

称号及び氏名 博士（工学） 森内 浩史

学位授与の日付 2020年 3月 31日

論文名 「完全人工光型植物工場での栽培植物の生育を  
診断する手法の提案」

論文審査委員 主査 吉田 篤正

副査 横山 良平

副査 福田 弘和

副査 木下 進一

## 論文要旨

日本の食料自給率は 1965 年以降減少しており、近年ではカロリーベースで 40%以下まで減少している。この原因の一つとして、農業従事者人口の減少が挙げられる。また、冷夏、日照不足など異常気象による不作や豪雨、台風などの自然災害の増加なども、食料自給率低下の原因として挙げられる。一方、環境汚染による化学物質の食品への混入や、食品メーカーの製造工程上での化学物質の混入などの食品事故、また細菌混入による食中毒事故などが発生している。そのため、近年食品の品質や安全性についての関心が高まっている。

食料自給率の低下や食品の品質や安全を保障する解決策の一つとして、閉鎖環境で安全に農作物を栽培できる植物工場に、注目が集まっている。植物工場は、施設内で光、温湿度、CO<sub>2</sub>濃度、養分、水分などの栽培環境を制御することができる。そのため、作物は台風などの自然災害による被害を受けず、栽培環境を一様にすることで品質を揃えやすくなる。また、閉鎖空間での栽培のため、外部からの虫や微生物の侵入を妨げることができ、付着微生物が少なく、残留農薬もない清潔な野菜を栽培できる。

植物工場の課題として挙げられる収益向上およびコスト削減のためには、適切な栽培計画が必須で、そのためには栽培環境の変化にも対応できる生育予測手法が必要である。生育予測手法が栽培環境の変化にも対応できるならば、稼働中の植物工場での環境計測結果より栽培植物の生育を向上させる改善策を検討できると考えられる。また、計画中の植物工場において栽培植物に適切な栽培環境を維持するための空調機器の制御条件や照明機器などの設備配置位置の検討が可能になる。そのため、本論文では、CFD(Computational Fluid Dynamics)に植物生理である光合成速度、蒸散速度、葉面積の成長曲線を組み合わせた生育予測手法として、空調シミュレーションツールを開発した。

第1章では、既存の研究をレビューし、本論文の位置付けおよび本論文の概要を示した。

第2章では、稼働中の完全人工光型植物工場における栽培環境（気温、相対湿度、風速、CO<sub>2</sub>濃度および光強度）と栽培植物（フリルレタス）の収穫重量の計測を行った。植物工場内で栽培環境は分布を生じ、収穫重量も分散を生じていた。そこで栽培環境の分布と収穫重量の分散の関係を分析した。定植位置毎に計測した光強度は分布を生じており、最大値は最小値の2倍であった。この光強度の分布が収穫重量の分散の主要因であると診断された。各栽培区画で気温差が生じていたが、収穫重量の平均値に有為な差は生じていないことから、気温差は収穫重量の分散に大きな寄与があるとは認められなかった。計測された風速の範囲は狭く、既往の栽培実験におけるでは収穫重量への影響は小さかったため、栽培室において風速が収穫重量へおよぼす影響は小さいと考えられる。CO<sub>2</sub>濃度の差も小さく、収穫重量へおよぼす影響は小さいと考えられる。このことより、風速およびCO<sub>2</sub>濃度は収穫重量に影響をおよぼさない範囲で制御されていた。なお、隣接した株による成長阻害や定植時の苗の大きさにより収穫重量の分散に寄与することも判明した。

第3章では、栽培環境に応じた植物の生育を予測するために、CFDによる気流解析に、植物の光合成速度、蒸散速度、葉面積の成長曲線をモデル化して、それらを組み込んだ空調シミュレーションツールを提案した。本ツールでは、光合成速度として非直角双曲線による光-光合成曲線のモデルを基にする。光強度-光合成速度曲線を環境因子である気温、風速、CO<sub>2</sub>濃度による関数として定式化を行った。蒸散速度はPenman-Monteith式を基にする。この式は光源からのふく射が蒸発潜熱、周辺空気との対流熱交換、根部からの放熱として放出されることを前提として、光源からのふく射や周囲の気温・相対湿度、風速、葉温および気孔の開度などの植物の状態により定まる定数等に基づいて、蒸散速度を計算するものである。1株全体の光合成速度および蒸散速度は、単位面積当たりの光合成速度および蒸散速度に葉面積を乗じて求められる。植物の成長曲線はS字曲線で近似されるが、植物工場では指数関数的に成長する期間内に収穫されるため、植物の成長を相対成長速度で表す成長解析という手法が適用できる。植物の

葉面積の成長も指数関数的であり、成長解析を適用できると考え、葉面積の相対成長速度および成長曲線の定式化を行った。空調シミュレーションツールはこの葉面積の成長曲線と光合成速度式および蒸散速度を組み合わせたものである。このツールを用いることで、環境に応じた植物の生育を予測することができると思う。

