

## 2.2.3 農業エンジニアリング

### (1) 研究開発領域の定義

一時はランニングコストの高さから衰退したかに思われた植物工場関連技術は、近年の気候変動による異常気象の多発、植物によるバイオ医薬品製造などの高付加価値物質生産への注目、都市部マーケットでの製品の浸透、LED光源の普及によるランニングコストの低下など、様々な要因が重なり合うことで、再び高い注目を集めている。本項目では、究極の農業エンジニアリングを活用する、ICT活用型高付加価値志向農業ともいえる植物工場関連技術と、植物工場ならではの多彩な栽培環境を利用した植物の環境応答の研究開発について取り扱う。

### (2) キーワード

植物工場、施設園芸、苗工場、都市農業、月面農業、環境調節、LED照明、水耕栽培、農業ロボティクス、AI、作物生育シミュレーションモデル、フェノミクス、アグリバイオインフォマティクス、生体リズム、生体計測、画像情報処理・画像認識、環境ストレス応答

### (3) 研究開発領域の概要

#### [本分野の意義]

植物工場は、光・温湿度・二酸化炭素濃度・培養液組成などの栽培に必要な環境条件を全て施設内でコンピュータ制御することで、季節や場所に捉われずに野菜等の植物を安定的に生産する栽培施設である<sup>1,2)</sup>。閉鎖環境で太陽光を使わずに環境を制御して周年・計画生産を行う「人工光型植物工場」と、温室等の半閉鎖環境で太陽光の利用を基本として、雨天・曇天時の補光や夏季の高温抑制技術等により周年・計画生産を行う「太陽光利用型植物工場」に大別される。特に前者の人工光型植物工場（以下、植物工場）は、砂漠地帯や寒冷地など海外の耕作不適地での植物生産が可能となるため、植物工場は輸出産業としても期待されてきた。最近では、農業人口の減少や異常気象の多発により、国内における社会実装も急速に進んでいる。GLOBALG.A.P.やHACCP、JASなどによる規格・基準の整備が進み、衛生面・安全面が一層強化され消費者にとって身近な存在になってきている<sup>3,4)</sup>。また、薬用植物や遺伝子組換え技術を利用した植物によるバイオ医薬品生産（Plant Made Pharmaceuticals: PMPs）の研究開発や、その生産にも用いられている。さらには、月面農業や都市農業を実現する手段として植物工場は注目されている<sup>5,6)</sup>。都市農業は、人口が集中する都市部で「地産地消」を実現し、フードマイレージの大幅な縮小に貢献できる<sup>7-9)</sup>。また、栽培液タンク内で魚の養殖を行うアクアポニクスも近年注目を集めている<sup>10)</sup>。

植物工場は、都市農業として社会実装されているが、同時に生物学と工学の融合領域である植物工場は、幅広い基礎～応用研究の場でもある。生育の最適化・安定化といったシステム制御の研究開発だけでなく、植物が備える様々な防御機構（代謝コストのかかるストレス応答や、生育のリミッターなど）を環境刺激で解除し機能を最大化するといった先進技術の創出が、今まさに進められようとしている。植物工場は、実用作物を対象に、植物の成長の表現型を数値評価（農業のフェノミクス）し、数式に乗せて解析していく、次世代植物生理学の中核となり得る領域である。商業利用（利益確保）の観点から、数値化の精度は数%オーダーを目指す必要があり、従来の植物生理学と比べ1桁高い精度が要求される。したがって、数値化においては生体内の内部ノイズやパラメータの分布も解析対象となる。また、モデル植物（シロイヌナズナ）とは異なる時空間スケール（数十cm～数m、栽培期間が数週間～数ヶ月）を対象とするため、葉面温度分布や気流の境界層といった物理的制約に紐付けられた植物生理学を構築する必要がある。

植物工場は、植物の生育環境を“シーケンス制御”により最適に調整するシステムである。植物に与えられる様々な環境入力、その順番とタイミングが大事であり、膨大な組み合わせの中から最適な環境入力パターンを見出す必要がある。したがって、生育や体内時計などの自律的な変動と環境入力応答の複合モデルを基

礎とした生育モデルが基礎となる。また、個体差ならびに生理代謝における内部ノイズの影響を縮小するために、生育診断に基づくフィードバック制御やフィードフォワード制御も必要となる。

