

称号及び氏名 博士（情報学） Nguyen Quang Thinh

学位授与の日付 2022 年 3 月 31 日

論文名 植物工場製レタスの収益性改善のための取引市場およびその支援技術に関する研究

論文審査委員 主査 岩村 幸治

副査 宮本 貴朗

副査 平林 直樹

副査 杉村 延広（大和大学）

論文要旨

近年の世界的な異常気象・気候変動により作物の不作や収穫量減少が頻発し、世界の食料の生産および供給に大きな影響を与えている。そこで、閉鎖された栽培空間を制御することにより、季節変動・天候変動などの自然環境に左右されない植物の食料を安全に安定して供給できる植物工場が期待されている。

植物工場は、閉鎖された栽培空間における光、温湿度、二酸化炭素濃度、水分、栄養分などの植物の成長に必要な環境を制御することで、一年を通じて計画的、安定的に野菜や花卉を出荷することを可能とする生産システムである。植物工場は、光合成に必要なエネルギーを自然光から得る太陽光利用型植物工場と、外光を遮断する完全閉鎖の栽培空間において人工光からエネルギーを得る完全人工光型植物工場に大別される。本研究では、完全人工光型植物工場（以下、植物工場と呼ぶ）を研究の対象とする。

日本における植物工場の施設数は、2019 年 2 月時点で 202 箇所まで増加したが、その半数以上が赤字となり、多くの植物工場が倒産している。一方、2013 年以降は日産 1 万株以上の大規模な植物工場が複数作られている。植物工場が大規模化している理由として、研究開発の成果、栽培ノウハウの蓄積、および大量生産により生産コストが大幅に削減したこと、卸売市場での販売と大手販売店との取引など安定的な販路を確保したことが挙げられる。

しかし、収益を確保するために新規に建設する植物工場が大規模化する反面、既存の中規模・小規模の植物工場の経営は厳しさを増している。すなわち、卸売市場で薄利多売の取引を行う大規模な植物工場と価格競争を行うのは、収益面で大変な困難を伴う。また、卸売市場で取引する場合は、一般の露地物野菜と同じ取り扱いにされるため、植物工場で生産された野菜の特長である「無農薬・定量・定品質・安定供給」を適切に評価した買取先を確保する必要がある。

以上の背景の下、大規模な植物工場だけでなく中小規模の植物工場でも収益を確保できる植物工場で生産された野菜の専用の取引市場とその支援技術が必要されている。本研究では、植物工場で生産されるレタス（以下、植物工場製レタスと呼ぶ）を対象として、以下の3つの研究を行った。

- (1) 植物工場の収益性を改善するために、複数の植物工場と購入者が、市場原理に基づいて植物工場で生産されるレタスを取引することができる植物工場製レタス専用の取引市場を提案した。また、提案する取引市場において、植物工場は将来の収穫量を見込んで販売を行うため、栽培工程の途中で歩留まりを測定することで、収穫時点での歩留まりを見積もる方法を提案した。さらに、取引市場、植物工場および購入者から構成するシミュレーションシステムを開発し、売買価格が均衡する場合の取引のシミュレーション実験を行った。
- (2) 提案した取引市場では、植物工場製レタスの需給に応じて取引の価格が変動する。したがって、植物工場は、販売価格が高くなる時期に取引を行うことで大きな収益を得ることが期待できる。そのため、植物工場製レタスが価格の影響を受けやすい卸売市場における露地物レタスの取引量を予測する時系列モデルを求めた。また得られた時系列モデルを分析し、露地物レタスの需要に影響を与える野菜の取引量と取引価格の時系列データを説明変数とする回帰モデルを提案した。
- (3) 予測した露地物レタスの需要が大きい時期に、提案する取引市場で販売するためには、植物工場製レタスの保存期間が長いほど大きな収益を得ることが期待できる。野菜など生鮮食品を高品質で長期的に保存する方法として、凍結に近い未凍結状態となる過冷却が注目されている。一般の冷蔵保存を用いた食品よりも高鮮度保持化および高品質化が可能となる過冷却を用いた植物工場製レタスの保存方法について提案し、長期保存の有効性について検証した。

