

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

氏 名 関 隼人

論 文 題 目

Evaluation of Strawberry Quality using Near-Infrared
Hyperspectral Imaging (NIR-HSI)

(近赤外ハイパースペクトラルイメージングによるイチゴの品質評価)

論文審査担当者

主 査 名古屋大学准教授 稲垣 哲也

委 員 名古屋大学教授 土川 覚

委 員 名古屋大学教授 福島 和彦

委 員 名古屋大学教授 徳田 博美

論文審査の結果の要旨

農産物非破壊品質評価技術の開発は、人間の感覚と農産物の結びつきについての理解や農産物の価値決定、品種改良、作物改良に役立つ。農産物は、個体間、個体内で品質がばらつき、これらが人の官能評価を決定づける。農産物の中でもイチゴは、単価が高く世界中で食されている人気の果実である。またさまざまな品種が開発されており、市場では大果なものや果皮が白いものなど、特徴的な品種が見られるようになった。「イチゴは赤ければ甘くておいしい」というが経験則があるが、これらは必ずしも正しくない（色と食味の相関関係は弱い）。そのため果実のブランド化を図る上で目視での選別には限界がある。加えて、白いイチゴでは、成熟に伴い果皮色が赤くならないため、熟度判定が難しいといった問題点がある。イチゴは熟度が増すと糖が蓄積され、酸が減少し、香り・食味が良くなる。糖や酸、香りなどの品質は食味に関わるが、それらは部位によって異なり、かつそれらの品質は破壊的な手法でしか測定できない。既存の糖度センサーは、非破壊評価が可能ではあるが、その値は測定箇所により影響を受ける。そのため、農産物の差別化を図るための代表値としてこれらの非破壊計測値を採用するには限界がある。より精密な非破壊品質評価技術の開発は農産物個々の個性をより引き立たせ、これにより新たな価値を創出することが可能となる。近赤外分光法（NIR）は、近赤外を対象物に照射して得られる、透過光もしくは反射光を分光することで、O-H、C-H、N-H といった分子振動の特徴を取得し、得られた情報をケモメトリクスと呼ばれる分析手法で作成した検量線モデルを用いて品質を推定する。さらに近赤外ハイパースペクトルイメージング（NIR-HSI）は NIR を空間的に拡張した比較的新しい測定技術で、これを用いことで農産物品質の空間分布の把握が可能である。イチゴ果実表面の形状やそう果により、各ピクセルのスペクトルは大きく変化する。この影響はスペクトル評価を難しくさせており、これらを解決することで NIR-HSI の農産物への適応拡大が期待できる。

関隼人は NIR-HSI を応用したイチゴの糖度分布評価方法の構築を目指して上記の問題を解決するための一連の研究を行なった。

第 1 章では、農産物の非破壊評価及び品質の分布評価の重要性、従来の農産物の非破壊評価の概略、イチゴに関する先行研究の概要及び問題点が説明されている。

第 2 章では、NIR-HSI に多変量解析と画像処理を応用することで、果皮色の白いイチゴ「栃木 iW1 号」の糖度分布を推定できることを報告している。ここでは、果実表面の果肉部とそう果部を主成分分析（PCA）と画像処理を組み合わせることで分離する果肉部自動分離アルゴリズム（PCA イメージング）を開発している。果肉部のみのスペクトルから作成した糖度推定モデルにより、糖度分布をイメージング画像とバイオリンプロットにより可視化することに成功している。

第 3 章では NIR-HIS とイチゴの形状測定を組み合わせることで、三次元で糖度分布を可視化するシステムを報告している。すなわち NIR-HSI システムとレーザー変位計を組み合わせた測定システムを構築して、果皮の赤いイチゴ「栃木 i37 号」の NIRHSI 画像と三次

元形状を測定した。NIR-HSI データをレーザー変位計によって得られた三次元形状を用いて補正を行った。ランバートコサイン則および「距離逆二乗の光減衰の法則」を用いることで、検出器とイチゴの間の角度と高さの補正を行った。さらに、形状補正とスペクトルの前処理を比較・検証するために最適糖度推定モデルの網羅的な解析を行った。その結果、高さ補正と角度補正および平滑化スペクトル前処理の組み合わせることで、最も高精度糖度予測モデルを構築できることを示した。さらに NIR-HSI イメージング画像の妥当性を適正に評価するための新たな指標 (Map score) を提案している。これは糖度推定モデルの予測性能と、イメージング結果から算出したパラメータを組み合わせた値である。これを用いて、モデルを評価したところ「高さ補正と平滑化スペクトル処理を組み合わせた糖度推定モデル」から算出したイメージングが最も汎用性が高いことが示された。

第4章では、NIR-HSI とレーザー変位計および回転台を組み合わせた回転スキャンシステムを設計し、イチゴ果実全面の果肉表面の糖度分布を三次元的に推定するシステムを構築している。果実全面の NIR-HSI データと形状データを組み合わせた三次元画像合成により糖度分布を包括的に可視化することに成功した。

最後に第5章では、一連の研究により得られた結果の総括と今後の展望を述べている。

以上のように本論文では、外観的特徴が複雑なイチゴの糖度分布を NIR-HSI に多変量解析や画像処理、形状測定を援用することで以下の解析が可能であることを示している。すなわち①果実表面からそう果と果肉を区別して糖度推定を行い、果肉部のみの糖度分布を表示して評価できること。②イチゴの三次元形状データから NIR-HSI 画像を補正することで、形状と糖度の分布を同時に表現できる三次元イメージングを構築できること。また③果実の回転スキャンによりイチゴ全体の立体的な三次元糖度分布マッピング構築が可能であることを示している。また、これらの手法が果皮の白いイチゴにも応用可能であることを示した。本研究の成果は農産物の中でも、形状が複雑で評価の難しいイチゴを対象としているため、他の農産物にも応用が可能な NIR-HSI のコア技術である。また、今回は糖度を対象としていたが、損傷、酸度、糖酸比など他項目の評価へ拡張することや、コンベアでの搬送といったメカニカルな技術を最適化することで選果場への社会実装も期待される。本審査委員会は、上記一連の結果が農業工学および応用分光光学における重要な業績であることを認め、さらに本論文の内容が博士（農学）の学位論文として十分に価値あるものとして認め、合格と判定した。