農業生産プロセスを植物の成長代謝への逐次的な介入（シーケンス制御）であると考え、様々な生理応答に対する分子的な作用機序の解明や、膨大なオミクスデータ・フェノタイプデータの取得・データベース技術のみでは、農業生産における様々な課題の解決は難しい。「市場（利益）→生産（収量）→成長→代謝」の階層的な“目的関数”を連立的に解くモデル研究が必要である。つまり、「各階層における制約条件の具体化」が重要である<sup>11)</sup>。

さらには、情報技術（ICT、IoT、AI）による生育診断、作業機械/ロボットによる栽培・生産プロセスの自動化など、最新の工学技術との親和性が極めて高い領域である。ゲノム編集作物などの栽培試験や生産など、作物育種との関わりも深い領域でもある。

植物工場の技術開発は、LED照明などの基礎生産技術の開発から、フェノタイピングと組み合わせたAI最適化技術の開発、そして葉物野菜だけではなくPMPs生産やアクアポニックスなどの新たなコンテンツの開拓も活発であり、植物科学における総合領域として拡大を続けている。

## 【研究開発の動向】

### 【基本生産技術の確立】

2005年頃までにはレタス類やハーブ類などの生育期間が短い作物において栽培方法は確立していた。2009年に農水省・経産省による全国的な拠点整備事業が行われ、いわゆる植物工場の第3次ブームが始まった。ここでは、植物工場を3倍に拡大し、生産コストを3割削減する目標が設定され、販路拡大と栽培システムの見直しによる最適化・省エネ化が行われた。また、栽培光源を蛍光灯からLED照明に変える取り組みが進められ、2016年には、植物工場は191カ所にまで増加した（2009年時点では50カ所）。また、販路拡大と省エネ化が進むことで、日産5,000株を超える量産型植物工場も実現可能となった。しかしながら、「高コスト構造」という生産における根本課題により、植物工場の半数以上は赤字の状況にあった<sup>3)</sup>。

一方で、甘草やシソなどの薬用植物、低カリウムレタス、アイスプラント、バジル、ブルーベリーなどの機能性野菜、芋類、イネなどの穀物の栽培技術の開発も進められた。

### 【大規模生産のためのロボット技術とAI技術】

2014年頃から、植物工場の大規模化が進められている。大規模化の実現には、作業の能率化と環境の均一化を課題とし、前者は機械（ロボット）技術、後者は照明・空調技術が基本技術となる。ロボット化は、まずは比較的単純な作業である播種、苗の移植が対象とされ、続いて複雑な判断と動作が必要な収穫ロボットが最近の対象となっている<sup>12)</sup>。植物の状態（形状や生育度合い）を判断しながら作業を行うためには、画像認識を備えたロボットのAI化が必要である。また、照明・空調技術も大きな栽培空間における生育のムラを排除するために、栽培状況を逐次モニターし、AIにより照明・空調をフィードバック制御（またはフィードフォワード制御）する必要がある。最近では、植物体の3Dデータを用いて植物体周辺の気流や温度、光強度の分布を可視化し設計する研究開発も行われている<sup>13)</sup>。

これらの作業ならびに栽培のAI化は、日々の生産量の緻密な調節を可能とするため、市場ニーズの変動に合わせた生産量調整（市場ニーズ同期）も可能すると期待される。さらには、レタスやハーブなど、異種の植物を同時に栽培する多品目栽培を実現する基礎となる。

### 【植物による医薬品生産、遺伝子組換え・ゲノム編集植物等の生産】

2006～2011年度の経済産業省プロジェクト「植物機能を活用した高度モノ作り基盤技術開発/植物利用高付加価値物質製造基盤技術開発」ではヒトや動物の医薬品原体となる物質の遺伝子を導入した遺伝子組換え植物（GM植物）に有用物質を生産させ、これを経口投与、または、抽出精製して利用する技術開発が

行われた。例えば、GM ジャガイモを用いた家畜用経口ワクチン原料の生産や、GM トマトを用いた糖尿病等の予防に貢献するとされるミラクリンの生産、GM レタスを用いた酸化ストレスに起因する炎症に有効なチオレドキシンの生産などがあり、他にもイネやイチゴ、ダイズ、レンギョウ、ミヤコグサ、タバコなどを用いた研究開発が進められた<sup>14, 15)</sup>。また、自然環境と隔離された植物工場におけるゲノム編集作物の栽培は、野外での圃場栽培に比べ、消費者によるゲノム編集作物への抵抗感を著しく低下させ、ゲノム編集作物の社会実装の実現に貢献すると考えられている。

