極めて重要な課題となっている[21]。施設園芸に関しても、都市域での展開は、そのゼロエミッションに向けた潜在的な利点を多数有する。

まず、都市域で発生する、生ごみをはじめとした大量の有機性廃棄物は、施設栽培においても肥料源となりうる。また、都市には、排熱源となる工場、ごみ焼却場、下水処理場、業務ビル、地域冷暖房などの施設・設備が多く、施設栽培はそれらの資源活用に広範な可能性を有する。さらに、人間の生活や経済活動に多くのエネルギーが投入される都市では、ヒートアイランド化が進行しており、栽培施設の暖房負荷の低減に寄与する可能性もある。

また、大きな消費地に隣接する都市農業では、フードマイレージ低減の観点から、GHG の排出削減に寄与しうることが期待されている[21]。ただし、一般に施設園芸においては、生産・出荷管理に起因する GHG 排出量の割合が高く[22]、輸送に起因する排出量の削減の効果は相対的には小さいと考えられる。しかしながら、ゼロエミッションの達成には、僅かでも GHG 排出を抑制する技術・システムを積極的に導入・推進することが不可欠である。

加えて、消費地に近い都市農業では、消費者と生産者の結びつきの強化によって、需要に見合った作物生産が可能となり、フードロスや貯蔵に係るエネルギー消費が減ることで、GHG 排出削減への寄与が期待できる。

以上のように、都市農業としての施設園芸の振興は、さまざまな観点から、ゼロエミッションの推進の可能性を有している。しかしながら、これらの要素が直接的に GHG 削減や環境負荷低減にどの程度の効果を発揮するかは、栽培する作物種や設置される場所などによっても変わりうるため、詳細かつ適切なデータに基づいた LCA 分析が必要である。

③ 環境制御と適地適作の融合

環境制御と適地適作の融合、すなわち、地域気候資源を活かして環境制御のための投入エネルギーを最小限にするような、栽培施設の設置場所の検討も重要である。施設園芸において、エネルギーをかけて環境を改変するプロセスには、冬季の暖房、夏季の冷房、換気、補光などがある。現状、このう

ち冬季夜間の暖房がエネルギー消費の大部分を占めており、夜間の外気温が少しでも高ければ、エネルギー消費の抑制につながる。これは特に、電気エネルギー利用効率が内外気温差に依存する電気ヒートポンプ利用時において顕著であり、内外温度差が大きくなならない場所への栽培施設の設置は、GHG 排出削減に直結する。温度環境を大きく改変せずに済むような場所で、施設栽培のメリットを活かした安定生産や高付加価値化のための環境制御を効率的に行うことが重要であろう。

しかしながら、昨今の気候変動下においては、平年と異なる気温になることもしばしばであり、冷暖房能力の設定が難しい課題となっている。よって、気象予測モデルの精度向上に加え、冷暖房能力の可変化に向け、環境制御装置の小型化・分散化・可搬性向上などの技術開発が、適地適作の効果を高めると期待される。どちらにしても、日照環境を含め、対象作物の栽培に適した環境が得られやすい（環境改変の程度が少なくてすむ）場所に栽培施設を設置することが、GHG 排出削減につながることを再認識する必要がある。ただし、栽培適地が消費地と離れている場合には、生産した作物の輸送にかかるGHG 排出が増える可能性もあり、ここでもGHG 排出に係る適切な評価法による比較検討が重要となる。なお、植物工場における適地適作の判断においては、気候資源だけでなく、電力資源やリサイクル等による栽培資源の活用可能性の観点も考慮すべきである。

実は、地域気候資源を活用した環境制御は、以前より取り組まれている、どちらかといえば古典的な技術である。例えば、静岡の石垣イチゴと呼ばれるイチゴ栽培では、海沿いの温暖な気候に加え、南面開放斜面に栽培施設を設置することで日射エネルギーを石垣に蓄熱し暖房に有効活用している。また、四国地方における傾斜ハウスは、斜面風を効率的に取り込み、換気性能の向上を図っている[23]。これまでこれらの技術は、普及に向けて主にコストや生産性からのみ評価されてきたが、今後は、低環境負荷からの評価も加えることが望まれる。

