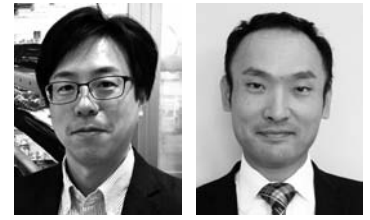


# 植物工場における体内時計の利用

## ～次世代ソフトウェアに向けた研究戦略

大阪府立大学大学院工学研究科・植物工場研究センター／  
准教授、JST さきがけ研究者  
大阪府立大学研究推進本部 URA センター／  
リサーチ・アドミニストレーター

福田 弘和  
西田 泰士



### 要 約

植物工場の国際競争が激化している中、日本の植物工場研究は大きな転機を迎えている。研究開発投資力が海外と比べ劣る中で、知財戦略としてより効率的なソフトウェアの研究開発が急務となっている。植物工場における技術的課題は「生産安定化」「成長予測」「環境最適化」である。これらが生体システムの制御に関する技術課題であることに注意すると、植物生理学に基づいて数理学・情報学を駆使した工学的なソフトウェアの研究の必要性が見えてくる。このような状況の中、生体内の様々な生理現象を統制し効率化している「体内時計」が、次世代アルゴリズムのキーとして注目を集め始めている。本稿では、植物工場が非連続のイノベーションを生み出す工学技術であることを前提とし、次世代ソフトウェアやそのアルゴリズムの基礎となる体内時計の利用技術について解説する。

### 目次

1. はじめに
2. 植物工場と特許
  - (1) 植物工場をめぐる背景
  - (2) 植物工場関連技術の開発における3度のブーム
  - (3) 園芸全般の特許出願トレンド
  - (4) 園芸全般の技術トレンド
3. 次世代ソフトウェア創出のための研究戦略
  - (1) 植物工場における技術課題
  - (2) ソフトウェア研究開発の流れ
  - (3) 3大拠点における先導的研究
  - (4) 次世代アルゴリズム
  - (5) システム制御の基盤としての体内時計
4. 体内時計利用技術の権利化
  - (1) 体内時計関連の特許出願トレンド
  - (2) 大阪府立大学における体内時計利用技術の権利化
5. 体内時計利用技術の展望
  - (1) 学術的背景と植物工場への応用研究
  - (2) 成長予測技術
  - (3) 生産安定化技術
  - (4) 環境最適化技術
6. まとめ

本の植物工場研究は未だトップランナーとして世界の注目を集めている。我が国では、2009年に経済産業省・農林水産省による大規模な先進的植物工場施設整備事業が行われ、愛媛大学・千葉大学・大阪府立大学の3大拠点を中心に、全国10カ所に研究拠点が整備された。これにより、事業期間の3年間で全国の植物工場を3倍に拡大し、生産コストを3割削減するという目標の達成が図られた。

本事業は、いわゆる植物工場における第3次ブームを引き起こし、産業拡大だけでなく、国際競争力を持つ技術開発の進展に大きく貢献してきた。中でも、「生体の計測・制御技術」においては、傑出した成果をあげてきたと言える。詳細は後述するが、植物生産における基本概念である Speaking Plant Approach (SPA) の理念を大きく進展させる「第2世代のSPA」と「SPA物理モデル」が、革新的な技術をもたらそうとしている。特に、2017年のノーベル生理学・医学賞の対象となった「体内時計」にいち早く着手し、高水準の物理モデルを用いて行われたSPA物理モデルの研究は、国際社会における一つのリーディング研究として位置付けできる。これからの国際競争は、ソフトウェア研究開発の優劣で勝敗が分かれる。厳しい国際

### 1. はじめに

国際的に植物工場の研究開発が激化している中、日

競争において、高度学術研究を推進する我が国の優位性は大きい。

本稿は、ソフトウェア研究開発においても日本が牽引役を担い、国際的プレゼンスを発揮するための研究開発の指針をまとめたものである。まず、第2章では、議論の前提知識としての植物工場とその関連特許について説明する。植物工場関連技術の開発における3度のブームと、園芸全般の特許出願トレンドや技術トレンドについて概説する。次に第3章では、新たなソフトウェア創出のための研究戦略について説明する。まず、植物工場における課題を確認し、それを受けてソフトウェア研究開発の将来を考察する。そして第4章では、国際社会をリードする体内時計利用技術の研究と権利化を紹介し、第5章では、体内時計利用技術の学術的背景に基づいて将来展望を紹介する。そして最後に第6章で、本稿のまとめを行う。

## 2. 植物工場と特許

### (1) 植物工場をめぐる背景

世界的な人口増加が続くなか、食料を安定的に生産し供給していくことは極めて重要な課題となってきた。農業の歴史において、農作物の安定生産は常に大きな課題であり、農作物の生産量は天候に左右されるため、天候や土壌、季節などの自然環境に左右されずに計画的かつ安定的に大量生産できる植物工場は、世界的に注目されている。

植物工場は、提供する生育環境においても非連続のイノベーションを生み出す可能性を秘めている。植物工場の人工環境は自然環境を再現するのみならず、自然環境下では得られない特殊な生育環境を作り出すことが可能である。人工透析治療を受けている患者をターゲットとした低カリウム野菜や、薬用植物のような機能性植物を安定的に生産することを目指した技術開発が進んでいる。

さらには、都市農業を実現する手段としても植物工場は魅力的である。都市部への人口集中が叫ばれる昨今、農産物を狭い土地で効率よく大量に生産できる植物工場の特長を活かすことにより、生産地と消費地が同じ地域に共存するという「地産地消」が実現できる可能性がある。これにより、作物の種類によってはフードマイレージ（食料の輸送距離）の大幅な縮小に貢献できる。

このように、植物工場への社会的期待は極めて大き

いものといえる。

### (2) 植物工場関連技術の開発における3度のブーム

植物工場の歴史は古く1950年代にさかのぼる。世界で初めて植物工場開発に取り組んだのは、デンマークのクリステンセン農場と言われている。北欧では、季節によっては日照時間が非常に短く露地での作物の栽培効率が低くなるため、天候や季節に左右されない室内型である植物工場を開発を推し進める必要性があったものと考えられる<sup>(1)</sup>。

日本においては1974年に、日立製作所の中央研究所が植物工場の実用化に向けた先駆的研究を開始している。その後、1985年に筑波で開催された国際科学技術博覧会（つくば科学万博）にて、「回転式レタス生産工場」を展示したことで広く知られることとなった。