### 【フィールド用苗生産とスマートフードシステム】

野菜及び花卉の苗を生産するための施設として植物工場技術は利用されている。種から育てた苗だけでなく培養苗や接ぎ木苗なども対象とし、蛍光灯やLED光を用いることで適度にストレスを与えることにより、高品質な苗の安定供給に貢献している。気候変動にともないストレスに強い苗の需要は益々高まっている<sup>2)</sup>。

農産物の生産から流通、加工、販売、消費に至る広範な領域を対象としたサステナブルな社会を実現するためのスマートフードシステム/スマートフードチェーンが議論されている。生産と流通が双方向に連携することにより、余剰農作物を少なくするためのデマンドチェーン及びサプライチェーンの開発が期待されている<sup>9)</sup>。

## (4) 注目動向

### 【新展開・技術トピックス】

#### 【工学的展開・大規模生産のためのロボット技術とAI技術】

商業ベースの経済的制約（設備投資・運転コストの制約）の下で、大量生産による単価当たりのコスト縮減、ロボット自動化による能率向上、生体画像認識や環境データのAI解析技術の駆使、などが試みられている<sup>12)</sup>。また、利益シミュレーションの基礎となる生育・収量予測モデルの精緻化、販売時点情報管理（POS）データによるデマンド予測など、数理モデル研究が注目されている。さらに、高度なフェノタイピング技術と機械学習により生育予測を可能とし、生育ムラの低減、生育の安定化・最適化を実現するための研究開発がなされている。最近では、植物工場の大規模な苗診断データを利用して大集団の中から特異的な生育を示す苗を選別し、育種に活かすための研究開発もなされている<sup>16, 17)</sup>。

#### 【生物学的展開・環境調節・生育空間調節による高度な生理代謝制御】

オミクス、フェノタイピングなどの大規模な生物学的データが、生産現場においても安価に取得できるようになったため、データに基づく生物状態の評価が可能となっている<sup>14-16)</sup>。また、これまでほとんど研究されてこなかった非自然的な栽培条件における生理代謝の研究が可能となっている。例えば、低気圧（高所環境）、乾燥、微小重力、LED等の特殊光波長域、光や温度の時間的変調（kHzからμHz）などの高ストレス環境制御下における環境応答の利用が可能となっている。これらの生理学的基礎研究による新発見は、植物工場の新技術として直ちに社会実装できる大きなメリットがある。また、宇宙農業を想定した養液栽培技術（ジャガイモ、玉川大学・パナソニック・JAXA）も注目されている<sup>5, 6)</sup>。海外では、噴霧耕（エアロポニックス）が、根圏における細菌叢やVOCsなどの基礎研究をベースに技術開発が注目されている<sup>17)</sup>。さらには、月面農業に必要な植物残渣などの有機性廃棄物のリサイクルを組み込んだ物質循環型システムの研究開発も注目されている<sup>18)</sup>。

#### 【生物学的展開・多品目栽培、栽培品目の拡大、最適栽培の拡大】

レタス類だけでなく、ハウレンソウやバジル等の葉物野菜、イチゴやトマトなどの果菜類、ジャガイモなどの芋類、イネやダイズなどの穀物、薬用植物、ゲノム編集作物など、植物工場はあらゆる植物を生産できるだけでなく、これらの最適な栽培条件・方法をデータ化し、システムとして社会に普及することを可能とする。農業の不確定な要素（天候による環境変動、作業者の経験と勘、生育ムラなど）を極力排除することで、農

業のシステム化の壁となる諸課題を明らかにし、さらには現代植物科学の到達点と未開領域を明らかにすることが期待される。特に、モデル植物（シロイヌナズナ）と異なる時空間スケール（数十cm～数m、栽培期間が数週間～数ヶ月）を対象とするため、物理的制約に紐付けられた植物生理学を構築する必要がある。また、海外マーケットで人気の高いイチゴ生産などの生産においては、花成制御や授粉・収穫ロボットなどの技術開発が求められる。