人工的な気候資源としては、前述のように、ヒートアイランド現象による、都市の夜間気温の上昇が、GHG 排出削減につながる可能性もある。都市域では、人間活動の影響で多くの熱が排出されることにより、自然の気候とは異なる熱環境が生成される。一般に、ヒートアイランド現象では、夜間の気温がより上昇するため、これを活用した夜間の暖房負荷の低減が考えられる。しかしながら、夏季はより高温となり、冷房負荷が逆に高まる可能性もあり、作物種の選定にはこれらを考慮することも重要であろう。

以上、今後は、施設園芸においては、どこで、どのような形態で、何を栽培するかを検討する際、低環境負荷の観点を取り入れることが必要である。

4 さいごに

施設園芸のグリーン化に向けては、新たな環境制御技術や資材開発といった革新的な技術の開発を目指すだけでなく、環境負荷の観点から、これまで培われてきた技術体系を詳細に再評価することが重要である。僅かなりとも GHG 排出削減につながる技術やシステムであれば積極的に取り入れ、それらの成果を蓄積していくことで初めて、施設園芸におけるゼロエミッションやカーボンニュートラルの実現が見えてくる。そのためには、GHG 排出を含む環境負荷に対する評価法の標準化が不可欠である。さらに、それらの低環境負荷に向けた取り組みを後押しする、社会システムの構築も非常に重要な課題であり、研究者のみならず、生産者、政府や地方公共団体、関連産業分野が連携して取り組む必要がある。

<用語の説明>（五十音順）

1) カーボンニュートラル

人為的活動において、CO₂を始めとした温室効果ガス（GHG）の排出と吸収がイコール（実質的に GHG を排出しない状態）になること。

2) グリーン化

環境省によると、経済のグリーン化とは、経済活動が環境に配慮したものとなり、経済活動により自然資源や生態系などの地球環境が回復不能なほど損なわれることがないようにすることと定義されている。本見解では、特定産業分野におけるグリーン化は、持続可能な社会の実現に向け、その産業分野が環境に配慮しながら持続的に発展する（その持続性を維持する）ことを意味する。

3) CO₂施用

光合成の促進を目的に、栽培空間に CO₂ を供給する環境制御法。換気の少ない閉鎖度を高めた施設では、CO₂ 施用により、光合成で吸収した CO₂ を補い、施設内の CO₂ 濃度を維持している。また、光合成促進のために外気より CO₂ 濃度を高めることも多い。

4) CO₂ゼロエミッション

「みどりの食料システム戦略」の中では、農林水産業における燃料燃焼による CO₂ 排出をゼロにすることを CO₂ゼロエミッションと表現している[24]。

5) ゼロエミッション

1994 年に国連大学により提唱された考え方で、環境汚染をするような廃棄物をリサイクルなどにより有効活用することにより、廃棄物を一切出さないようにする（実質的に排出ゼロにする）こと。

6) ソーラーシェアリング

営農型太陽光発電。栽培空間の上部に太陽光発電設備を設置し、太陽光を農業生産と発電とで共有する取組。

7) ヒートポンプ

熱交換等の手法により熱を汲み上げて別の場所に移す技術で、空調等に用いられる。この技術を用いる製品にエアコン、冷蔵庫、給湯器などがある。動力源に電気を用いる場合は電気ヒートポンプという。

8) プラネタリー・バウンダリー

気候変動や窒素・りん循環などの9つの地球の環境要素における持続可能な限界点について定義した概念。人間の活動がその限界を超えると環境に回復不能な変化が生じるとされる。

9) ライフサイクルアセスメント (LCA)

ある製品・サービスのライフサイクル全体（資源採取—原料生産—製品生産—流通・消費—廃棄・リサイクル）又はその特定段階における環境負荷を定量的に評価する手法[25]。

