HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Development of inspection and monitoring methodologies for postharvest fruit quality of avocados using non-invasive imaging technology
Author(s)	松井, 貴大
Description	この博士論文の全文は利用可能日以降に公開されます。
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	甲第16766号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16766
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99611
Type	doctoral thesis
File Information	MATSUI_Takahiro_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称： 博　士（農学）　　氏名　　松 井　　貴 大

学 位 論 文 題 名

Development of inspection and monitoring methodologies for postharvest fruit quality of avocados using non-invasive imaging technology

（非侵襲的イメージング技術を用いたアボカド果実の収穫後品質の検査およびモニタリング手法の開発）

アボカド（*Persea americana*）は不飽和脂肪酸やビタミン、ミネラル等に富み、世界各地で生産量および市場規模が増加している。一方で、真菌類（カビ）による収穫後の果実腐敗は、甚大な経済的損失やフードロスの要因となっている。病原菌は果柄部（stem end）や果皮に潜伏感染した状態で存在し、消費地における追熟中に腐敗を引き起こす。多くの腐敗症状は厚い果皮内部に限局しており、目視、マシンビジョン、近赤外分光法等による非破壊検査や腐敗過程の観察は困難である。本研究では、手作業に依存しているアボカドの検査作業の自動化と、果実内部における病原体動態の解明を目標とし、非侵襲的イメージング手法のなかでも物体内部への透過性に優れるX線画像と核磁気共鳴画像（magnetic resonance imaging: MRI）に着目し、独自の検査・モニタリング手法の開発と検証を行った。

1.　X線画像によるハス種アボカドの果柄部腐敗の非破壊検査モデルの開発

X線画像によるハス種アボカドの果柄部腐敗（stem-end rot）の非破壊検査モデルを提案した。アボカドの収穫後検査は主に手作業で行われているが、このプロセスは果実の外観や硬さのわずかな差異に依存するため、誤分類を招く可能性がある。本研究では、腐敗部位に特徴的にみられる数 mm 大の空隙に着目し、ジャガイモ中心部の空洞化や果実類・ナッツ類の害虫侵入痕の検出等に用いられてきたX線検査手法を応用したモデルの開発と検証を行った。

まず、追熟後のハス種アボカド422個のX線画像を取得した。腐敗果のX線画像には、周辺と比べて低密度であることを示す高輝度域が見られ、果実中央断面の果肉の空隙とおよそ一致した。次に、画像セグメンテーションと果実輪郭評価の2種類の画像処理によりX線画像中の腐敗特徴を抽出し、機械学習モデルにより腐敗の有無を予測した。10分割交差検証の結果、総合正答率および（腐敗果に対する）再現率はいずれも89%となり、X線検査手法によるアボカドの腐敗検査の有効性が示唆された。

2.　深層学習に基づくX線画像解析によるアボカド内部腐敗の自動検出

アボカドにおいて特に被害が深刻である2種類の真菌性腐敗（stem-end rotおよびbody rot）をX線画像から高精度に検出するため、深層学習に基づくセマンティック・セグメンテーションを用いた検出モデルの開発と検証を行った。本研究では、医用画像解析に用いられるモデルおよびデータ拡張技術を応用し、アボカドのX線画像286枚（健全果220枚、腐敗果66枚）で訓練した

U-net++モデルにより、X 線画像中の全ピクセルを腐敗部と正常部に分類した。セグメンテーション結果に基づいて健全果・腐敗果の 2 値分類を行ったところ、5 分割交差検証において総合正答率 98%、再現率 100%を達成した。さらに、腐敗部の面積比率を二乗平均平方根誤差 3.15%で定量化できた。本モデルは、従来の規則ベースの画像処理モデルと比較して、腐敗の発生位置や周辺コントラストの違いに対しても柔軟な検出性能を示した。

3. アボカド果実の腐敗検査はいつ実施すべきか：内部腐敗の進展と果皮色変化との関係性

アボカドの追熟過程における果皮色の変化に基づく検査時期の指標を提案した。アボカドの腐敗は一定の熟度に達するまで発現しないため、検査時期が早すぎる場合、無症状の感染果実が健全と誤判定される可能性がある。本研究では、422 個のハス種アボカドについて X 線画像により 5 日間の腐敗進展を追跡し、明度（L*）、彩度（C*）、色相角（h°）等の果皮色指標との関連性を分析した。X 線画像より推定した腐敗発生率の推移から、最終日に腐敗していた果実の 9%、30%、52%、90%が、その 1、2、3、4 日前には腐敗症状を示していなかった。この結果は、果皮色がある閾値に達する前に検査を行うと、腐敗果の見逃し（偽陰性）が大幅に増加することを示唆する。また、腐敗の発生時における果皮色は、初期のバラツキに依らずほぼ一定域に集中する傾向が見られた。本研究では、収穫後検査を実施すべき果皮色の範囲を示すカラーバーを提示し、適切な検査時期を視覚的に示した。本成果はアボカドの収穫後検査のタイミングの重要性を強調するとともに、検査時期を決定する客観的指標として果皮色が有望であることを示した。

4. 核磁気共鳴画像法（MRI）を用いたアボカド果実の成熟・追熟・腐敗の時空間的モニタリング手法の開発

アボカド果実内における真菌類の動態には、収穫時点での成熟（maturity）と収穫後の追熟（ripeness）が関与している。果実内には硬さ、水分、脂質、気体濃度等の勾配や維管束網が存在し、これらの空間的な広がりと経時的な変化が病変形成に影響しうる。そこで本研究は、果実内の微細構造、化学組成、病変部等を時空間的にモニタリング可能な技術として核磁気共鳴画像法（MRI）に着目した。MRI は、プロトン密度、縦緩和時間（T_1）、横緩和時間（T_2）、共鳴周波数等に基づき、食品や農作物内部のミクロ～マクロな構造の可視化や、水分や微細孔隙等の物理化学特性の定量画像化が可能である。一方、アボカドの品質評価や真菌性腐敗の観察への適用例は限定的であった。

本研究では、ハス種アボカドを未熟から完熟まで経時的に MRI で測定し、T_2、微細孔隙率（apparent micro-porosity）、脂質分率（lipid-fraction）の 3 種類の定量画像を取得した。また、成熟・追熟の従来指標（乾物率、果肉硬度）の測定および目視と光学顕微鏡による腐敗組織の観察を実施した。これらの品質指標を MRI 画像と対応付け、①MRI による成熟・追熟レベル推定の可能性を検証し、②果実内での腐敗進展のモニタリングを通じて病原菌動態の理解を深めることを目的とした。結果として、①アボカド果実内の脂質の定量画像化に成功し、果実内の乾物率の空間的な分布を示した。一方、細胞壁の構造的変化が主要因である硬度の推定は困難であると示された。また、②T_2 と微細孔隙率により、真菌類による果肉組織の段階的な腐敗や維管束に沿った侵食が可視化された。以上のように、果実内の構造的・生理的条件と病原菌動態との関係性の解明における MRI の有用性を示すことができた。