## 【注目すべき国内外のプロジェクト】

### 【国内】

#### • 大規模生産のためのロボット技術とAI技術（2014年～）

2014年大学発ベンチャー（みらい社他）による日産1万株植物工場におけるLED照明が全面採用された。2014年経済産業省イノベーション拠点立地推進事業（大阪府立大学他）によるレタス日産5,000株植物工場における概日リズムに着目した苗選別と自動移植ロボット・栽培室の自動搬送装置・各栽培棚へのダイレクト送風システム・多色LED光源などの当時の最先端技術が導入された。2017年バイテック社他、2018年セブンイレブン、2018年三菱ケミカル、2019年東京電力グループが日産数万株の大規模植物工場の建設を発表している。また、2018年以降、民間企業による技術開発が急速に進んでおり、スプレッド社が日産3万株を超える大規模化を達成し、ファームシップ社が市場価格予測サービスを開発し、プランテックス社が栽培棚ごとに独立したモジュール型の植物工場を開発している。

#### • 植物の生育・環境応答予測モデルを基盤とする環境適応型植物設計システム（2015年～）

文部科学省H27年度戦略目標「気候変動時代の食料安定確保を実現する環境適応型植物設計システムの構築」に基づく、CREST「植物頑健性」領域（2015-2022年度）、さきがけ「フィールド植物制御」（2015-2020年度）、「情報協働栽培」領域（2015-2020年度）では、植物工場またはその栽培技術が直接的な研究対象あるいは研究試験施設として利用された。人工光植物工場（レタス）、太陽光植物工場（トマト）などの実際の栽培フローにおける生育・環境応答予測モデルの研究や、イネやダイズなどに対するオミクス解析やフェノタイピングの高速化装置としての研究がある。また、JST-AIP加速研究として、ビッグデータ駆動型AI農業創出のためのサイバー・フィジカルシステムの基盤構築を目指したVR/AR/MRを用いた作物のバーチャル空間モデルの研究がある（2021-2023年度）<sup>19)</sup>。

上述の戦略目標とは異なる観点として、「生命システムの動作原理とその数理モデル」に着目した“数理的手法”による研究開発も本来関連している。「生命システムの動作原理の解明と活用のための基盤技術の創出」（2006年設定）、「社会的ニーズの高い課題の解決へ向けた数学/数理科学研究によるブレークスルーの探索」（2007年設定）、「社会における支配原理・法則が明確でない諸現象を数学的に記述・解明するモデルの構築」（2014年設定）、などが該当する。しかしながら、これらの領域における“農業（植物生産）”を直接的に扱ったプロジェクトは少ない。

#### • 実用技術開発

農水省委託事業としては、農林水産省の委託プロジェクト研究「人工知能未来農業創造プロジェクト」（2017-2021年）において植物生体情報とAIによる太陽光植物工場における農産物生産の最適化の研究開発が実施されている（AIを活用した栽培・労務管理の最適化技術の開発（愛媛大学を中核機関とした7法人コンソーシアム））。

2017年NEDO「次世代人工知能技術の社会実装を目指した先導研究」の一つとして「人工知能技術を用いた植物フェノミクスとその応用に関する先導研究（特定非営利活動法人植物工場研究会、産総研、鹿島建設社、千葉大学）」が採択され、レタスなどの園芸作物やその他植物の特性や成長量を総合的定量的に把握し、生育に必要な環境因子の動的作用を解析する植物フェノタイピング技術を人工知能技術によって開発し、さらに植物フェノタイピング利活用基盤として整備し利用可能とすることで植物工場での生産活動や将来的には育種などにも適用し得る応用技術の実現した<sup>16, 17)</sup>。

2018年NEDO「人工知能技術適用によるスマート社会の実現」の一つとして「AIによる植物工場等バリューチェーン効率化システムの研究開発（ファームシップ社、東京大学、パイマテリアルデザイン社、豊橋技術科学大学）」が採択され、野菜の市場価格を予測するAIを開発し、植物工場で生産される野菜の需要を予測して、精密な生産計画を立てる需給マッチング技術を開発している<sup>20)</sup>。

#### ・植物による医薬品生産（PMPs）、ゲノム編集植物の生産

NEDO「植物等の生物を用いた高機能品生産技術開発」（2016～2020年）ならびにJST OPERA「食の未来を拓く革新的先端技術の創出」（2019年度～）においてはゲノム編集作物などの高付加価値作物の実験施設、さらには生産施設として植物工場が用いられている。