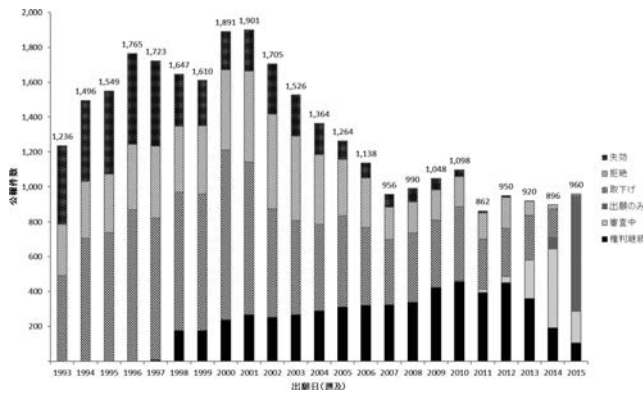
日本における植物工場関連技術の開発は、つくば科学万博を契機として1980年代に第1次ブーム、そして1990年代に農林水産省が植物工場へ補助金を導入したことを契機として第2次ブームがあり、未来の科学技術として世間の注目を浴びたという歴史がある。

そして、第3次ブームは2009年頃となる。2008年9月に経済産業省が打ち出した「新経済戦略」の改定を受けて「農商工連携」の象徴的な事例として、植物工場の普及・拡大を図るという国の意向が示されたことに起因する。その後、経済産業省及び農林水産省は2009年1月に「農商工連携研究会」の下に「植物工場WG」を設置し、植物工場を支援した。2009年4月にとりまとめた報告書において、“植物工場は、「農」の世界に、先進的な「工」の技術や需要先たる「商・工」が協力することで成り立つ、いわば農商工連携のシンボル”として位置づけ、今後3年間で全国の植物工場を3倍に拡大し、生産コストを3割削減する目標を設定した<sup>(1)</sup>。

このように、植物工場は、夢やブームといったものから産業化へ、在り方が変化してきたといえる。

### (3) 園芸全般の特許出願トレンド

植物工場を含む園芸全般の特許出願状況を把握すべく、技術分類記号であるFI記号のA01Gが付与された特許出願件数の推移を確認した。園芸全般の特許出願件数の推移を図1に示す（調査日：2017年12月28日）。

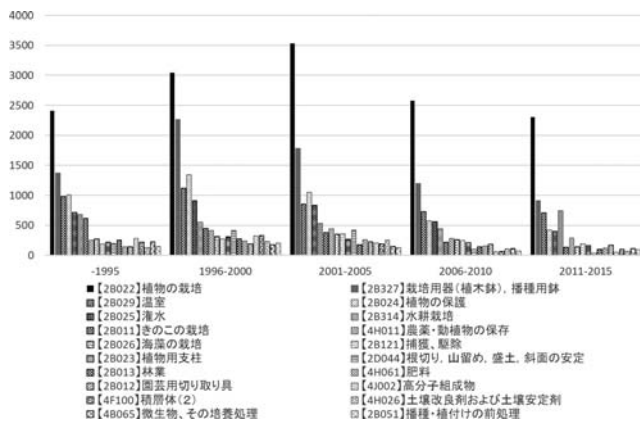


(図1：園芸全般の特許出願件数の推移 [出願日(週)ベース])

第2次ブーム(1990年代)、そして第3次ブーム(2009年～)に対応して、特許出願件数の増加を確認することができる。

#### (4) 園芸全般の技術トレンド

植物工場を含む園芸全般の特許出願から、技術トレンドを調査した。図2に技術トレンドを示す(調査日:2017年12月28日)。技術分類記号であるFI記号にてA01Gが付与された特許出願におけるテーマコード別のトップ20を抽出した。



(図2：園芸全般の技術トレンド)

その結果、下記のような技術トレンドを読み取ることができる。

#### <出願数が多い>

##### 【2B022】植物の栽培

平均572件/年(1996年～2015年平均)と最も多い。  
→共通栽培技術を含むテーマコードであり、環境制御(光の制御、CO<sub>2</sub>処理、温度制御)の重

要性が窺われる。

##### 【2B327】栽培用器(植木鉢)、播種用鉢

平均307件/年(1996年～2015年平均)と2番目に多い。

→給排水、通気性、保水性の向上、さらには根の固定等を目的とした栽培用器技術の開発が行われている。特に、水耕栽培においては、根部への直接接触する養液を格納する栽培用器は重要な役割を果たすため、継続的な開発が行われているものと思われる。

#### <技術トレンド 上昇>

##### 【2B314】水耕栽培

技術トレンドは上昇傾向である。

→養液調整技術は、作物の生長や品質に大きな影響を与えることから、技術開発が活発化してきていると言える。

#### <技術トレンド 下降>

##### 【2D044】根切り、山留め、盛土、斜面の安定

技術トレンドは下降傾向である。

→斜面の浸食防止等、技術的に成熟した分野であり特許出願件数が下降しているものと考えられる。

また、下記の2件のテーマコードはトップ20には入っていないが、特許出願数が増加傾向にあることが分かった。

##### 【5L049】管理・経営・業務システム、電子商取引

栽培プログラム、在庫管理システム及び販売管理システム等に関する特許出願である。

→生産性安定のためのシステム技術に関する特許出願が増加傾向にあり、ICT(情報通信技術)、AI(人工知能技術)及びビッグデータ解析を活用した高度な環境制御へと技術開発の軸足が移りつつあると考えられる。

##### 【2B030】植物の育種及び培養による繁殖

細胞分化促進剤、クローン苗、植物種の選抜方法等に関する特許出願である。

→植物の繁殖において、遺伝子工学等を用いた高効率化や付加価値の高い植物の育成といった方向性が窺える。



このように、技術トレンドを俯瞰することで、ハードウェア（栽培設備）から、ソフトウェア（栽培技術）へ軸足が移動しつつあることが読み取れる。特に、生産性安定や付加価値の高い機能性植物など、植物の成長代謝に関連した生体制御技術に視点が移行しつつある。

### 3. 次世代ソフトウェア創出のための研究戦略

#### (1) 植物工場における技術課題

2016年3月に報告された植物工場の実態調査「一般社団法人施設園芸協会 大規模施設園芸・植物工場実態調査・事例集」<sup>(2)</sup>によると、人工光利用型植物工場は20.6%が黒字、23.5%が収支均衡、55.9%が赤字である。また、太陽光利用型植物工場も同様に22.7%が黒字、27.3%が収支均衡、50.0%が赤字である。一方で、太陽光・人工光併用型施設においては、赤字が10.0%と大幅に圧縮されており、興味深い状況が明らかにされている。本調査報告書によると、経営が安定している事業者は、施設形態に関わらず、栽培開始年からの稼働期間が長く栽培経験の長い事業者が多い。つまり、栽培や販売において「ノウハウの蓄積」が経営において非常に重要であることが分かる。

