

称号及び氏名	博士（工学） 守行 正悟
学位授与の日付	平成 30 年 3 月 31 日
論文名	「植物工場における生産性向上のためのレタスの成長予測に関する研究」
論文審査委員	主査 杉村 延広 副査 三村 耕司 副査 菊田 久雄 副査 福田 弘和

論文要旨

植物工場は、環境及び生育のモニタリングを基礎として、植物成長にとって最適となる環境制御（光、温度、湿度、二酸化炭素濃度、養分など）を行い、野菜などの植物の周年ならびに計画生産を可能にする栽培施設のことである。本論文では、外環境から遮断して人工的に制御された室内環境で栽培を行う完全制御型植物工場（以下、単に植物工場と記す）を対象として、レタスの成長予測を試みる。

植物工場の生産は、栽培ベッドの多段化による生産の効率化が利点として挙げられる。しかし、室内環境で栽培を行うため初期投資や光熱費の増大が課題としてある。また、生産する植物の成長の個体差が大きく、これによる収穫時の歩留まりの低さも大きな課題となっている。このように、環境の最適制御による生産性の向上よりもコスト面や歩留まりの低さによる利益の損失の方が大きくなる傾向があり、これにより植物工場の半数は赤字経営となっている。

これまで、歩留まりを向上するために栽培環境の制御や調節による生育の安定化や促進を行う研究がなされてきた。しかし、栽培環境を完全に制御しても植物の個体差は遺伝的背景により単純には小さくならない。このため、個体差が存在するというを前提として植物工場の生産性を向上させることが重要であり、個体差を予測し、将来の成長が優良となる個体を早期に判別し選抜する苗診断技術が必要とされている。

個体差の予測に必要な指標は、各個体の大きさ、形状、色などの形態的情報に加え、遺伝子発現などの生理情報も重要な指標である。そこで、本研究では、生理情報の中で植物成長を調節するこ

とが知られている概日時計に着目する。概日時計は、複数の時計遺伝子の相互作用によって自励発振回路を構成し、これが約 24 時間周期の概日リズムを生み出し、多岐にわたる生理代謝を調節している。調節される生理代謝として、光合成活性、花成、葉や茎の展開、伸長速度などが挙げられる。

概日リズムを指標として用い、将来の成長を予測する研究はこれまで行われてこなかった。また、幼苗段階の生物情報から将来の成長量の良し悪しを判断し、苗を自動的に選抜するシステムの研究も行われてこなかった。さらに、植物工場の各生産コストに対する詳細な研究や、植物工場における成長分布（平均成長量と標準偏差）の研究はそれぞれ個別に行われているが、植物の成長分布から植物工場の利益を算出する数理モデルの構築を行った研究は少ない。特に、出荷形態の違いに対応した利益モデルの構築に対する研究はない。

以上のことから、本研究では、植物工場におけるレタスの生産性向上のために、幼苗段階におけるレタスの形態的情報ならびに概日時計の生理情報を基にした育苗段階の成長量を予測する苗診断システムの開発と成長の予測精度の向上について研究を行う。また、出荷形態と成長分布に基づく利益モデルを考案し、そのモデルの感度分析に基づいて生産性向上のための生産計画法の構築を試みる。これらにより、成長予測技術と利益モデルによる生産性の安定化と向上を実現する生産プロセス管理技術について新たな手法の提案を行う。

本論文は 6 章構成となっている。以下に各章の構成と概要を記す。

第 1 章では、研究の背景と目的を記すとともに、本論文の構成と概要について述べている。

第 2 章では、レタス幼苗における時計遺伝子発現の概日リズムを指標として、2 週間後の成長量の予測と、成長予測による生産性向上についての手法を述べている。ここでは、幼苗の時計遺伝子 **CIRCADIAN CLOCK ASSOCIATED 1 (CCA1)** の発現を調べるため、遺伝子組換えレタス **AtCCA1::LUC** のルシフェラーゼ発光計測を用い、各個体の持つ概日リズムの計測を行った。植物体をシャーレに封入し連続的に発光を計測する装置としてコンドートロンを用い、発光量の計測には光電子増倍管を用いた。成長予測の精度の評価は、解析した指標と将来の成長量との相関係数の値で行った。実験の結果、2 週間後の成長量と概日リズムには強い正の相関があり、成長予測において概日リズムが指標となり得ることを示した。また、概日リズムの指標に閾値を設け、閾値以上を示す個体を栽培し、閾値未満を破棄する苗選抜を行うことで生産性が向上することを提案し、検証した。さらには、この苗診断と苗選抜を自動的に行うシステムの基本設計を行い、植物工場に適用する際に必要な仕様と課題を整理した。そして本手法の試作機として、概日リズムの指標を用いて将来の成長が優秀な苗と不良な苗を選抜するピッキングアームを外装した苗診断システムを開発した。

