



Development of drone- and AI-based technology for diagnosing and predicting lettuce growth

中野, 伸一

(Degree)

博士 (農学)

(Date of Degree)

2025-09-25

(Date of Publication)

2027-09-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第9334号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100498374>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文内容の要旨

氏 名 _____ 中野 伸一 _____

専攻・講座 _____ 資源生命科学専攻・応用植物学講座 _____

論文題目（外国語の場合は，その和訳を併記すること。）

Development of drone- and AI-based technology for
diagnosing and predicting lettuce growth

（ドローンと AI を活用したレタスの生育診断・予測技術の開発）

指導教員 _____ 宇野 雄一 _____

世界的な物価高騰と気候変動が問題となる中、世界人口は増加の一途をたどり、農業生産はこれらの問題を乗り越え、その需要に応える必要に迫られている。土地生産性を保ちながらいかに労働生産性を上げていくかが課題となるが、その解決策の一つとして世界的に注目されているのがドローンと人工知能、機械学習を利用した精密農業である。本研究では兵庫県の淡路島におけるレタス産地を対象に、生産現場における生育診断、収量予測、収穫日予測へのニーズに応えるために、これらの精密農業に関する技術を活用したドローンリモートセンシングによるレタスの生育予測を試みた。

野菜の露地栽培では、地力や非生物的ストレスに生育が大きく左右されるため、生育診断技術は収量の正確な予測や出荷安定に大きく貢献する。露地栽培のレタスの生育は、施肥量や降雨後の湿害の影響を受けやすく、頻繁に供給量に乱れが生じる。またレタスは生鮮食品としての利用が多いが、冷蔵貯蔵による保存期間が短いため出荷調整がしにくい。そこで本研究では、マルチスペクトルカメラを搭載したドローンの空撮画像によるレタスの生育診断技術の開発するために、ドローンで取得した NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) とレタスの生育および収量との関係を明らかにすることを目的とした。肥料の量を 4 水準に設定した試験では、収量、成長パラメーター、全窒素含有率が、施肥量に対応して増減した。結球初期に、マルチスペクトルカメラ搭載ドローンにより試験圃場の空撮を行い、取得画像からレタスの植生部分のみを抽出した NDVI 値を計算した。結球初期の NDVI 値と収量および全窒素含有率との回帰分析の結果、決定係数 (R^2) は 0.87 と 0.77 となった。これらの決定係数は既報と比較しても同等以上の値であり、実用的であると評価できた。次に大雨による湿害を再現するため、レタスの株元まで 48 時間の湛水処理を行ったところ、非湛水処理の標準施肥区よりも低く、非湛水処理の無施肥区と同等の収量や成長パラメーターを示した。また湛水処理前から収穫まで経時的に NDVI 値を測定した結果、処理直後から低下し、収穫時まで回復しなかったことから、NDVI 値が湛水ストレス状況における生育を示す指標になると考えられた。以上により、レタスの結球初期にマルチスペクトルカメラ搭載ドローンを用いた空撮画像から NDVI 値を算出することで、窒素栄養や湛水ストレスを反映した生育診断、および収量予測が可能であることが示唆された。

マルチスペクトルカメラの有効性は確認されたものの、その導入コストが高いため、次にドローンで容易に撮影可能な可視光画像を対象に収穫日と収量の予測を試みた。野菜の収穫期や収量を予測することは安定出荷に大きく貢献するが、レタスにおいては実用化が進んでいない。そこで、ドローンによる空撮画像を AI により解析することにより、レタスの生育センシング、収穫期予測の精度を向上させることを目標とした。また収量推定を最終目的として、空撮画像から得られる面積情報と収量との関係性を調査した。収穫期予測においては、2 地域 6 箇所の生産圃場を予測の対象として、定植から 14~21 日後にドローン空撮画像を獲得した。その画像をシステムに入力して撮影時の葉齢を推定し、メッシュ農業気象データから取得した日平均気温の予報値および平年値を使用して 40 日に到達する