また、2017年2月に報告された「経済産業省委託調査事業 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」<sup>(3)</sup>では、植物工場の課題とその解決に向けた方向性が示されている。高コスト構造という生産における根本課題の存在を指摘した上で、植物工場の課題を「生産における課題」、「販売における課題」、「経営・財務における課題」に分類し、課題の真因について分析を行い、結論として3つの提言を行っている。1つ目の提言は、「産業形成の基盤づくり」であり、＜ハード・ソフトの標準化＞や＜総合データベースの構築＞など、産業システムとしての構造の可視化を重視している。2つ目の提言は、「バリューチェーン全体における高付加価値化」であり、＜消費者ニーズに即した商品開発＞や＜高付加価値証明のための基準作成＞など、植物工場産野菜に対する独自のプロモーションの重要性が指摘されている。3つ目の提言は、「多様な事業者の共存による産業全体の活性化」である。これらの3つの取組みを通じて「4定（定時・定量・定価・定質）」+「2安（安全・安心）」な生産体系を確立することで、人工光型植物工場が黒字化を達成できる基盤を形成し、“健康・医療への貢

献”、“地方創生への貢献”、および“輸出による外貨獲得への貢献”を実現することが期待されている。

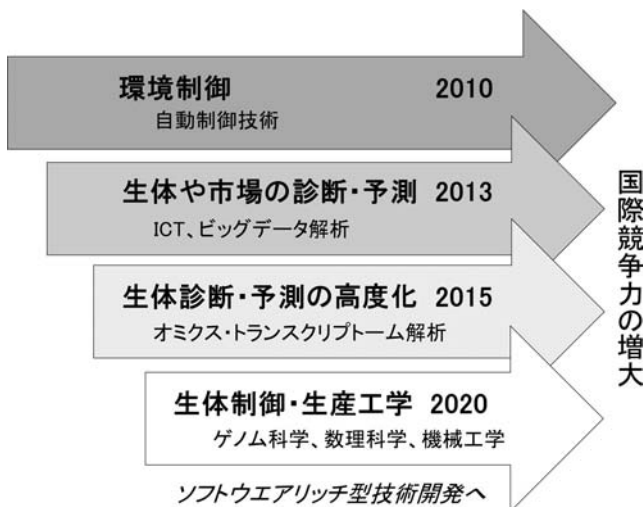
以上を踏まえて、技術開発の視点で課題を分析すると以下のようになる。植物工場は「生産における高コスト構造」が根本課題である。この原因として、1) ハード・ソフトが標準化されておらず、割高かつ過剰スペックになりがちである、2) 栽培ノウハウが可視化されたソフトウェアとして確立しておらず生産量が安定していない（歩留まりが悪く、しかも生育が安定していない）、が挙げられる。ハードウェアについては、多段水耕栽培・LED光源など国内外において大よそ同等のシステムへと集約されつつあるように思われる。しかし、ソフトウェアにおいては、多くの場合ブラックボックス化されており、その優劣は最終産物の野菜の出来具合で推測するしかない状況である。ソフトウェアにおいては、標準化どころか疎かにされている場合も多いと推察される。

以上のように、植物工場の課題解決には、ソフトウェアの研究開発が必須である。産学官連携において早急にソフトウェアのレイアウトを共有し、非競争領域を定義し、非競争領域において標準化を推進する必要がある。次節では、ソフトウェア研究開発の歴史を見ることが、今後の展開を予測したい。

#### (2) ソフトウェア研究開発の流れ

第3次ブーム（2009年～）以降、植物工場の研究開発は急速に進んでいる。図3は近年におけるソフトウェア研究開発の流れを示したものである。第3次ブーム開始時の2010年頃は「環境制御」が中心であり、照明や空調、養液循環、搬送などの自動制御に関するソフトウェアの研究開発が行われた。2013年頃になると、世間ではICT（情報通信技術）やビッグデータが話題となったこともあり、「生体や市場の診断・予測」に関するソフトウェアの研究開発が始まった。2015年頃になると、全遺伝子発現情報などの網羅的な生物情報科学である“オミクス”の応用が注目され、「生体診断・予測の高度化」に向けたソフトウェアの研究開発が始まった。オミクスへの注目は、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）による後押しの影響が大きい。また、2016年には文部科学省の戦略目標として「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」が定められ、それを受け科学技術振興機構（JST）では戦略的創造研

究推進事業として3つの大型プロジェクト（CREST 研究1領域、さきがけ研究2領域）を開始した。これらのプロジェクトでは生物学、情報科学、工学を組み合わせ合わせた総合的研究が推奨され、「オミクス」「数理モデル」「生体制御」といったバイオインフォマティクス・システム科学的アプローチが重視されている。これは、国際的に見ても非常に進んだアプローチであり、世界をリードする成果が期待される。このような国家戦略の影響を受け、2020年頃には「生体制御、生産工学」を駆使した植物工場のソフトウェアが本格的に開発され始めると予想される。



(図3：ソフトウェア研究開発の流れ)

### (3) 3大拠点における先導的研究

全国に設定された植物工場の研究拠点の中でも、愛媛大学、千葉大学、大阪府立大学の研究拠点は3大拠点と呼ばれ、世界をリードする研究開発がなされてきた。特に、大阪府立大学は「人工光」に特化した拠点であり、工業都市「大阪」に立地するトップメーカーを中心にコンソーシアム（現在、会員約60社）を結成した国際的にも強大な研究拠点である。

大阪府立大学の研究拠点では、第1に、空調・光源・養液・搬送など、「工業的システム」の研究開発に重心をおいた研究戦略がとられた。また第2に、ユニバーサルデザインやゼロウェイスト、サイバー市場など「都市農業」の基盤となる技術開発、そして第3に、「生体計測・制御技術」において研究開発が進められた。

特に、「生体計測・制御技術」は、あらゆる植物生産の根底となる技術であり、国際競争力獲得の視点から最も重視されるべき開発課題である。例えば、「生産

安定化」、 「成長予測」、 「環境最適化」などは、あらゆる植物工場が直面する課題であり、これら3大課題に対する対策の有無がその植物工場の経営運命を左右する。技術的には、これらは次世代の植物工場ソフトウェアが担うべき高度なアルゴリズムであり、これらは生体計測・制御技術の研究開発に分類される。

