

主論文の要約

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

氏名：馬 特

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、通常の近赤外分光法では、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。

【研究 1】 近赤外マルチスペクトラルイメージング（NIR-MSI）法による食品混入異物の非破壊検査 (Nondestructive inspection of foreign matters inside food products using NIR multispectral imaging)

食の安全・安心に対する消費者の関心が年々高まり、食品メーカーもこれに呼応して異物混入を防ぐことに多大の労力を費やしている。現在、食品生産ラインで実用化されている代表的な異物検出装置は金属検出機と X 線検査機であり、食品中の石やガラスなどの検出は可能であるが、毛髪や昆虫のような低密度の異物検出は極めて困難である。そこで新たに NIR-MSI 法を考案し、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を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。その後、カメラの波長応答特性（レスポンスカーブ）を考慮し画像間の引き算処理を行い、30nm 間隔の分光画像を求めた。さらに、チョコレートと異物の透過光強度の差が大きい 3 枚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。（図 1）

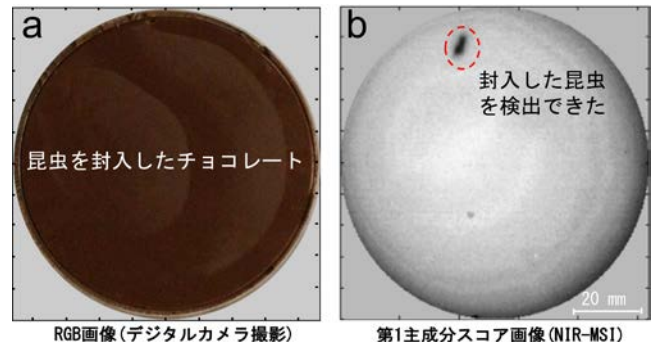


図 1. a: 昆虫を封入したチョコレート試料(厚さ:10mm)のRGB画像
b: 複数波長の透過画像に主成分分析をほどこし、各種画像処理を行うと異物部位の判別が可能となった

【研究 2】 近赤外ハイパースペクトラルイメージング（NIR-HSI）法によるリンゴ糖度の可視化 (Noncontact evaluation of Soluble Solid Content (SSC) in apples by NIR hyperspectral imaging)

次に、近赤外ハイパースペクトラルイメージング（NIR-HSI）法によるリンゴ糖度分布の可視化を試みた。上記 NIR-MSI 法は、測定や解析にかかる時間が短いという長所があるが、その波長分解能は干渉フィルタの特徴や枚数によって制限されてしまう。一方、近赤外カメラと分光器を組み合わせた NIR-HSI 法では、波長分解能が格段に向上し、より詳細な解析が行える。近赤外光を果実に照射し、その反射・透過スペクトルから糖度や酸度を推定する手法は、すでに多くの選果場に導入されているが、果実全体の平均化されたスペクトル情報に基づいて解析されるため、部位による品質のバラツキを評価することが困難で、誤判別する可能性がある。そこで本研究では、NIR-HSI カメラによって波長 1000 nm から 2350 nm まで、約 6 nm 間隔でプッシュブルーム方式により、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。これにより、蜜部位（水分とソルビトール）では水分による光の吸収が大きく、散乱が小さくなることが裏付けられた。さらに、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、リンゴ内部への伝播深度はそれぞれ 0.33 cm と 0.17 cm であると推定された。（図 2）