(氏名： 中野 伸一 NO. 2)

収穫日を予測した。その結果、予測収穫日と実収穫日の相対誤差の平均は、目標とする 3.5 日以下の 2.35 日を示したことから、高精度な予測が可能と考えられた。次に収量推定を目的として、収量が施肥量に依存する処理区を設計し、ドローン空撮画像から算出した面積データと収量との関係を調査した。その結果、垂直投影面積よりも植被率が収量と高い相関を示した。また、植被率と収量の相関は、結球初期（葉齢 25.1）よりも結球開始前（葉齢 16.2）が高いことが明らかとなった。したがって収量推定には、結球開始前の植被率を説明変数として使える可能性が示唆された。これにより、生育中の収穫日予測が実用レベルで可能となり、収量推定のための基礎的知見が得られた。

以上の結果から、本研究ではレタスを対象にドローンに搭載したマルチスペクトルカメラで取得した NDVI 値を生育指標として利用することでレタスの全窒素含有率を推定でき、生育診断が可能となることを明らかにした。また、無施肥区、湛水处理区のように発育が遅れた場合でも収量推定の誤差への影響は少なく、精度高く収量が予測できた。NDVI 値との回帰分析の結果、植物体の窒素含有率および収量を予測した場合の決定係数は先行研究と比較しても同等以上に高かった。可視光画像を AI で葉齢推定し、収穫日を予測した本研究では、収穫日の予測に使用したレタスの葉齢増加モデルは R^2 値が結球前、結球後ともに 0.9 以上であり、他の収穫日予測の先行研究よりも高い推定精度が確認できた。葉齢を使用した収穫日の予測について、生育障害や極端な生育不良がない限り、施肥条件を変えても葉齢は大きく変わらなかったことから堅牢性が高いと考えられた。

氏名	中野 伸一		
論文 題目	Development of drone- and AI-based technology for diagnosing and predicting lettuce growth (ドローンと AI を活用したレタスの生育診断・予測技術の開発)		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	宇野 雄一
	副 査	教授	安田 剛志
	副 査	准教授	藤本 龍
	副 査	助教	小山 竜平
	副 査		
要 旨			
概要 農業における労働力不足や気候変動への適応が喫緊の課題となる中、精密農業はその解決策として国際的に高い関心を集めている。とりわけ近年では、ドローンによる画像データの収集と人工知能（AI）による解析を組み合わせたアプローチが、作物管理の省力化・高効率化を可能にする技術として、世界各国で活発に研究・導入されている。しかしながら、主要穀物に比べて園芸作物を対象とした精密農業技術の応用例は依然として少なく、使用する撮影機種、画像の解像度、解析手法などについての技術的検討が十分に進んでいないのが現状である。 兵庫県淡路島においては、特産であるレタスの生産において、生産者や支援組織から、生育診断、収量予測、収穫日予測に関する実務的なニーズが寄せられている。特に露地栽培では、施肥量の調整や降雨後の湿害といった外的要因の影響を受けやすく、供給量が不安定になりやすい。また、レタスは生鮮食品としての利用が中心であり、冷蔵保存期間が短いため、計画的な出荷調整が困難である。 そこで本研究では、ドローンによるリモートセンシングと AI 技術を活用し、レタスの生育診断および生育予測に関する技術開発を行うとともに、その社会実装に向けた有効性の検証を目的としている。淡路島における課題と対応の検討は、同様の作物や栽培環境を持つ他地域における技術展開や実装のモデルケースとなることが期待される。 本論文は4章から構成されており、まず第1章では、この研究の着想に至った背景ならびに研究の目的を記述している。 第2章では、マルチスペクトルカメラを搭載したドローンによるレタスの生育診断技術を開発するために、ドローン空撮画像から植生部分のみを抽出して算出した NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) とレタスの生育および収量との関係を次のとおり明らかにしている。窒素施肥量を4水準に設定した処理区において、NDVI と各調査項目との関係を確認した結果、NDVI は収量および全窒素含有率と高い相関を示した ($R^2=0.87$、および 0.77)。これらの決定係数は、特にレタスの結球初期において高く、他の作物を材料とする既報の結果と同等、またはそれ以上の精度を示したことから、NDVI は窒素栄養状態を反映する実用的な生育指標となり得ると評価している。さらに、大雨による湿害を再現するため、レ			