本論文は5章から構成し、1章では研究の背景として、特に中小規模の植物工場の経営が厳しい要因などについて述べた。また、2章から4章で上記3つの研究の提案内容と得られた成果について述べた。最後に5章で、本論文の全般的な総括を行い、得られた結論を要約した。以下に第2章から第4章で提案した内容と得られた成果の概要についてまとめる。

第2章で提案した内容と得られた成果は以下の通りである。

- (1) 複数の植物工場および購入者が、証券取引所の取引ルールである板寄せ方式およびザラバ方式に基づいて、植物工場製レタスを取引することができる公開取引市場を提案した。植物工場製レタスの場合は露地物レタスとは異なり、品質が均一で安全性が高いため、卸売市場に集荷し現物を確認して取引する必要はない。また、植物工場製レタスの生産は、計画生産に基づいて定量出荷が可能で播種から収穫まで約1か月以上と長い。そのため、播種日前に一定量の取引を成立させた上で生産する品種を決定し、生産する品種を変更できない播種日以降は、気候の変動などに伴う需要の変化に応じて、きめ細かく売値を変更することで中小規模の植物工場の経営の安定に寄与すると

考える。したがって、播種日の2日前までは板寄せ方式、以降、出荷日の2日前まではザラバ方式とする2種類の取引方法に基づいて、複数の植物工場および購入者が売買取引に参加することができるインターネットを利用した公開取引市場を提案した。

- (2) 植物工場が、植物工場製レタスの生産の最終工程である栽培工程の途中で歩留まりを測定し、その結果に基づいて収穫時点での歩留まりを見積もる方法を提案した。この方法では、栽培工程における植物工場製レタスの歩留まりの測定回数が多いほどその予測値の標準偏差が小さくなる。そのため、最終工程の途中で歩留まりを計測することで歩留まりを計測しない場合に比べて正確に出荷量を予測することができる。
- (3) 取引市場、植物工場および購入者から構成するシミュレーションシステムを開発し、売買取引の実験を行った結果、以下のことが分かった。
 - ① 買い注文および売り注文の価格が均衡している状況において、板寄せ取引における売買価格は、特売イベントなどで需要が増加すると高くなり、注文量の需給のバランスが取れると注文価格と同等程度になり、市場原理と合致する。
 - ② 売り注文および買い注文の価格および注文量が均衡している状況においては、レストランおよび個人消費者などの小口購入者の方が買い注文の約定割合が高くなる。帳合業者、スーパー、生協などの大口購入者については、板寄せおよびザラバで早めに買い注文を出した購入者の約定割合が高くなる。
 - ③ 植物工場が製品の歩留まりを予測し、その結果に基づいて売り注文数量を決定することにより、製品不足による機会損失および売れ残りによる廃棄損失などが減少する。

第3章で提案した内容と得られた成果は以下の通りである。

- (1) 東京の大田市場と大阪中央市場における露地物レタスの取引量を対象として1変量時系列モデルの季節自己回帰和分移動平均モデル(Seasonal Auto-Regressive Integrated Moving Average Model: SARIMAモデル)を同定した。また、SARIMAモデルの同定結果から、露地物レタスの取引量を予測する場合に、何ヶ月前の取引量が影響を与えているかを分析した。ここで、本実験を含むすべての実験において、各卸売市場における2006年から2016年の月次データを用いてモデルを同定し、2017年のデータを用いて12月先までの予測を行った。
- (2) 各卸売市場における露地物レタスを含む4種類の野菜の数量と価格を用いた多変量時系列モデルとして、ベクトル自己回帰モデル(Vector Auto-Regressive Model: VARモデル)を同定した。また、VARモデルの同定結果から、各卸売市場における露地物レタスの取引量と相関が高いデータを明らかにした。
- (3) SARIMAモデルとVARモデルの分析結果から、露地物レタスの取引量に対して相関が高いデータを説明変数とした回帰モデルを提案し、露地物レタスの販売量の予測を行った。その結果、説明変数の数および予測精度評価指標である二乗平

均平方根誤差 (RMSE) の 2 つ観点において SARIMA モデルまたは VAR モデルを用いて予測した結果と比較して、提案する回帰モデルを用いることで少ない説明変数で高い精度で予測を行えることを示した。