### 【海外】

植物工場は世界各国で急速に普及傾向にある<sup>21)</sup>。植物工場に精力的な研究拠点や国際会議・カンファレンスは、昨今にも世界中で急増している。欧米では1億ドル以上の資金調達を行う企業が生まれている（ドイツInfarm社、米国Plenty社、米国Bowery Farming社など）。

主な研究拠点、プロジェクト等としては、以下が挙げられる

- ・オランダ・ワゲニンゲン大学の植物工場プロジェクト<sup>22)</sup>
- ・米国農務省USDA（Ohio State大学、Michigan State大学など）における葉物野菜を対象とした植物工場プロジェクト<sup>23)</sup>
- ・中国：複数大学のグループ（例：Chinese Academy of Agricultural Sciences、その他多数）
- ・韓国：KISTの天然物研究所におけるジンゼンベリーなど高付加価値植物を対象としたプロジェクト<sup>24)</sup>

この他、シンガポールでは政府による政策強化の動きが見られる。

### （5）科学技術的課題

植物工場における基本的課題の一つに、生産プロセスの定常状態の維持が難しいことが挙げられる。植物の生育・生理代謝や装置の経年変化（劣化）などが相互作用するため、植物の受光量や養液組成、装置内のガス組成を一定に保つことは難しい。また、個体差（製品ムラ）が大きい点が、工業製品とは大きく異なる。このような生体に起因する動的で確率論的な性質を理解し制御するにあたって、生態系における数理生物学（数学的な動態解析手法）が参考になる。これまで、成長プロセスはロジスティック方程式<sup>25)</sup>、花成プロセスはFT-FLCモデル<sup>26)</sup>、光合成産物管理はショ糖合成-デンプン分解モデル<sup>27)</sup>、個体間相互作用は格子モデル、概日時計の昼夜サイクルへの同期は位相方程式<sup>28)</sup>、個体レベルの概日リズム形成はKuramotoモデルをベースにした振幅モデルなど<sup>29)</sup>が考案されている。

植物生産においては、生育や機能性物質に関わる二次代謝にとって最適な状態を維持し、極力個体差を排除する技術が必要である。また、播種・苗の移植・定植・収穫といった作業や、品質検査と等級選別を自動処理するための非破壊型の生体計測とロボット技術が必要である。さらに、収穫後の鮮度維持技術も重要である。

さらには、育種利用やゲノム編集作物生産、月面農業など、多方面での利用に向けたアプリケーションの開発が重要である。植物科学の研究者や工場システムの開発者、生産者など、多様なバックグラウンドを持つユーザに対して高度に発展する植物工場システムをVR技術等で可視化し、ニーズを発掘するようなデジタル・プラットフォームの開発が国際市場への展開を図る上で重要である。以上から、植物工場の基礎となる科学技術は、

- ①生理代謝解析（オミクス解析：トランスクリプトーム解析、メタボローム解析）
- ②表現型計測（フェノタイピング、画像解析、機械学習）
- ③生育・代謝モデリング（数理モデル）
- ④品質検査（非破壊法による成分分析）

- ⑤作業ロボット技術
  - ⑥鮮度保持技術 (収穫・トリミング技術、予冷技術、コールドチェーン技術)
  - ⑦デジタル技術 (仮想現実・拡張現実技術、生物シミュレーション技術)
- である。

上述の関連科学技術において、今後、特に研究が必要な課題を以下に挙げる。

#### • 植物の複合環境応答の時系列オミクス解析

植物工場は、植物の生育環境を“シーケンス制御”により最適に調整するシステムである。植物に与えられる様々な環境入力、その順番とタイミングが大事であり、膨大な組み合わせの中から最適な動的な環境パターンを見出す必要がある。赤色や青色などの多色LED照明、温度変化、気流、移植作業などによる物理刺激に対する複合的な応答を、ストレス応答、光合成変化、成長速度変化、形態変化などの異なるタイムスケールで要素分解し、時空間的・統合的に理解し、最適状態を定量的に表現できるようにする必要がある。従って、生物学的知見だけでなく、ダイナミクスを扱う統計モデルや力学モデルも必要となる。