<参考文献>

- [1] IPCC, Climate Change 2021: The Physical Science Basis (2021)
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- [2] IPCC, Special report Global Warming of 1.5 °C (2018)
<https://www.ipcc.ch/sr15/>
- [3] 環境省, 平成9年版環境白書 (1997)
https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h09/mokuji_h09.html
- [4] 経済産業省, 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 (2021)
<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-3.pdf>
- [5] 農林水産省, みどりの食料システム戦略 (令和3年5月策定) (2021)
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/>
- [6] 農林水産省, みどりの食料システム戦略 戦略の概要とめぐる情勢 (令和4年5月) (2022)
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/attach/pdf/index-112.pdf>
- [7] 農林水産省, 農業分野から排出されるプラスチックをめぐる情勢 (令和4年1月) (2022)
<https://www.maff.go.jp/j/seisan/pura-jun/attach/pdf/index-35.pdf>
- [8] 古在豊樹, 施設園芸におけるCO₂ゼロエミッション化に必要な技術, 施設と園芸 (2022)
- [9] 農林水産省, 施設園芸をめぐる情勢 (令和5年4月) (2023)
<https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/sisetsu/attach/pdf/index-55.pdf>
<https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/sisetsu/attach/pdf/index-1.pdf>
- [10] EU, Farm to Fork Strategy (europa.eu) (2020)
https://food.ec.europa.eu/horizontal-topics/farm-fork-strategy_en
- [11] Rabobank, Terugdringing CO₂-emissies glastuinbouw forse uitdaging (2022)
<https://www.rabobank.nl/kennis/d011276772-terugdringing-co2-emissies-glastuinbouw-forse-uitdaging>
- [12] Ikeda T. et al., The effect of CO₂ enrichment in a closed greenhouse equipped with NIR reflecting film and EHP cooling on the yield and quality of tomato fruits during the summer season, J. Agric. Meteorol. 76:104-110 (2020).
- [13] 椎名ら, 植物工場生産野菜のライフサイクルインベントリー分析, 第6回日本LCA学会研究発表会講演要旨集 (2011)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/ilcaj/2010/0/2010_0_131/_pdf

- [14]橋本 康, 太陽光植物工場における俯瞰的科学技術の流れ-植物生体情報(SPA: 植物学)と栽培プロセスのシステム制御(工学)- 植物環境工学 (2013)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/shita/25/2/25_57/_pdf
- [15]高山弘太郎, スマート×ネットワークによる栽培管理の高度化: 植物生体情報活用の必要性和展望, 施設と園芸 (2023)
- [16]奥島ら, パッシブ農業の視点と技術化, 日本農業気象学会講演要旨 (2009)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/agrmet2/sp09/0/sp09_0_220/_pdf
- [17]Steffen W. et al., Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet, Science 347: 6223 (2015)
DOI:10.1126/science.1259855
- [18]農林水産省, 「月面等における長期滞在を支える高度資源循環型食料供給システムの開発」戦略プロジェクト (2021)
<https://www.maff.go.jp/j/shokusan/sanki/soumu/uchushoku.html>
- [19]Ros M. et al., Start of a CO2 hub in Rotterdam: connecting CCS and CCU, Energy Procedia 63: 2691 - 2701 (2014)
- [20]農林水産省, 次世代施設園芸導入加速化支援事業 (拠点整備事業) 事業実施概要 (全体版) (2022)
https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/NextGenerationHorticulture/attach/pdf/jissi_tiku-7.pdf
- [21]日本学術会議農学委員会農業生産環境工学分科会, 報告「持続可能な都市農業の実現に向けて」 (2017)
<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-h170719.pdf>
- [22]佐々木ら, 青果物輸送における緩衝包装が環境負荷削減に及ぼす影響-輸送振動による損傷を考慮したイチゴの LCA-, 農業食料工学会誌 82: 65-76 (2020)
<https://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2010931302.pdf>
- [23]伊吹俊彦・家常高, 傾斜地特有の資源を活用した低コスト施設栽培, 四国傾斜地農業の経営改善に向けた総合研究, 農林統計出版 (2009)
- [24]農林水産省, 「みどりの食料システム戦略」KPI2030 年目標の設定について (2022)
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/attach/pdf/index-55.pdf>
- [25]国立環境研究所, 環境技術解説「ライフサイクルアセスメント (LCA)」 (2009)
<https://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=57>