第 4 章で行った実験の概要および結果は以下の通りである。

- (1) 植物工場製レタスが過冷却の状態となる凝固点から核形成点までの温度の範囲を求めた。この結果、植物工場製レタスの凝固点は -0.2°C であり、核形成点は -1°C から -6.1°C までの範囲であることが分かった。
- (2) 植物工場製レタスが過冷却の状態を維持するための包装方法および冷蔵庫の温度設定の実験を行った。実験結果から、植物工場製レタスを 2 重包装し、冷蔵庫の温度設定を -1°C から -4°C の範囲にする場合が、植物工場製レタスの冷却速度を抑制し凍結のリスクを低減することで、過冷却を用いた保存に有効であることを示した。
- (3) 過冷却を用いた植物工場製レタスの長期保存の実験を行い、糖分含有量、重量減少率、および一般生菌数の変化を調べた。結果として、糖分含有量の変化については、過冷却を用いた保存および冷蔵を用いた保存の両方の場合においてほぼ同じである。一方で、過冷却を用いて保存したサンプルは、重量の初期状態からの減少が小さく、3 週間の重量減少が 2%にとどまった。また、過冷却を用いて保存した場合の一般生菌数は、通常の冷蔵を用いた場合よりも明らかに少なく、安全な状態で保存できることが分かった。

初出一覧

No	論文題目	著者名	発表誌名	本論文と の 対応
1	植物工場レタスの取引市場の提案と取引のシミュレーション	Nguyen Quang Thinh, 岩村幸治, 杉村延広, 浦出俊和, 竹歳一紀, 香川文康, 平原嘉幸, 木下康宏	日本機械学会論文集, 2019, 85(871), p.1-19.	第 2 章
2	A demand forecasting of lettuces in wholesale markets for trading markets of plant factories	Nguyen Quang Thinh, Shohei Kohama, Nobuhiro Sugimura, Rajesh Shrestha, Koji Iwamura, Eiji Morinaga, Naoki Hirabayashi	Proceedings of International Conference on Design and Concurrent Engineering 2021 & Manufacturing Systems Conference 2021 (iDECON/MS2021). 2021, Online.	第 3 章
3	A study on supercooling processes of leaf lettuces produced in plant factory	Nguyen Quang Thinh, Koji Iwamura, Rajesh Shrestha, Seisuke Fukumoto, Ryo Takemitsu, Jun-ichi Yamaguchi, Kazunuki Kimura, Yoshitaka Tanimizu, Nobuhiro Sugimura	Proceedings of 2016 International Symposium on Flexible Automation (ISFA 2016). 2016, p.77-80.	第 4 章
4	A study on supercooled storage of leaf lettuces produced in plant factory	Nguyen Quang Thinh, Koji Iwamura, Rajesh Shrestha, Nobuhiro Sugimura	Japan Journal of Food Engineering. 2017, 18(1), p.25-32.	第 4 章

学位論文審査結果の要旨

学位論文提出者氏名： グエン クアン テイン

学位論文題目：植物工場製レタスの収益性改善のための取引市場およびその支援技術に関する研究

本学位論文は、人工光型植物工場（以下、植物工場と呼ぶ）に関して、大規模な植物工場だけではなく、経営環境が厳しい中小規模の植物工場についても収益性を改善することを目的として、植物工場製レタスの専用の取引市場とその支援技術について提案している。具体的には、以下の3つの研究を行っている。

- (1) 複数の植物工場と購入者が、市場原理に基づいて植物工場製レタスを取引できる専用の取引市場を提案している。また、提案する取引市場において、植物工場は将来の収穫量を見込んで販売を行うため、栽培工程の途中で歩留まりを測定することで、収穫時点での歩留まりを見積もる方法を提案している。さらに、取引市場、植物工場および購入者から構成するシミュレーションシステムを開発し、取引のシミュレーション実験を行っている。
- (2) 提案した取引市場では、植物工場製レタスの需給に応じて取引の価格が変動する。したがって、植物工場は、販売価格が高くなる時期に取引を行うことで大きな収益を得ることが期待できる。そのため、植物工場製レタスが影響を受けやすい卸売市場における露地物レタスの取引量を予測する時系列モデルを求めている。また、得られた時系列モデルを分析し、露地物レタスの需要に影響を与える野菜の取引量と取引価格の時系列データを説明変数とする回帰モデルを提案している。
- (3) 予測した露地物レタスの需要が大きい時期に、提案する取引市場で販売するためには、植物工場製レタスの保存期間が長いほど大きな収益を得ることが期待できる。また、野菜など生鮮食品を高品質で長期的に保存する方法として、凍結に近い未凍結状態となる過冷却が注目されている。一般の冷蔵保存を用いた食品よりも高鮮度保持化および高品質化が可能となる過冷却を用いた植物工場製レタスの保存方法について提案し、長期保存の有効性について検証している。