統計モデルとしては永野らのイネ圃場における複合環境における植物の生理応答 (トランスクリプトーム応答) の研究<sup>30)</sup> が世界的に有名であり、CREST「植物頑健性領域」(2015-2022年度) やさきがけ「フィールド植物制御領域」(2015-2020年度) における展開が見られる。一方、力学モデルは成長や概日時計、花成、光合成産物管理、形態形成などを対象とした研究がある<sup>31)</sup>。

#### • フェノタイプング

植物の形状、色、温度、匂い、成分、葉の運動などの表現型を計測し、特徴量の抽出 (特徴量エンジニアリング) と、最適化の目的となる評価関数の設計が必要である。マルチモーダル・AI栽培ロボットの目や耳、鼻といった五感を司る技術となる<sup>11)</sup>。匂いセンサーを用いたハーブ類の香り品質向上のための研究も進んでいる<sup>32)</sup>。

#### • 生育/代謝モデリング

時系列オミクスデータと時系列フェノタイプングデータに基づき、植物生産において最適な生育・代謝を実現するための逐次環境制御を可能とする数理モデリングが必要である。環境応答の非線形特性、タイムスケール、体内時計 (生体リズム)、内部ノイズなどを扱う力学モデルと、オミクスデータ・フェノタイプングデータなどの大規模複雑データの取り扱いに優れた統計モデル (機械学習) が必要である。

#### • 機械と生物の情報融合技術

植物工場内には、植物の集団だけでなく、照明・空調・養液等環境調節機械群、作業ロボット群、作業者集団といったそれぞれが自律動作する動的な集団から構成されている。これらは究極的には情報的に統合・融合し、AIにより最適化される。環境調節や作業ロボットの動作には、固有の時間遅れや位相差がある (自律性の存在) ため、トータルとしての情報融合技術は生産工程全体の最適化において必要となる<sup>11)</sup>。また、ロボットによる全自動化や月面農業など、人が出入りしないシステムへと発展しているため、仮想現実/拡張現実/複合現実 (VR/AR/MR) を用いたバーチャル空間において生育状況や生産プロセスを可視化できるシミュレーション技術 (デジタルツイン、メタバース) への期待も高まっている<sup>10, 33, 34, 35)</sup>。

### (6) その他の課題

植物工場は生物と環境の「システム制御」を基礎としているのに対し、植物科学は現象の解明を目的とする。これらのスタンスは歴史的には大きく異なり、植物科学の延長線上に植物工場の科学技術は置かれてこなかった。植物工場への社会的期待が高まっている現在、植物工場 (人工環境下における植物生産システム) を活用した植物科学の新たな可能性 (システム制御) の探究が期待される。

2009年の農林水産省の植物工場ワーキンググループ報告書では、植物工場は農商工連携のシンボルであり、その工業技術・栽培ノウハウは輸出産業として有望とされた。2016年の植物工場ワーキンググループ調査報告書では、経営的に厳しい状況ではあるが (規制・税制の面で露地栽培と比較して優遇措置が少ない、

生物固有の不安定性の存在、など要因とされた)、植物工場の生産システムを他国に先駆けていち早く確立し、食料生産に不適な海外地域等に対してパッケージとして輸出することで、外貨獲得を通じて日本経済へ貢献することも有望視された。