### (4) 次世代アルゴリズム

生体計測・制御技術における最も重要なコンセプトとして、Speaking Plant Approach (SPA) がある<sup>(4)</sup>。SPAは植物環境調節学の基本概念であり、提唱から4半世紀の間、国際農業工学に大きな影響を与え続けてきた。現在、最新のICTやAIを活用した「第2世代のSPA」が、農林水産省「人工知能未来農業創造プロジェクト」の支援を受け、愛媛大学を中心に日本-オランダの国際共同で進められている。太陽光植物工場に実装された第2世代のSPAは、トマト樹群の環境-生物ビッグデータを生み出し、全く新しい生産技術を生み出そうとしている<sup>(5)</sup>。急速な展開が進む第2世代SPAの影響力は非常に大きく、基礎研究の面でも緊急の学術的整備を要する課題が現れている。例えば、ビッグデータに基づく生物モデリングや、そのモデルの特性解析などである。

一方、SPAには「システム制御」という側面がある。生物現象のメカニズムをモデル化し、数理的にシステム制御を実行するというものである<sup>(6)</sup>。また、モデルの分解能を高めるためには、「いつ」「どこで（植物のどの部位で、どの細胞で）」という時空間の情報、さらにはその情報伝播を扱う必要がある。したがって、究極的には「時空間の物理的現象としてシステム制御を追求する」という思考がSPAには存在する。以降、これを象徴して単に「SPA物理モデル」と称する。

SPA物理モデルは、第2世代SPAとはおおよそ基礎理論が異なる。第2世代SPAはビッグデータを対象とした「統計モデル」を基礎としているのに対し、SPA物理モデルは決定論を扱う「力学モデル」を基礎としている。統計モデルと力学モデルは、どのような学問分野においても、それぞれの独立性を持っている。また、それらは次第に高い次元で統合され、ハイブリッドな方法論として実用されていくことが多い。植物工場においては、昨今発展が目覚ましいオミクス技術・ビッグデータ技術・モデリング技術が、第



2 世代 SPA と SPA 物理モデルを高いレベルで融合することを可能にしつつある。

第 2 世代 SPA は、最新の ICT や AI を取り込んでいくまに SPA の進化形であるのに対して、SPA 物理モデルは、物理学と生理学の融合によって SPA の更なる体系化を目指すものである。日本の植物工場研究拠点はこの双方の学術領域をもって強力に基礎研究を推進している点で、国際的な優位性を持っていると言える。

一方で、現在、農業生産の技術開発においては人工知能や ICT 活用によるナレッジマネジメントに注目が集まっている<sup>(7)</sup>。これは、暗黙知や集合知により、個人では到達し得ない高度な栽培手法を引き出すことを目指している。ただし、植物工場は圃場環境とは栽培環境が大きく異なっており、既存の栽培ノウハウだけでは太刀打ちできないことに注意したい。例えば、LED の波長の最適な組合せやその最適な消灯タイミングなどは、歴年の農家であっても経験がなく、推定が困難である。植物システムのメカニズムに立脚した技術開発が必要である。

#### (5) システム制御の基盤としての体内時計

生物現象の力学モデル（決定論的モデル）には、植物の成長モデルや光合成産物の分配モデル、そして花成遺伝子の遺伝子発現回路モデルなど、数多くのモデルが存在する。しかし、この中でも際立った存在感を見せているのが「体内時計」である。体内時計の数理モデルは、物理学としての普遍的な法則を一部取り込んでおり、真の物理モデルに近い。例えば、環境サイクルと体内時計の同期現象を扱う場合、超電導からロボット工学に利用される位相方程式が適用されている<sup>(6)</sup>。今や、体内時計を司る「時計遺伝子」の発現を、非破壊かつ細胞レベルの分解能をもって計測することも可能である。しかもそのダイナミクスが、物理学の方程式で記述されている。

体内時計は 2017 年のノーベル生理学・医学賞の対象となった生物システムであり、生理学的に極めて重要な基礎生理機構である。オミクス解析（全遺伝子発現解析や網羅的代謝物解析）の時間分解能や空間分解能が高まるほど、体内時計の議論が重要となってきている。生理代謝の「いつ」と「どこで」を調節しているのが体内時計であるためである。生理学的にも物理学的にも高度な学術体系をもつ体内時計の研究は、ま

さにシステム制御を目指す SPA 物理モデルの旗手といえる。

## 4. 体内時計利用技術の権利化

### (1) 体内時計関連の特許出願トレンド

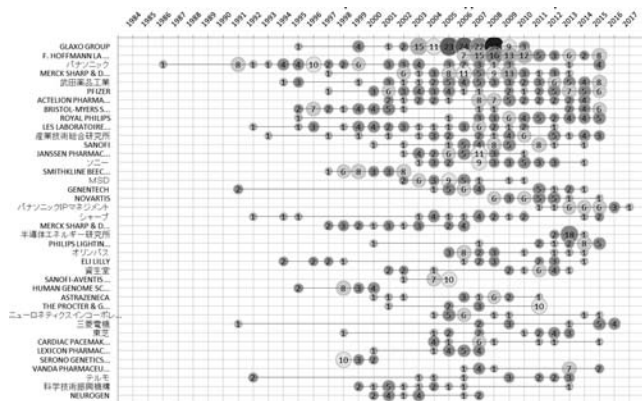
前章で述べたように体内時計は極めて重要な技術であるため、特許出願状況を把握し適切な知財戦略の立案が急務である。体内時計関連の特許出願人の上位 40 社のタイムラインを図 4 に示す（調査日：2017 年 12 月 28 日）。検索条件は以下である。

<検索条件>

- 1 テキスト（全文）体内時計
- 2 テキスト（全文）概日リズム
- 3 テキスト（全文）サーカディアン・リズム
- 4 テキスト（全文）サーカディアンリズム

検索式：1+2+3+4

なお、体内時計（internal clock）は、概日時計（circadian clock）または生物時計（biological clock）とも呼ばれ、体内時計が生み出す約 24 時間周期の生体リズムは概日リズム（circadian rhythm）と呼ばれる。“概日”とはおおむね 1 日という意味である。



(図 4：体内時計関連における特許出願件数の推移 [出願日（遡及）ベース])

