

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

氏 名 馬 特

論 文 題 目

近赤外分光イメージング法を活用した
生物素材の非破壊品質評価

論文審査担当者

主 査	名古屋大学教授	土 川 覚
委 員	名古屋大学教授	佐々木康壽
委 員	名古屋大学教授	山本浩之
委 員	名古屋市立大学准教授	片山詔久
委 員	名古屋大学准教授	横地秀行
委 員	名古屋大学講師	稲垣哲也

近年、食品、果実および木材などの生物素材を生産加工する現場において安全性管理や品質管理の重要性が増しており、非破壊・非侵襲で製品の組成の違いや濃度分布を検査する技術が求められている。近赤外領域（波長 800-2500 nm）の吸収は、中赤外領域（波長 2500-25000 nm）における分子基準振動の倍音または結合音に由来しており、とくに、水素原子が関与する O-H、N-H、C-H の吸収が強く現れる。また、近赤外領域のモル吸光係数は中赤外領域と比較して 10^3 程度と小さく、水を大量に含む農産物や食品などの非破壊測定に有利である。その一方、通常的光分光法的手法では、光が照射されている局所的な試料部位のスペクトル情報に基づいて解析されることがほとんどであるため、予測値と実測値の乖離が大きくなる場合がある。そこで本研究では、分光分析（分光情報）と画像解析（位置情報）を融合させた各種測定法によって試料を迅速・高精度にくまなく評価する手法の構築を目指した。

第1章では、近赤外分光法および画像解析の概要と食品・木材産業や果実生産現場での非破壊計測の実態と解決すべき項目が検討されている。

第2章では、本研究で用いたケモメトリクス法の概要が説明されている。

第3章では、近赤外マルチスペクトラルイメージング法（NIR-MSI）による食品混入異物の非破壊検査に関する研究結果が詳述されている。現在、食品生産ラインで実用化されている異物検出装置によって毛髪や昆虫のような低密度の異物を検出することは極めて困難である。そこで新たに近赤外マルチスペクトラルイメージング法（NIR-MSI）を考案し、食品内部の異物検出を試みた。昆虫（ハエ）を封入したチョコレートにハロゲンランプで照射し、透過した近赤外光をいくつかの短波長カットフィルタを通して近赤外カメラによって撮影するシステムを設計した。チョコレートと異物の透過光強度の差が大きい波長領域の画像に主成分分析を施し、様々な画像処理を連結させることで試料内部の昆虫を高い精度で検出することが可能となった。

第4章では、近赤外ハイパースペクトラルイメージング法（NIR-HSI）によるリンゴ糖度分布の可視化が試みられている。NIR-HSI カメラによって波長 1000 nm から 2350 nm まで、約 6 nm 間隔でリンゴ試料の分光画像を連続撮影した。その後、糖度計による実測値とスペクトル変動の関係を多変量解析によって見出し、糖度に関する最適検量線を作成した。さらに、構築した糖度の予測モデル検量線を各画像ピクセルに収納された近赤外スペクトルに適応させ、リンゴの糖度分布を高い空間分解能で可視化することに成功した。また、モンテカルロ・シミュレーション法によりリンゴ内部の光伝播経路を予測し、リンゴ組織構造の違い（蜜部位の有無）による光吸収・散乱特徴の変化や照射光がリンゴ内部への伝播深度などについて詳しく検討した。照射光が波長 1190 nm (C-H 第2倍音) と波長 1450 nm (O-H 第1倍音) の場合、推測したリンゴ内部への伝播深度がそれぞれ 0.33 cm と 0.17 cm であった。

第5章では、NIR-HSI 法によるスギ材密度およびマイクロファイブリル傾角（MFA）の

非破壊評価が検討されている。木材の密度と MFA はその強度と高い相関関係にあるが、樹種間あるいは同じ材内の未成熟材や成熟材間でのばらつきが大きく、両者の材内変動を迅速かつ非破壊的把握できる技術の開発が求められている。本研究では、それを具体化するために NIR-HSI 法によるスギ材密度および MFA の可視化を試みた。さらに、木材の成長過程で発生する特異なあて材部位の判別を総合的に行うアルゴリズムの構築を目指した。スギ材試料の密度および MFA を各種 X 線装置によって実測した後、NIR-HSI カメラによる分光画像の測定を行った。その後、いくつかの多変量解析や画像処理を経て密度と MFA を可視化した。これにより、材の形成に伴う密度分布や MFA 変動の違いが明瞭に確認できたとともに、あて材部位の判別も可能であることが判った。

第 6 章では、近赤外空間分解分光法による木材の吸収・散乱特性の評価が試みられている。NIR-HSI カメラと点光源を組合せた測定システムを立ち上げ、試料に照射した反射光の空間分布から光拡散方程式の一種であるファレル式を用いて各波長の吸収係数等価散乱係数の算出を試みた。撮影した木材の空間分解分光画像では、木材表面の繊維方向に沿って楕円状となり、密度が高い場所ではより細長くなっていることを確認できた。これは密度が高くなると単位面積あたりの木材繊維の本数が増え、そのため繊維と垂直方向に光子が透過しにくく、平行方向に絞られたためと推察される。さらに、ファレル式でフィッティングした等価散乱係数と密度との関係を観察した結果、木材表面繊維方向が垂直/平行いずれの場合も、木材組織構造によって等価散乱係数が特徴的に変化することが判った。

上記のように本研究では、分光分析と画像解析を融合させ、食品、果実および木材の品質を迅速、高精度で非破壊的に評価する手法の確立を目指した。具体的には、複数短波長カットフィルタを用いた近赤外マルチスペクトルイメージング法、点光源と近赤外ハイパーカメラを組み合わせた空間分解分光法等の新規計測手法を提案、設計した。これらはいずれも製造現場への導入を最終目標としているため、コストパフォーマンスが高い装置の試作や有効な波長領域を中心とした予測モデルの構築に主眼が置かれている。また、各試料の特徴を考慮した測定方法や分光画像間の引き算処理による特定波長領域の獲得、全波長領域から有効な分光画像の選別、試料に照射した点光源の反射空間分布から光吸収/散乱情報の算出等の解析アルゴリズムを提案し、各手法の効率化に意を注いだ。これら一連の実験・解析により、近赤外分光イメージング法がさまざまな生物素材の品質評価に際しての有力な分析ツールになりうる事が示された。

よって本審査委員会は、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。

試験の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 第	号	氏名	馬 特
試験担当者	主査 土川 覚、佐々木康壽、山本浩之、片山詔久、横地秀行 稲垣哲也			
<p>(試験の結果の要旨)</p> <p>平成30年2月6日学位審査委員会において、主論文の内容を中心 としてこれに関連する科目の学識および研究能力について試問し審査した 結果、合格と判定した。</p>				