

論文審査の結果の要旨

申請者氏名 杉山 武裕

食品の偽装表示事件や農薬混入事件などの相次ぐ発生により、「食の安全・安心」が重視されるようになった。消費者による食品の「おいしさ」の追求も、食品を販売する上で非常に重要な要素になっている。食品を生産・加工・流通させる際に、安全性と品質を確保するために、従来の主観と経験に頼った判断から、食品を科学的かつ客観的に計測して判断することが必要である。既往の食品の計測は化学分析法が主流であったが、食品の生産・加工・流通の現場に化学分析法を適用することは困難で、特に全数検査に適用するのは事実上不可能であり、現状では一部のみを抽出するサンプリング分析に頼らざるを得ない。

1970年代以降、食品計測の分野に光センシングを中心とする非破壊分析法が導入され始めた。既に青果物の等級選別や糖度測定などで実用化されているものも多い。技術の進歩とともに、光センシングにより計測できる対象、または既存の化学分析法を光センシングに置換可能な場合が今後さらに増えていくと期待される。

画像という 2 次元的な空間情報を保った状態で分光するスペクトルイメージングは、光センサ技術と情報処理技術の発達に伴い、ようやく実用可能な技術として開花し始めた分野といえる。スペクトルイメージングでは、ひとつの利用法として 2 次元的な成分分布の情報が得られるため、光センシングによる食品の分析技術として有用である。近年の CCD 技術の進歩による撮影感度の向上や、近赤外領域の可視化に対応した InGaAs (インジウム・ガリウム・ヒ素) 素子などの開発によって、従来は困難であった可視光より長い波長領域において、特定成分の可視化イメージングが可能になりつつある。また、励起光波長・蛍光波長・蛍光強度の 3 次元から構成されるデータを記録する励起蛍光マトリクス (Excitation Emission Matrix : EEM) 計測が存在する。近年の蛍光分光光度計の性能向上に伴い、膨大な量の EEM 計測データが比較的短時間で得られるようになり、従来の単一波長による蛍光分光計測では不可能であった判別や成分同定が期待できる。

本論文においては、近赤外スペクトルイメージングと励起蛍光マトリクス計測という、光センシングを応用した 2 つの手法を食品の計測に適用することにより、従来の方法では困難な計測や、著しく労力が必要とされていた計測に対して、簡易・迅速かつ実際の現場に応用可能な新規計測手法の提案を行なった。

以下に、本論文の具体的手法と成果について概説する。

第一の事例として、近赤外スペクトルイメージングによる、魚介加工食品 (エビ) に対する食品添加物処理の影響の評価技術を開発した。冷凍エビにおいて、テクスチャは重要な品質であり、テクスチャには保水性が重要なキーポイントとなっている。従来の方法では、観察を行なう際に試料の染色処理が行なわれていたが、染色処理によるアーティファクト (人為的な変化) が存在し、添加物だけによる影響を観察することは困難であった。

そのため、添加物の影響のみによって保水性を評価することを目的として、光センシングとイメージング技術による新規観察法を試みた。計測システムは、マイクロスライサと近赤外照明、分光フィルタ、InGaAs 素子を使用した近赤外カメラを組み合わせ、水分の吸収ピークがある 1500nm における近赤外スペクトルイメージングにより、異なる添加物溶液で処理を行なったエビ試料を撮像し、各ピクセルの輝度値を吸光度に変換することにより、水分の可視化を行った。得られた画像から定量的に各処理条件の保水性の違いを比較した結果、濃度 1 %の Na₃PO₄ 溶液での浸漬処理が、製品原料として用いられるゆでエビの水分を最大に保持する条件であることが明らかになった。

第二の事例として、食品工場において加工工程中の果実中に混入している細かい夾雑物を、近赤外スペクトルイメージングにより検知する技術を開発した。果実に混入した葉や茎は果実由来の果汁により染色されており、可視光領域においては色によって果実表皮と区別することができない。そのため、可視光よりも長波長側の近赤外領域におけるスペクトルイメージング技術により、夾雑物の可視化を試みた。まず、夾雑物を検知するのに最適な 2 波長 (1268 nm・1317 nm) を見だし、その上で、その 2 波長で、ブルーベリー果実および夾雑物の近赤外スペクトルイメージング計測を行なった。夾雑物を検出するための判別式を導出するとともに、果実と夾雑物を区別するためのしきい値を算出した。判別式を画像の各ピクセルに適用し、上記の手法により得られたしきい値を用いて 2 値化処理することによって、ブルーベリー果実と夾雑物が明確に分離した画像を作出することに成功した。将来的には、近赤外スペクトルイメージングをオンラインに展開し、果実中に混入した夾雑物を自動判別するシステムの構築が期待される。

第三の事例として、励起蛍光マトリクス (EEM) 計測により、穀粉原料の混合割合を推定する技術の開発を行なった。現在、穀粉原料の混合割合を推定する方法は煩雑で時間のかかる湿式化学分析法しか存在せず、実際の流通現場においては、原料の混合割合を容易に推定可能な計測手法の開発が求められている。本研究では、蛍光分光光度計により得られた励起蛍光マトリクスの計測データを説明変数として、そば粉と小麦粉の混合割合の推定を試みた。励起波長 200nm-900nm、蛍光波長 200nm-900nm で走査して得られた EEM データから散乱光などの不要部分を除去し、PLS 回帰分析を適用することによって、検量線を作成した。キャリブレーション群、バリデーション群ともに穀粉原料の実測値と推測値の間に良好な相関が見られた。さらに、計測時間を目的として、PLS モデルの推定式の係数 (Loading) の分布を基準に EEM データの解析範囲の縮減を試みた。励起波長 340-555 nm、蛍光波長 500-755 nm に縮減し、PLS モデルの再構築を行った結果、ほぼ同じ推定精度を達成することができた。この場合、1 回の EEM 計測時間は、フルレンジ (200-900nm) での計測時間に対し、約 1/5 に短縮できた。本計測手法は、平易な操作による高精度の穀粉混合割合の予測を実現したもので、実際の流通現場における活用が期待される。

以上、本論文においては、複数の光センシング技術を食品の計測に適用することによって、食品の生産・加工・流通現場において適用できる測定技術を確立した。いずれも、既存の計測手法では達成困難なものであり、迅速・簡易な測定法であるため、化学分析などの既往の手法と比べて、低コストであり、非破壊、全数計測への応用が可能な技術である。

以上の審査結果から、審査委員一同は本論文の学術的な独創性と実用的な有用性を高く評価し、本論文が博士 (農学) の学位論文として価値あるものと認めた。