検索対象は、植物及び動物の体内時計に関する特許出願を含むものであり、特許出願数の上位には製薬・ヘルスケア企業が多数を占めており、電機メーカーがそれに続く構成となっている。

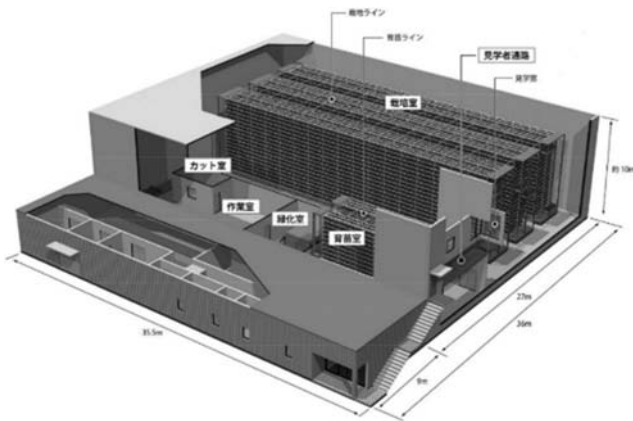
製薬企業による特許出願としては、概日リズム睡眠障害に対する薬剤や、投薬時刻や投薬タイミングにより薬の効き方が大きく異なることを利用したドラッグ・デリバリー・システム等に関する特許出願が確認

できる。また電機メーカーにおいては、概日リズムの計測技術や睡眠改善のための照明技術など、体内時計の計測と制御に関する特許出願が確認できる。

このように、体内時計の技術的かつ社会的重要性を受けて、特許出願は増加傾向であることがわかる。

## (2) 大阪府立大学における体内時計利用技術の権利化

大阪府立大学の植物工場研究センターは、経済産業省による「先進的植物工場施設整備事業」、農林水産省による「モデルハウス型植物工場実証・展示・研修事業」、さらにそれらの成果を踏まえた経済産業省による「先端技術実証・評価設備整備費等補助金」の採択を受けている。それら支援のもと、産学連携で完全人工光型植物工場研究の拠点としてコンソーシアムを形成し、開発・実証・展示・研修などの事業を展開している。2014年9月には、体内時計の特性を利用することで野菜の栽培を効率化させた量産タイプの完全人工光型植物工場を世界で初めて稼働させた(図5)。



(図5：大阪府立大学の大規模植物工場(レタス日産5000株))

植物工場を継続的な事業として成り立たせるために

は、生産性の向上によるコスト低減が重要である。生産性の向上のためには、光源、強度、波長、照射時間、明暗条件など、光環境に関する栽培条件の確立が必須である。ここで、最適な光環境の設定には、植物の概日リズムの知見が不可欠という背景がある(図6)。

植物工場が普及するためには・・・

生産性の向上(コストの低下)



最適な栽培条件の確立

### 【栽培条件】

照明、温度、湿度、CO2濃度 etc.

光源  
強度  
波長  
照射時間  
明暗周期  
etc.

最適な光環境の設定に、概日リズムの知見が不可欠

(図6：概日リズムの知見が不可欠)

大阪府立大学では、これらの背景のもと栽培光による体内時計の制御に関する発明を特許出願し、特許第6012928号として登録されている。本特許では、下記の様にならかなり簡略化された記述となっているが、「体内時計と環境サイクルの同期モデル」<sup>(8),(9)</sup>と2005年に報告されている「サーカディアン共鳴現象」<sup>(10)</sup>が技術の基礎となっている。

本発明の栽培光制御方法では、暗期が光合成活性の低い時間帯または明期が光合成活性の高い時間帯に設定されることで栽培効率を向上させる。光合成活性が低い時間帯は植物固有の概日リズムから求められるが、この時間帯は植物の体内時計における夜明け前1~3時間、つまり午前3時~午前5時頃に概ね相当する。光合成活性が高い時間帯も植物固有の概日リズムから求められるが、この時間帯は植物の体内時計における夜明け後5~7時間、つまり午前11時~午後1時頃に概ね相当する。本発明の方法は、暗期の終期を光合成活性が低い時間帯、すなわち、植物の体内時計における夜明け時刻から1~3時間前に設定する。

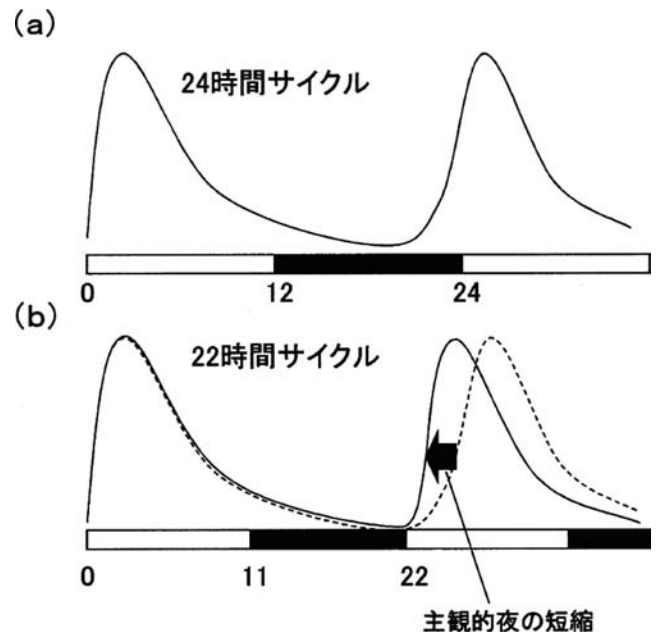
このように、光合成活性が低い時間帯に暗期が設定されることにより、同じ照射時間で栽培した場合に比べて光合成の総量が増大し、これによって出荷可能な