上記の成果について、本学位論文審査委員会は、人間社会システム科学研究科現代システム科学専攻の博士論文審査基準に照らして厳正な審査を行い、以下の評価と結論に至った。

- 1) 博士学位申請者が主体的に取り組んだ研究であること。

本研究は、申請者が工学研究科博士後期課程の3年半および本研究科博士後期課程2年間の在学中に、入念な調査に基づいた研究計画を策定した上で、論理の提案、システム・プ

プログラムの実装、有効性を評価するための実験、論文の執筆など、一連の内容について主体的に取り組んだ研究であると認められる。

2) 研究内容に新規性および独創性を有していること。

本学位論文の主となる第 2 章の植物工場製レタス専用の取引市場の提案は、これまでに例が無い。植物工場製レタスの場合、重量など品質のばらつきが小さいため、個体差の大きい露地物レタスとは異なり、現物の確認を行わずに売買の取引を行うこと、また、生産品種を決定する播種日までの一定期間の需給、および播種後から出荷日までの各時点における需給に応じて取引を行う点に、独創性を有している。また、第 3 章における露地物レタスの取引量を予測する回帰モデルの提案、第 4 章における植物工場製レタスを対象とする過冷却保存の方法についても、それぞれ、過去に例が無く新規性を有している。

3) 当該研究分野の発展に貢献する学術的価値が認められること。

第 2 章で提案する取引市場のシミュレーション実験により、需給バランスに対する取引量や取引価格への影響、注文日や注文量が取引結果に与える影響を定量的に示し分析していること、また、第 3 章における提案する回帰モデルの予測精度が時系列モデルおよび他の回帰モデルによる予測精度と比較して優れていること、および第 4 章における植物工場レタスを長期に過冷却保存するための方法とその効果を明らかにしたことは、それぞれ、植物工場製レタスに関する研究分野の発展に貢献する学術的価値が認められる。

4) 論文の構成および内容が適切であり、論文としての体裁が整っていること。

・ 先行研究を含めて研究背景および課題が記述され、研究目的が明確であること。

研究背景として、国内で植物工場の数は増えている一方、赤字の植物工場が半数以上であること、大規模化する植物工場が薄利多売のビジネスを展開する中、中小規模の植物工場の経営環境が特に厳しいこと、またその課題として、植物工場製レタスの品質に対して適切な価格での売買が行われる必要があることが、明確に示されている。この課題を解決するための研究目的として、植物工場製レタス専用の取引市場を提案すること、専用の取引市場で有利な取引を行うために、植物工場製レタスの取引に影響を与える露地物レタスの予測方法および過冷却を用いた保存方法の必要性が明確に示されている。

・ 研究方法が明確に記述され、研究目的を達成するために適切なものであること。

上記 3 つの研究目的を達成するための提案内容、システム・プログラムの実装、実験の内容は、先行研究の知見に基づいて十分に吟味され、明確に記述されている。

・ 結果およびそれに対する考察が論理的に記述され、研究目的に対応した結論が適切に導き出されていること。

十分なサンプルに基づいて行われた実験結果に対して、定量的な評価に基づいて結果を考察しており、十分に吟味して論理的に研究目的に対する結論を導出している。

・ 文献が適切に引用されていること。

第 1 章の植物工場の概要に関連する文献 (18 件)、第 2 章の植物工場の取引市場に関連する文献 (18 件)、第 3 章の時系列モデルおよび回帰モデルに関連する文献 (18 件)、第 4 章の過冷却に関連する文献 (23 件)、合計 77 件の文献が、それぞれの観点から適切に引用され、研究を位置づけている。

5) 学位論文の公聴会での論文内容の発表および質疑応答が論理的に明確に行われていること。

公聴会での論文内容の発表は、論文の全般について論理的かつ明確に述べられた。質疑応答も論理的かつ適切なものであった。