<参考資料 1> 農業生産環境工学分科会審議経過

【25期】

令和3年

3月30日 第1回農業生産環境工学分科会 今期中における「意思の表出」に関する方針の確認

7月29日 第2回農業生産環境工学分科会 WG活動を中心として「意志の表出」の内容を検討することを確認

令和4年

2月24日 第3回農業生産環境工学分科会 「意思の表出」として「気候変動下の食料安全保障」と「農業を核とした循環型社会構築」に関する見解を作成する方針を確認し、内容の検討を行う担当WGを決定

6月3日 第4回農業生産環境工学分科会 担当WGから提出された「気候変動下の食料安全保障」と「施設園芸のグリーン化」に関する構成案を審議し、今後の手順を確認した。

12月27日 第5回農業生産環境工学分科会において、「施設園芸のグリーン化に向けた課題と展望」に関する概要および構成案を協議した。

令和5年

2月27日 農業生産環境工学分科会でメール審議により、査読のための原案を承認した。

＜参考資料２＞ 公開シンポジウム「施設園芸のグリーン化に向けた課題と展望」

日 時：令和４年（２０２２年）１１月１５日（火）１３：００～１７：００

場 所： オンライン開催

開催趣旨：「経済と環境の好循環」を実現する産業政策として位置づけられているグリーン成長戦略の推進に向け、食料安全保障の基盤を担う農業においても、環境に配慮した発展や持続性の確保、すなわちグリーン化の重要性が増している。政府は、食料・農林水産業の生産力向上と持続性の両立をイノベーションで実現するため、「みどりの食料システム戦略」を策定し、2050年までに達成すべき目標を段階的に設定している。この実現には、多くの技術革新が必要であり、産学官の連携による課題解決が不可欠である。本来、施設園芸は、栽培環境を改変することで、市場性の高い園芸作物を効率的に生産できる可能性を有しているが、環境制御にエネルギーを使用することもあり、省エネルギー化や環境負荷低減がより一層求められている。本シンポジウムでは、植物工場を含めた施設園芸のグリーン化に向け、ゼロエミッション、カーボンニュートラル、資源循環などの観点から、必要な研究・技術開発の方向性について、農業生産環境工学的視点を中心に議論する。

次 第：

13:00 開会挨拶

仁科 弘重（日本学術会議第二部会員、愛媛大学学長）

13:05 趣旨説明

荊木康臣（日本学術会議連携会員、山口大学大学院創成科学研究科教授）

13:20 園芸施設の化石燃料ゼロ消費にむけた課題

奥島里美（日本学術会議連携会員、国立研究開発法人農研機構九州沖縄農業研究センター再雇用職員）

13:40 植物工場における省エネ・省資源技術の海外動向

林絵理（非営利活動法人植物工場研究会副理事長）

14:10 施設園芸・植物工場のエネルギー・物質収支のモデリングと解析

後藤英司（日本学術会議連携会員、千葉大学大学院園芸学研究院教授）

14:55 高精度植物生体情報を活用した施設生産のカーボンニュートラル戦略

高山弘太郎（日本学術会議第二部会員、豊橋技術科学大学大学院工学研究科教授・愛媛大学大学院農学研究科教授）

15:25 地域で発生する有機性廃棄物の施設栽培に向けた資源化

遠藤良輔（日本学術会議連携会員、大阪公立大学大学院農学研究科講師）

15:55 栽培施設の設置場所の最適化

荊木康臣（日本学術会議連携会員、山口大学大学院創成科学研究科教授）

16:15 総合討論

進行：後藤英司（日本学術会議連携会員、千葉大学大学院園芸学研究院教授）

16:55 閉会挨拶

大政謙次（日本学術会議連携会員、高崎健康福祉大学農学部長教授、東京大学名誉教授）

主 催：日本学術会議農学委員会農業生産環境工学分科会、日本学術会議食料科学委員会・農学委員会合同農業情報システム工学分科会

後 援：日本農業気象学会、日本生物環境工学会、日本農業工学会、農業施設学会