大きくなるまでの栽培期間が短くなり、エネルギー当たりのコストパフォーマンスを上げることができる。

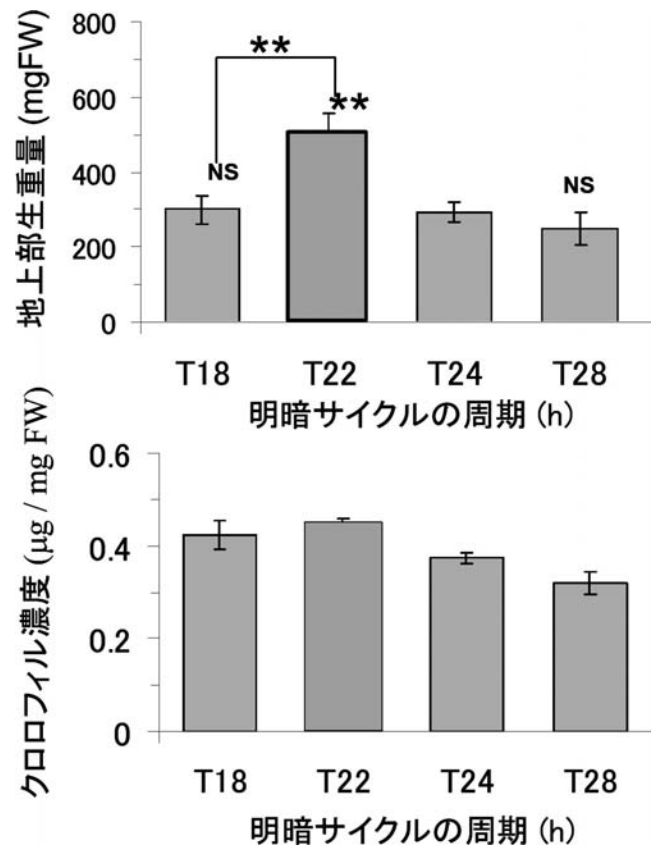
図7は当該制御方法の概念図である。光合成活性に代表される植物代謝はほぼ24時間周期で変動することは知られており、図7(a)に示されるように、明期と暗期が等しい時間からなる24時間の明暗サイクルでは、暗期の終期が体内時計における夜明け時刻に一致する。一方、光合成活性が最小となるのは植物の体内時計における夜明け、つまり暗期から明期に移行する時刻の1~3時間前であると言われている。また、この夜明け1~3時間前の時刻は、光に対する応答性が高まっている時間帯であり、光照射によって体内時計の時刻が数時間前進する時間帯となっている。このことを光による位相前進または位相シフトという。

図7(b)に示されるように、暗期の終期を夜明け1~3時間前に設けることにより、植物の体内時刻を位相前進により数時間早め、光合成活性が低くなる時間帯、望ましくは最低となる時間帯を消去するものである。

このとき、暗期の終期を早められる時間、つまり、明暗サイクルの周期と植物固有のフリーラン周期（連続照明条件または連続暗条件下において観察される概日リズムにおける周期）の差は、植物の概日リズムが同期可能な時間の範囲内となる。この差が大きいと、明暗サイクルと概日リズムが同期できなくなり、その結果、概日リズムは不規則な挙動を示すようになる。概日リズムが不規則となると、十分な成長を期待できなくなる。



(図7：栽培光制御方法の概念図)



(図8：地上部生重量、クロロフィル濃度)

具体的には、播種後20日目に水耕栽培装置に移植し、赤色LEDを光源として、種々の明暗周期の条件下で、温度22℃の環境下（湿度及びCO<sub>2</sub>濃度はコントロールせず）で7日間栽培し、リーフレタスの成長を観察した。

明暗周期を、(a) 明期9時間、暗期9時間の明暗周期 (T18)、(b) 明期11時間、暗期11時間の明暗周期



(T22), (c) 明期 12 時間, 暗期 12 時間の明暗周期 (T24), (d) 明期 14 時間, 暗期 14 時間の明暗周期 (T28) の 4 条件による結果を図 8 に示す。T22 は、T24 よりも収量を増大させることができる。

このように体内時計の最適化植物栽培方法は、体内時計と光サイクルのマッチングによって収量増大が見込める有用な技術である。このマッチングによる収量最大化は「サーカディアン共鳴現象」と呼ばれている<sup>(10)</sup>。

## 5. 体内時計利用技術の展望

### (1) 学術的背景と植物工場への応用研究

本章では、体内時計が次世代ソフトウェアにおけるキーアルゴリズムとなり得ることについて、少し踏み込んで説明する。

環境ならびに生物が「日周性」を持つということは、植物栽培における前提の一つである。しかし、この両者における周期性の同調現象（環境・生物リズムの同調現象）を正確に推し量ることは、簡単ではない。例えば、季節の移りにより日々変化する日長に対して、生物が如何にして体内の時計を同調させていくのかは、基本的な課題ではあるが、正確に推量することは多くの場合簡単ではない。図 9 は著者らが共同研究で行った太陽光植物工場におけるトマトの全遺伝子発現解析の結果である。愛媛大学太陽光植物工場における栽培環境データ (2014 年 1 月 6~8 日) と、トマト葉における全遺伝子の発現解析 (RNA-Seq 解析) となっている。2 日目には降雨があり、環境は揺らいでいるが、全遺伝子発現解析データに見られる日周性は安定している<sup>(11)</sup>。このように概日リズムは揺らいだ環境下においても頑強であり、これによって植物は様々な生理代謝のマルチタスクを安定して実行できる。この体内時計の安定化機構を解明することが、植物生産の安定化において重要である。

また、「環境・生物リズムの同調現象」は物理学の非線形動力学分野において 1960 年代頃から数理的に研究されている<sup>(12)</sup>。一般に、環境サイクルと生物リズムの絶妙な同調関係は、比較的シンプルな数式で記述することができる<sup>(6)</sup>。一見、生物現象は複雑であるが故に、ビッグデータ・機械学習に頼るしかないように思える。しかし、生物現象の動作原理はシンプルであることも多く、もし基礎となる方程式が得られれば挙動の解析は極めて簡単かつ正確に行える。このため、基

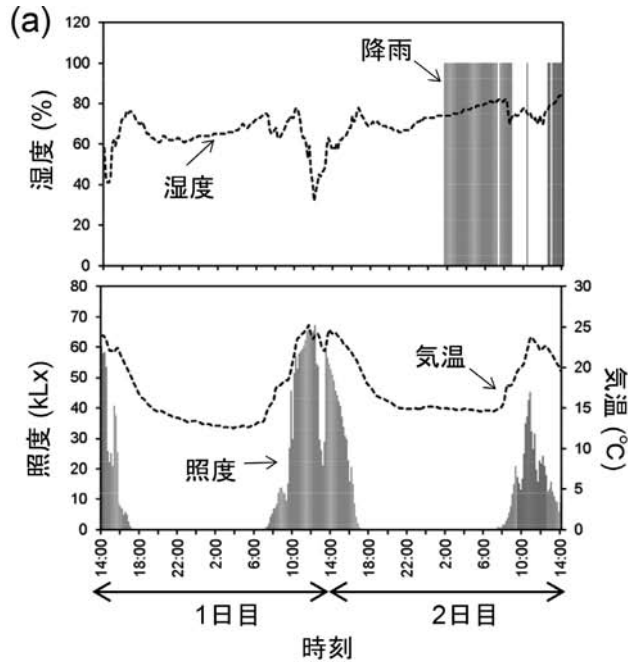
礎方程式を抽出する物理学的手法はビッグデータ・機械学習の計算効率を高め制御工学への道筋を与えると期待されており、ますます重要となっている。