第 3 章では、第 2 章で述べた試作機を発展させ、大規模植物工場において実際に苗診断を実施できるシステムの開発を試みている。ここでは、1 回の撮影で多数の植物体の光合成活性を評価することができるクロロフィル蛍光計測法を苗診断に用いた。高感度冷却 **CMOS** カメラで取得したクロロフィル蛍光画像から、各幼苗のクロロフィル蛍光強度と概日リズムを自動解析した。また、解析した結果に基づき、将来の成長が予測できるレタス苗のみを移植することで生産性を向上させる手法を提案した。この自動苗診断システムを開発するとともに、大阪府立大学植物工場研究センター C 棟に導入し、育苗工程におけるレタス苗の生産性の向上を検証した。苗診断システムによるク

ロプロフィール蛍光強度に基づく概日リズムを計測し、さらに苗サイズなどの形態的指標を機械学習により重畳することで、成長に対する予測精度が向上することを示した。

第4章では、育苗工程のレタスの画像を時系列で取得する成長計測システムの開発と、栽培工程における成長分布を予測する手法について述べている。レタスの上部からカラー画像を撮影し、投影葉面積から個々のレタスの地上部生重量を推定する技術を提案した。この技術を用いた育苗工程の植物成長を時系列に取得する成長計測システムを開発し、各レタスの成長数理モデルの係数を導出する新たな手法を構築することができた。このシステムを用いることで、各個体に対し非破壊で時系列な成長解析が行えること、育苗段階において概日リズムの計測が可能であること、計測データを苗診断システムに重畳することで育苗段階の高精度な成長予測に用いることができることを明らかにした。さらに、概日リズムの環境サイクルに対する同期現象の観点から、植物工場では各個体が置かれている温度と光強度が植物成長の予測において重要な指標であることを明らかにし、画像計測システムによる成長数理モデルの係数と栽培環境である光強度の情報を機械学習により重畳することで栽培工程の成長分布を予測する新たな手法を提案した。

第5章では、植物工場の出荷形態と成長分布に基づく利益モデルの構築について述べている。一般に、植物工場の生産では設定した閾値以上の生重量となるレタスは高価に販売し、閾値未満のレタスは破棄されるか、カット野菜にされ、グラム単位で安価に販売される。そこで、本研究の利益モデルでは、すべての個体をカット野菜で安価に出荷した場合、閾値以上の個体のみを高価に出荷した場合、閾値以上を高価に出荷し閾値未満をカット野菜で安価に出荷した場合、の3種類の出荷形態に対し利益モデルを構築した。さらに、利益モデルにおけるパラメータの感度分析により、栽培日数が最も敏感なパラメータ、すなわち生産プロセスの設計において最も優先度が高いパラメータであることを示した。また、育苗工程における画像計測システムによる生物情報を基に将来の成長を予測し、利益モデルへ適用することで、植物工場の生産性の安定化と向上に繋がる新たな生産プロセスの管理手法を提案した。

第6章では、本論文で得られた成果を総括した。

以上により、本研究では、植物工場における生産性向上のため、レタスの生物情報に基づいた成長量を予測するシステムの開発と成長の予測精度の向上について述べた。また、出荷形態と成長分布に基づいた利益向上のための数理モデルを構築し、植物工場の生産性の向上を実現する新たな生産プロセスの管理手法を提案した。

審査結果の要旨

本論文は、大規模な植物工場における作物の成長予測を行う方法について研究したものである。具体的には、レタスの概日リズムの計測とレタスの画像情報処理で得られる葉の面積の情報から、レタスの成長を予測するシステムを検討し、その試作システムの構築を試みたものであり、次のような成果を得ている。

- (1) 遺伝子組換えレタスのルシフェラーゼ発光量を用いた体内時計(概日リズム)の計測値とレタス幼苗の生重量との相関に基づいて、植物工場の緑化工程における苗を選別する手法を提案するとともに、苗選別を行うシステムを試作した。これにより、概日リズムに基づく苗選別システムの有効性を検証した。
- (2) 大規模な植物工場での実用化を目的として、遺伝子の組換え作物を必要としないクロロフィル蛍光計測手法を適用した。すなわち、本計測手法を用いたレタス幼苗の成長予測手法の提案とシステムの試作を行い、実際の植物工場に適用し、その有効性を検証した。このシステムは、同時に 600 株の幼苗の計測と成長予測が可能である。
- (3) (1)および(2)で提案した手法を拡張し、レタスの概日リズム、育苗工程における苗の葉面積および光量子密度の計測結果に基づいて、レタスの収穫段階における生重量およびその分布を予測する手法を提案した。
- (4) 植物工場におけるレタスの出荷形態が収穫段階の生重量で異なること、および出荷形態により出荷価格が異なることに着目し、レタスの収穫段階における生重量とその分布が植物工場の利益に与える影響を表現する利益モデルを提案した。また、このモデルに含まれるパラメータの感度解析を行い、栽培日数が植物工場の利益に最も影響を与えることを示した。

以上の諸成果は、大規模植物工場におけるレタスの成長予測に関する新しい知見であり、新たな植物工場の研究開発に寄与するものである。また、申請者が自立して研究活動を行うに必要な能力と学識を有することを証したものである。

学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。