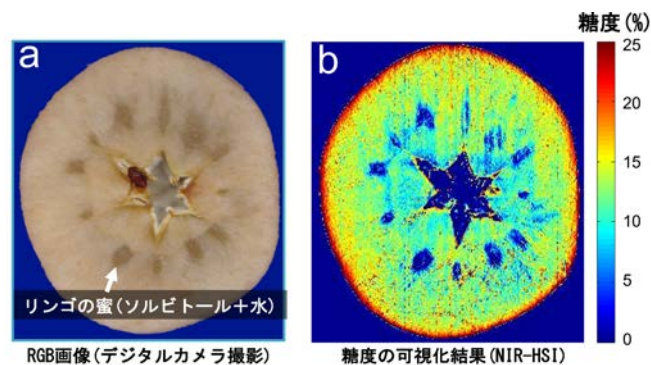


図 2. a: 蜜入りりんごのRGB画像 b: NIR-HSI法を用いた糖度分布の可視化結果、部位や蜜の有無によって糖度の違いを精細に認識可能

【研究 3】 NIR-HSI 法によるスギ材密度およびマイクロフィブリル傾角(MFA)の非破壊評価

(Nondestructive evaluation of *Cryptomeria japonica* wood density and microfibril angle using NIR-HSI)

木材の密度とマイクロフィブリル傾角（MFA: 細胞壁を構成するセルロースマイクロフィブリルが細胞壁軸方向となす角度）はその強度と高い相関関係（密度と強度は正の相関、MFA と強度は負の相関）にある。その一方、これらは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（傾斜地などで樹心が一方に偏って成長したため、通常材質とは異なる性質を持つ部分）の判別を総合的に行うアルゴリズムの構築を目指した。

まず、繊維方向 7 mm および接線方向 2 mm のスギ材試料を調整し、これらの密度および MFA を各種 X 線装置のよって実測した後、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。（図 3）

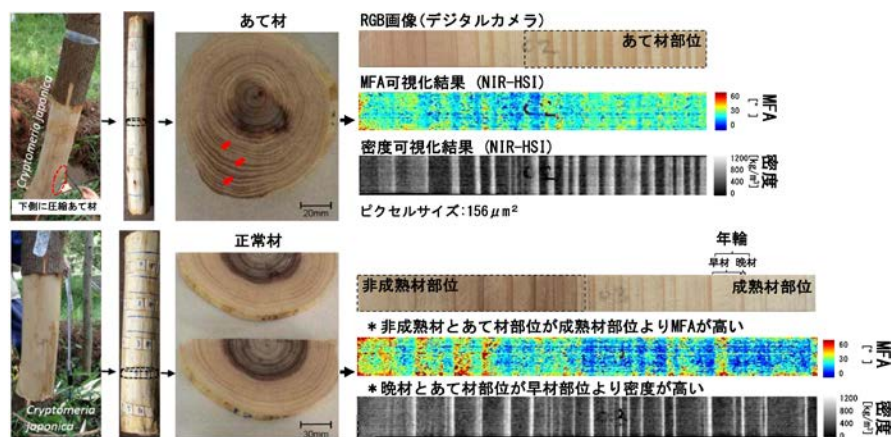


図 3. NIR-HSI法による木材密度およびマイクロフィブリル傾角(MFA)の可視化結果、晩材と“あて材”部位が早材部位より密度が高く、未成熟材と“あて材”部位が成熟材部位よりMFAが高いなど材の形成に伴う密度分布やMFA変動の違いが明瞭に確認可能

【研究 4】 近赤外空間分解分光法を用いた針葉樹木材の吸収・散乱特性の評価

(Investigation of softwood optical characteristics by NIR spatially resolved HSI)

従来の近赤外分光法で得られる拡散反射スペクトルには、光の吸収情報だけでなく、光の散乱情報も同時に含まれる。とりわけ木材の場合は細胞内腔での多重散乱が顕著であり、多変量解析によって構築した材質予測モデルの分光学的および物理学的な解釈が曖昧になるという問題点がある。本研究ではこの点を克服するために近赤外空間分解分光法を提案し、試料に照射した点光源の反射空間分布から吸収係数と散乱係数を個々に求めて木材の光吸収・散乱特性を把握することを試みた。これにより、多変量解析を援用してスペクトルから試料情報を予測するケモメトリクス的なアプローチから脱却して、多変量解析に頼らず木材の化学成分や物理学的特性の予測が可能となる。まず、ベイマツを対象として、X 線デンシトメータによる密度の測定を行った。NIR-HSI カメ

ラと点光源を組合せた測定システムを設計し、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。

【結論】 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ラルイメージング法、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ことを示された。