しかしながら、2017年頃から米国や中国、欧州などで、大規模な研究開発や建設が相次ぎ、国際市場が急速に伸びているにもかかわらず(2025年には約1兆円と予想)、わが国の植物工場は厳しい国際競争に晒されている。ただし、わが国の植物科学や栽培技術は最先端を走っており、海外市場に先進技術を輸出できる好機でもある。一方、民間投資による国内の植物工場は盛況であるが、研究開発に関する情報はほとんど公開されておらず、大学等研究機関との連携が疎かになりつつある。今後の国際競争を鑑みると、産学連携による応用研究と基礎研究の強化が望まれる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	水耕栽培、LED照明、空調管理など、工学的な要素技術の研究基盤が強い。トランスクリプトーム・メタボローム解析の研究基盤を持つ。ゲノム編集作物など高付加価値品種を有する。 一方で、生物学と工学の境界領域であるため、固有の基礎研究が認知されておらず、JSTやNEDO、NAROなどによる直接的な研究資金の投入がなく、世界をリードする専門的な基礎研究が不足。中国・韓国等の海外勢に対する研究競争力が弱まっている。
	応用研究・開発	◎	↗	全国に研究拠点を整備しており、産学連携を擁する基盤を持つ。民間による投資が積極的に行われており、社会実装が進んでいる。また、JAS規格などの品質管理・衛生管理の整備が進められている。大規模化と自動化、数理モデルを用いた生産管理について、民間レベルの研究開発が進んでいる。世界市場に向けた標準パッケージの展開が期待できる。情報技術・シミュレーション技術に優れた複数のスタートアップが起業。
米国	基礎研究	○	↗	総じて優れているが、自動化技術の進捗は不明。
	応用研究・開発	◎	↗	多くのスタートアップとそれをバックアップする資金、人材、システムがあり、innovationを構造的に支えている。植物工場ベンチャー企業が多数。巨額の資金を調達する企業が存在。
欧州	基礎研究	○	↗	総じて優れているが、自動化技術の進捗は不明。
	応用研究・開発	◎	↗	植物工場ベンチャー企業が多数。巨額の資金を調達する企業が存在。
中国	基礎研究	○	↗	国家主導による研究拠点が立ち上がり、急速に成果を出してきている。
	応用研究・開発	○	↗	世界市場に技術提供を開始している。
韓国	基礎研究	○	↗	国家主導による研究拠点が立ち上がり、急速に成果を出してきている。
	応用研究・開発	○	↗	2010年頃より商用化。ソウル地下鉄駅構内に全自動植物工場がオープン(2019年)するなど実用化が進むが、社会実装の勢いは不明。薬草など自国の強みを活かした応用研究が急速に成長している。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発(プロトタイプの開発含む)の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1~2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## 参考・引用文献

- 1) 経済産業省、農林水産省. 農商工連携研究会、植物工場ワーキンググループ報告書2009. [https://www.meti.go.jp/policy/local\\_economy/nipponsaikoh/090424-01.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/local_economy/nipponsaikoh/090424-01.pdf) (2023年2月アクセス).
- 2) T. Kozai, *Smart Plant Factory: The Next Generation Indoor Vertical Farms* (New York: Springer, 2018), <https://www.springer.com/gp/book/9789811310645>.
- 3) 経済産業省.平成 28 年度 地域経済産業活性化対策調査、植物工場産業の新たな事業展開と社会的・経済的意義に関する調査事業 報告書 (2016). [https://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/H28FY/000810.pdf](https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H28FY/000810.pdf) (2021年2月4日アクセス).
- 4) 農林水産省.日本農林規格JAS 0012人工光型植物工場における葉菜類の栽培環境管理. [https://www.maff.go.jp/j/jas/jas\\_kikaku/attach/pdf/kikaku\\_itiran2-332.pdf](https://www.maff.go.jp/j/jas/jas_kikaku/attach/pdf/kikaku_itiran2-332.pdf) (2021年2月4日アクセス).
- 5) 月面農場ワーキンググループ検討報告書 (2019). <http://www.ihub-tansa.jaxa.jp/Lunarfarming.html> (2021年2月4日アクセス).
- 6) 一般社団法人SPACE FOODSPHERE. <https://spacefoodsphere.jp/> (2021年2月4日アクセス).
- 7) 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年7月.<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-h170719.pdf> (2021年2月4日アクセス).
- 8) 日本学術会議・農学委員会・食料科学委員会合同農業情報システム学分科会. (提言) 人口減少社会に対応した農業情報システム科学の課題と展望.2020年9月.
- 9) (一般社団法人) システムイノベーションセンター・スマートフードシステム分科会.スマートフードシステムに関わる政策提言.2020年8月
- 10) T. Kozai, G Niu, J. Masabni, “Plant Factory -Basics, Applications, and Advances”, Academic Press; 1st edition (December 2, 2021)
- 11) 福田弘和「植物環境工学の研究展望:(第七会) 概日時計利用技術」『植物環境工学』31巻4号(2019): 189-197. doi: 10.2525/shita.31.189
- 12) キヤノン電子・植物工場事業.<https://www.canon-elec.co.jp/vegetable-factory/> (2021年2月4日アクセス).
- 13) K. Saito, et al., “Evaluation of the Light Environment of a Plant Factory with Artificial Light by Using an Optical Simulation”, *Agronomy* 10 (2020) : 1663. doi : 10.3390/agronomy10111663
- 14) 福田弘和「安心安全レタスから医薬用レタスまで: 遺伝子発現制御植物工場の開発」『SHITA REPORT』24巻(2007): 82-92. <http://sc.chat-shuffle.net/paper/uid:10021228431>
- 15) 後藤英司「遺伝子組換え植物工場を用いた高付加価値物質の生産」『SHITA REPORT』25巻(2008): 1-10.
- 16) E. Hayashi, et al., “Phenotypic Analysis of Germination Time of Individual Seeds Affected by Microenvironment and Management Factors for Cohort Research in Plant Factory”, *Agronomy*, 10 (2020) : 1680. doi : 10.3390/agronomy10111680
- 17) E. Hayashi, et al., “Variations in the growth of cotyledons and initial true leaves as affected by photosynthetic photon flux density at individual seedlings and nutrients”, *Agronomy*, 12 (2022) : 194. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010194>
- 18) 中井勇介, 他, “月面農場ワーキンググループ検討報告書 第1版 6. 持続的な物質循環システム”, (2019). 遠藤良輔, “月面農場実現のための物質循環システムの提案-月面農場ワーキンググループ検討報告書より-”, *Eco-Engineering*, 31 (2019) : 75.
- 19) M. Hirafuji, “Challenging Next Stage of IoT and Big Data in Agriculture”, Keynote speech, The XX CIGR World Congress 2022, Kyoto.