氏名	中野 伸一
タスの株元まで 48 時間の湛水処理を行ったところ、非湛水処理の標準施肥区よりも低く、非湛水処理の無施肥区と同等の収量や成長パラメーターを示した。また湛水処理前から収穫まで経時的に NDVI を測定した結果、処理直後から低下し、収穫時まで標準施肥区より低い値を示した。以上の結果から、結球初期にドローンで取得したマルチスペクトル画像から算出した NDVI を活用することで、窒素栄養状態や湛水ストレスをふまえた生育診断および収量予測が可能であることを示唆している。 第 3 章では、マルチスペクトルカメラの代替手段として、低コストな可視光カメラによる空撮画像を用い、レタスの収穫日および収量の予測手法を検討している。特に可視光画像を AI により解析することで、レタスの生育診断および収穫期予測と収量推定を試みている。まず収穫期予測においては、2 地域 6 箇所の生産圃場を予測の対象として、定植から 14～21 日後にドローン空撮画像を獲得した。その画像をシステムに入力して撮影時の葉齢を推定し、メッシュ農業気象データから取得した日平均気温の予報値および平年値を使用して 40 齢に到達する収穫日を予測した。その結果、予測収穫日と実収穫日の相対誤差の平均は、目標とする 3.5 日以下の 2.4 日を示したことから、高精度な予測に有効である可能性が示された。次に収量推定を目的として、収量が施肥量に依存する処理区を設計し、ドローン空撮画像から算出した面積データと収量との関係を調査した。その結果、垂直投影面積よりも植被率が収量と高い相関を示した。また、植被率と収量の相関は、結球初期（葉齢 25.1）よりも結球開始前（葉齢 16.2）が高いことが明らかとなった。したがって収量推定には、結球開始前の植被率を説明変数として使える可能性が示唆された。以上により、収穫日予測および収量推定の両面において、可視光画像と AI を用いた技術の有効性を示している。 第 4 章では、第 2 章および第 3 章の結果を先行研究と照らし合わせながら、ドローンと AI を活用した生育診断および予測技術の特徴について整理し、次のように総合考察を行っている。生育診断および収量予測に関しては、マルチスペクトルカメラで取得した画像から NDVI を算出する方法が、精度と汎用性の両面から有効であると判断される。一方で、収穫日予測においては、可視光画像を用いて葉齢を推定し、その増加モデルに基いて収穫日を推定できる。また、この手法は高い予測精度を示すものの、主に結球開始前の時期に焦点を当てたものであるため、ゲリラ豪雨など突発的な環境変化の影響を受けやすい可能性がある。今後の技術普及に向けた課題としては、生育回復技術や可変施肥技術の開発、最適な空撮時期の予測精度向上、ならびにドローン導入に関するコストや運用面の障壁の解消が挙げられる。さらに、技術的な展望としては、地上および地下のセンサーデータの統合、5G 通信を活用したリアルタイム解析の実現、複数ドローンの協調制御（スウォーミング）技術の活用、さらにはスマートフォンアプリケーションへの応用が想定される。 以上のように、本研究は、ドローンによるリモートセンシングと AI を活用し、レタスの生育診断および生育予測に関する技術開発を通して多くの新たな知見を蓄積しており、精密農業のひとつとして今後の社会実装に大きく貢献するものと認める。 よって、学位申請者の中野伸一は、博士（農学）の学位を得る資格があると認める。	