第4章では、植物工場における照明による空調負荷への寄与を把握するために照明実験を、前述した空調シミュレーションツールに用いる諸定数を同定するためにレタスの栽培実験を実施した。照明装置から生じる熱は空調負荷に、光は植物の生育に影響を及ぼすため、照明機器に投入された電気エネルギーが熱と光に生じる際の分配比率を把握するために照明実験を実施した。本実験で用いた Hf 蛍光灯及び LED の照明機器では光と熱の分配比率は大きな違いがないことが判明した。照明機器からの発熱は、ランプ以外の内部回路からも生じており、内部回路を栽培室外に設置することで空調負荷を低減することが可能であると考えられる。栽培実験は、植物の生育におよぼす気温、風速、CO<sub>2</sub>濃度および光強度の影響を把握するために、各環境因子を変化させて栽培を実施した。光強度や CO<sub>2</sub>濃度の増加に伴って収穫重量は増加した。気温と収穫重量の関係は、収穫重量が最大となる気温が存在する上に凸の曲線を示すことが判明した。風速が増加するにつれて収穫重量が減少する傾向が判明した。栽培後の機能性成分の計測結果より、抗酸化成分は光強度に伴って増加し収穫重量と同様の傾向を示したが、気温、風速、CO<sub>2</sub>濃度の空調条件では、収穫重量と逆の傾向を示した。この結果により、収穫重量の確保と抗酸化成分の増加を両立させる栽培工程を検討するための礎を得ることができた。

第5章では、3章で提案した空調シミュレーションツールの有用性を検討した。2章の完全人工光型植物工場における計測結果に本ツールを適用して、収穫重量の予測精度を確認した。収穫重量の予測値と実測値の誤差は±20%の範囲であった。次に実測した植物工場において、栽培環境の分布による収穫重量の分散への影響を診断した。診断の結果、気温差は生じていたが収穫重量には有意な差がみられず、気温差による収穫重量の分散に対して大きな寄与があるとは認められなかった。風速の変動範囲は狭く、収穫重量に大きな影響をおよぼしていない。CO<sub>2</sub>濃度の差も収穫重量におよぼす影響は小さい。このことより、風速および CO<sub>2</sub>濃度は、収穫重量へ影響を及ぼさない範囲で制御されていたと診断された。光強度は、100~200μmol・m<sup>-2</sup>・s<sup>-1</sup>の範囲で分布しているため、収穫重量へおよぼす影響が大きいと診断された。

第6章では、これまでの研究を総括して、今後の課題について述べた。

## 審査結果の要旨

本論文では、完全人工光型植物工場に適用できる環境診断手法を提案することを目的とし

て、CFD(Computational Fluid Dynamics)に植物生理である光合成速度、蒸散速度、葉面積の成長曲線を組み合わせた生育予測手法として、空調シミュレーションツールを開発した。本論文で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 稼働中の完全人工光型植物工場における栽培環境（気温、相対湿度、風速、CO<sub>2</sub>濃度および光強度）と栽培植物（フリルレタス）の収穫重量の計測を行った。植物工場内で栽培環境は分布を生じ、収穫重量も分散を生じていた。そこで栽培環境の分布と収穫重量の分散の関係を分析した。定植位置毎に計測した光強度は分布を生じており、最大値は最小値の2倍であった。この光強度の分布が収穫重量の分散の主要因であると診断された。
- (2) 栽培環境に応じた植物の生育を予測するために、数値流体解析(Computational Fluid Dynamics)による気流解析に、植物の光合成速度、蒸散速度、葉面積の成長曲線モデルを組み込んだ空調シミュレーションツールを提案した。本ツールでは、光合成速度を求めるモデルとして非直角双曲線による光強度-光合成曲線のモデルを基にする。光強度-光合成曲線を環境因子である気温、風速、CO<sub>2</sub>濃度および光強度による関数としてモデル化を行った。植物の葉面積の成長も指数関数的であり、成長解析を適用できると考え、葉面積の相対成長速度および成長曲線のモデル化を行った。
- (3) 空調シミュレーションツールに用いる諸定数を同定するために、レタスの栽培実験を実施した。植物の生育におよぼす気温、風速、CO<sub>2</sub>濃度および光強度の影響を把握するために、各環境因子を変化させて栽培を実施した。完全人工光型植物工場における計測結果に本ツールを適用して、収穫重量の予測精度を確認した。収穫重量の予測値と実測値の誤差は±20%の範囲であった。次に実測した植物工場において、栽培環境の分布による収穫重量の分散への影響を診断した。診断の結果、光強度は、100～200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の範囲で分布しているため、収穫重量へおよぼす影響が大きいと診断された。

以上の諸成果は、完全人工光型植物工場において栽培環境に応じた収穫重量を予測し、栽培植物の生育状況や栽培環境の診断を行うことが可能であることを示したものである。稼働中の栽培環境の診断だけでなく、設計段階での植物工場における栽培環境の制御条件、照明や空調機器の能力選定に活用でき、植物生産分野に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うにあたり、十分な能力と学識を有することを証するものである。