一方で、生理学的・分子生物学的アプローチもますます重要となっている。図 9 に示されるように、体内時計は広範囲の遺伝子の発現に関わり、様々な生理代謝を調節している。2000 年前後に、マイクロアレイを用いた網羅的な遺伝子発現解析により、光合成や細胞形成、二次代謝経路など、重要な遺伝子の発現が体内時計により調節されていることが判明している<sup>(13)</sup>。現在は、イネ<sup>(14)</sup>やレタス<sup>(15)</sup>、シソ<sup>(16)</sup>などの作物種においても次世代シーケンサーを用いたトランスクリプトーム解析 (RNA-seq 解析) により、広範囲の生理代謝が体内時計により調節されていることが分かってきている。また当然、代謝産物の蓄積量や生成量においても概日リズムが観察されており、メタボロミクスとしても体内時計の研究が進められている。このように、オミクス研究においても体内時計は動態解析の基礎として重視されつつある。

さらに、近年、病虫害やポストハーベストに関する体内時計の研究にも注目が集まっている。例えば、収穫後のキャベツやニンジンなどにおいて、体内時計による虫害抑制効果が報告されている<sup>(17)</sup>。虫害を抑制する成分である glucosinolate の濃度が概日リズムを刻み、害虫の活動時間に合わせてその濃度を最大化させるというものである。このように、体内時計は、紫外線などの環境ストレスだけでなく、病虫害などの生物ストレスからも効率よく身を守り、生存率を高める役割を果たしている。一方で、ポストハーベストに関しては、ブロッコリーは収穫後徐々に劣化（黄化）するが、時計関連遺伝子の *GIGANTEA* (*GI*) に変異があることによって、黄化が抑制されるという結果が報告されている<sup>(18)</sup>。このように、生物ストレスやポストハーベストにおいても体内時計の機能が見出されつつあり、応用研究の進展が期待されている。

以上の体内時計に関する科学的進展から、現在、植物工場への応用が期待されている。上述したように、植物工場における技術課題は、「生育（生産）不安定化の解明」、歩留まり向上のための「成長予測（苗診断）」、高品質・低コスト生産のための「環境最適化」である。また、植物工場には、圃場や実験室にはない「多様な環境の生成（非 24 時間の昼夜サイクルなど）」や「大規模かつ連続的な個体集団の生成（播種から収

穫までの定常的なフロー)」などの特性がある。したがって、このような特性を踏まえつつ課題を解決するためには、数理科学的・情報学的な手法が必須である。次節では、植物工場の3大技術課題に対する研究開発の現状を概説する。

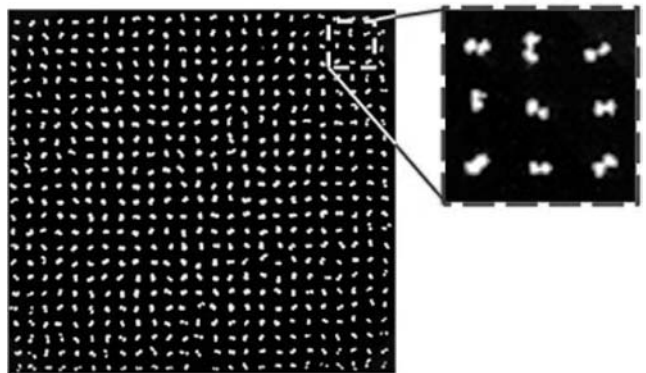


(図9：環境サイクルと遺伝子発現リズム)

## (2) 成長予測技術

成長予測においては、既に大阪府立大学の植物工場において概日リズムを用いた苗診断技術として、技術開発を進めている。ごく初期の幼苗段階においても、クロロフィル蛍光に概日リズムが認められるが、その概日リズムの特徴量により苗の優良性を判断する技術

を開発している(図10)<sup>(19)</sup>。今後、予測精度を上げる技術開発としてAIによる画像解析研究を進めつつ、植物成長と予測手法についての数理的な体系化を目指す必要がある。



## 600株のクロロフィル蛍光画像

(図10：大阪府立大学植物工場における苗診断技術)

## (3) 生産安定化技術

生育不安定化の解明においては、体内時計の物理学的知見が有用である。環境サイクルと概日リズムの同調関係は、パラメータ(体内時計の固有周期や環境への感受性など)に強く依存しながら絶妙に成り立っており、非常にデリケートである。同期における不安定点(同期現象の数理モデルにおける不安定解)がしばしば作用し、生育不安定化を引き起こしている可能性がある<sup>(9)</sup>。植物状態のこのような不安定化現象は確率的な現象であるため、「大規模かつ連続的な個体集団」を対象とした計測がメカニズムの解明に役立つと思われる。著者らは、人工光型植物工場(大阪府立大学)における育苗期の概日リズムの計測を行っている。播種後8日目から15日目にかけて連続撮影を行い、個体毎に画像解析により成長速度を算出している。外見に大きな違いがなくても、個体によって概日リズムの



安定性が大きく違う場合がある。一般に概日リズムの乱れは、生理代謝の不調を引き起こすため、植物工場における生産不安定性に関与している可能性がある。現在、計測システムの拡張を行い、植物工場における生産量と苗の概日リズムの関係を明らかにする研究を行っている<sup>(6)</sup>。

#### (4) 環境最適化技術

環境最適化においては、日長や昼温夜温の設定、暗期中断など、体内時計に基づく様々な農業手法が従来から存在している。しかし今後は、時間的・空間的により一層高精細な環境最適化を目指すことが可能となると思われる。根の体内時計は地上部と質的に異なることや、成長点と葉で体内時計が異なる振る舞いをしていることなどが、ここ10年で次々と判明している<sup>(6)</sup>。植物工場の高い環境調節能力を活かし、時空間的に高精細に体内時計制御を行うことが将来可能になると期待される。