- 20) NEDOプレスリリース2019年11月「AIを活用した野菜の市場価格の予測アルゴリズムを開発」  
[https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101235.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101235.html) (2023年2月アクセス)
- 21) 植物工場・農業ビジネスオンライン <http://innoplex.org/> (2023年2月アクセス).
- 22) <https://www.wur.nl/en/newsarticle/Sky-High-Plant-flats-with-LEDs.htm> (2023年2月アクセス).
- 23) <https://www.usda.gov/media/blog/2018/08/14/vertical-farming-future> (2023年2月アクセス).
- 24) J.E. Park, et al., “A comparative study of ginseng berry production in a vertical farm and an open field”, *Industrial Crops & Products* 140 (2019) : 111612. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111612>
- 25) 巖佐 庸『数理生物学入門—生物社会のダイナミクスを探る』(東京: 共立出版, 1998)
- 26) A. Satake et al., “Forecasting flowering phenology under climate warming by modelling the regulatory dynamics of flowering-time genes”, *Nat. Commun.* 4, no. 1 (2013) : 2303. doi: 10.1038/ncomms3303
- 27) M. Seki et al., “Adjustment of the Arabidopsis circadian oscillator by sugar signalling dictates the regulation of starch metabolism”, *Scientific Reports* 7, no. 1 (2017) : 8305. doi: 10.1038/s41598-017-08325-y
- 28) H. Fukuda, H. Murase and I. Tokuda, “Controlling circadian rhythms by dark-pulse perturbations in Arabidopsis thaliana”, *Scientific Reports* 3 (2013) : 1533. doi: 10.1038/srep01533
- 29) 徳田功「概日リズムデータの数理解析：振幅モデルによるアプローチ」*時間生物学* (2020) 26 : 100-108.
- 30) Kuramoto, Y. *Chemical oscillations, waves, and turbulence*. Springer (1984)
- 31) A. J. Nagano et al., “Deciphering and prediction of transcriptome dynamics under fluctuating field conditions”, *Cell* 151, no. 6 (2012) : 1358-1369. doi: 10.1016/j.cell.2012.10.048
- 32) 福田弘和「植物工場における概日時計の科学技術」『*植物環境工学*』30巻1号 (2018) : 20-27. doi: 10.2525/shita.30.20
- 33) JST-OPERA マルチモーダルセンシング共創コンソーシアム. <https://opera.tut.ac.jp/problem/> (2023年2月アクセス).
- 34) T.-H. Wang, et al., “The management control system for plant factory that uses the IoT technology in combination with Augmented Reality technology”, 2020 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C) (2020). doi: 10.1109/IS3C50286.2020.00007
- 35) J. Monteiro, et al., “A scalable digital twin for vertical farming”, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* (2022). <https://doi.org/10.1007/s12652-022-04106-2>

## 2.2