また、植物工場の活路として、高付加価値な植物生産を目指すことが今後ますます重要になる。ハーブ類や薬用植物などは、二次代謝物が植物の価値を決めるため、特にオミクス的手法が必要である。しかし、上述したように、オミクスの動態においても体内時計は切り離せない存在であるため、体内時計の観点から解析が必要である。著者らは、大阪府立大学の植物工場生産販売しているリーフレタス（フリルアイス）において215個の時刻表示遺伝子（明確な概日リズムを示す遺伝子）を同定し、それらの生理学的な機能性の解析（Gene Ontology 解析（GO 解析））を行っている<sup>(15)</sup>。この解析から、光合成関連や硝酸代謝、ビタミンB1代謝のクラスターにおいて概日リズムが強く影響していることが分かった。このような *in silico* 解析（コンピュータを用いた解析）により、どの代謝経路が体内時計を介して調節可能かを事前に把握することができる。GO 解析はトマト<sup>(20)</sup>やシソ<sup>(16)</sup>などにも利用することができ、今後の利用が期待される。

## 6. まとめ

本稿では、植物工場が直面する課題を説明し、生産（栽培）における技術目標として「生産安定化技術」「成長予測技術」「環境最適化技術」があることを紹介した。これら3つの技術目標は、生理学に基づいて数理モデルを駆使することによって達成される生体制御

技術である。現在、農業の技術革新を起こす取組みとしては、ICTやAIによるナレッジマネジメントを誰しも想起するかもしれない。しかし、植物工場における課題の根本は異なることに注意したい。作業の効率化や暗黙知の形式知化が有効な圃場や施設園芸と異なり植物工場では、そもそも何が最適な栽培法なのかが判明していない。例えば、長年の経験を持つ農家であっても、LEDの波長の最適な組合せを推測することは困難である。大気の状態と植物の様子から作業を判断する篤農家も、植物工場の中ではその感覚が上手く活かせないであろう。植物工場における研究開発の方向性は、圃場や施設園芸で求められている方向性とは異なることを認識すべきである。植物工場の栽培技術を従来農業における研究開発とは不連続な生体制御技術として捉える方が適切であると思われる。

植物工場における生体制御技術は、未だ十分研究されていない。研究開発の国際競争が激化する中、各要素技術については知財化を推進しつつも、いち早くソフトウェア全体のレイアウトを示し非競争領域を定義し、標準化を推進すべきである。植物生理学と数理科学・情報学の融合によって創られる体内時計の利用技術は、生体制御技術の基礎として、次世代ソフトウェアの創出に欠かせない技術である。

#### (参考文献)

- (1) 農林水産省・経済産業省，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.
- (2) 一般社団法人施設園芸協会，大規模施設園芸・植物工場実態調査・事例集，2016.
- (3) 経済産業省委託調査事業，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，2017.
- (4) Hashimoto Y., Recent strategies of optimal growth regulation by the Speaking Plant Concept, -as the invited lecture at Berlin ISHS symposium-, *Acta Horticulturae*, 260: 115-122, 1989.
- (5) 高山弘太郎，第2世代のSPAとWageningen，*植物環境工学*，26: 8-14, 2014.
- (6) 福田弘和，総説・招待論文：植物工場における概日時計の科学技術，*植物環境工学*，30: 1-8, 2018.
- (7) 島津秀雄，神成淳司，ルーラル・ナレッジマネジメント～学習する産地を目指して，*パテント誌*，69(15)，46-57, 2016.
- (8) Fukuda H., Murase H. Tokuda IT. Controlling circadian rhythms by dark-pulse perturbations in *Arabidopsis thaliana*. *Scientific Reports*. 3: 1533. 2013.
- (9) Masuda K, Kitaoka R, Ukai K, Tokuda IT, Fukuda H. Multicellularity enriches the entrainment of *Arabidopsis*



- circadian clock. *Science Advances*. 3: e1700808. 2017.
- (10) Dodd AN, Salathia N, Hall A, Kévei E, Tóth R, Nagy F, Hibberd JM, Millar AJ, Webb AAR. Plant circadian clocks increase photosynthesis, growth, survival, and competitive advantage. *Science*. 309: 630–633. 2005.
- (11) Tanigaki Y, Higashi T, Takayama K, Nagano AJ, Honjo MN, Fukuda H. Transcriptome analysis of plant hormone-related tomato (*Solanum lycopersicum*) genes in a sunlight-type plant factory. *PLoS ONE*. 10: e0143412. 2015.
- (12) Winfree AT. Biological rhythms and the behavior of populations of coupled oscillators. *Journal of Theoretical Biology*. 16: 15–42. 1967.
- (13) Harmer SL, Hogenesch JB, Strume M, Chang HS, Han B, Zhu T, et al. Orchestrated transcription of key path ways in *Arabidopsis* by the circadian clock. *Science*. 290: 2110–2113. 2000.
- (14) Nagano AJ, Sato Y, Mihara M, Antonio BA, Motoyama R, Itoh H, Nagamura Y, Izawa T. Deciphering and prediction of transcriptome dynamics under fluctuating field conditions. *Cell*. 151: 1358–1369. 2012.
- (15) Higashi T, Aoki K, Nagano AJ, Honjo MN, Fukuda H. Circadian oscillation of the Lettuce transcriptome under constant light and light–dark conditions. *Frontiers in Plant Science*. 7: 1114. 2016.
- (16) Tanigaki Y, Higashi T, Nagano AJ, Honjo MN, Fukuda H. Transcriptome analysis of a cultivar of green perilla (*Perilla frutescens*) using genetic similarity with other plants via public databases. *Environ. Control Biol*. 55: 77–83. 2017.
- (17) Goodspeed D, Liu JD, Chehab W, Sheng Z, Francisco M, Kliebenstein DJ, Braam J. Postharvest circadian entrainment enhances crop pest resistance and phytochemical cycling. *Current Biology*. 23:1235–1241. 2013.
- (18) Thiruvengadam M, Shih CF, Yang CH. Expression of an antisense *Brassica oleracea GIGANTEA (BoGI)* gene in transgenic broccoli causes delayed flowering, leaf senescence, and post-harvest yellowing retardation. *Plant Molecular Biology Reporter*. 33: 1499–1509. 2015.
- (19) Moriyuki S, Fukuda H. High-throughput growth prediction for *Lactuca sativa* L. seedlings using chlorophyll fluorescence in a plant factory with artificial lighting. *Frontiers in Plant Science*. 7: 394. 2016.
- (20) Higashi T, Tanigaki Y, Takayama K, Nagano AJ, Honjo MN, Fukuda H. Detection of diurnal variation of tomato transcriptome through the molecular timetable method in a sunlight-type plant factory. *Front. PlantSci*. 7:87. 2016.

(原稿受領 2018. 1. 22)