

感性センシングシステム～視覚センサー（その2）～
近赤外分光イメージング法による品質評価
システムの開発

蔦 瑞樹*, 相良 泰行**

Tsuta Mizuki, Sagara Yasuyuki

*(独)食品総合研究所, **東京大学大学院農学生命科学研究科

感性センシングシステム～視覚センサー（その2）～ 近赤外分光イメージング法による品質評価 システムの開発

葛 瑞樹*, 相良 泰行**

Tsuta Mizuki, Sagara Yasuyuki

* 独 食品総合研究所, ** 東京大学大学院農学生命科学研究科

1. はじめに

食品はさまざまな物質からなる混在系であり、その内部における各種成分の分布がその品質を大きく左右する。例えば、パンやうどんの品質を高めるには、生地段階においてタンパク質由来のグルテンを網目状かつ均一に分布させることが重要とされている¹⁾。しかしながら、食品の品質測定は化学分析値やテクスチャなど、成分分布を配慮しないパラメータを対象とする場合がほとんどであり、成分分布を可視化した研究は数少ないのが現状である。成分分布を可視化する事例においても、染色などの前処理が必要である、形状から経験的に成分分布の恣意的判断を行う、2次元の断面画像しか撮影できない等の課題が多い。そのため、食品の製造条件が食品内部における成分分布、ひいては品質に影響を与える機構は未解明のままである。

そのため、「光センシング技術²⁾」として日本全国で広く普及している近赤外分光法を、2次元、3次元計測に拡張する「近赤外分光イメージング法」により、食品の成分分布を可視化する研究が、近年行われるようになってきた³⁾。従来法では試料の1点においてスペクトルを測定するのに対し、近赤外分光イメージング法では図1に示すように、ある平面領域内の全ての点においてスペクトルを測定する。例えば100万画素のデジタルカメラを利用して平面領域内のスペクトルを取得する場合、100万個の検出器を並べてスペクトル測定を行うことに相当し、従来法と比較して100万倍という膨大な量のデータを取り扱うことになる。このようにして得られたデータ全体はハイパースペク

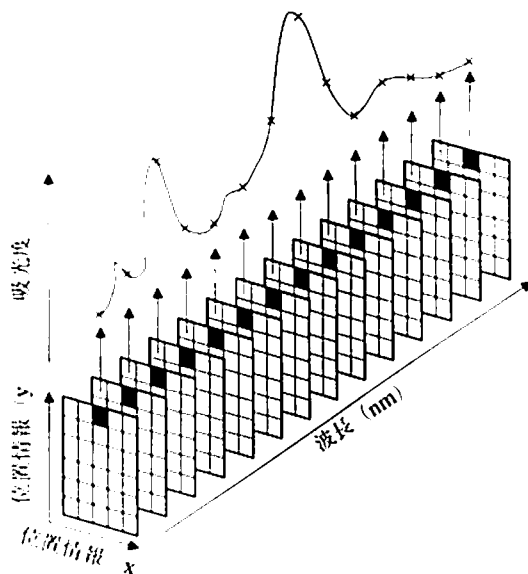


図1 ハイパースペクトル

トルと呼ばれ、従来のスペクトルと同様に試料の光学的情報を含んでいるのに加えて、位置情報も含まれているという特徴がある。ハイパースペクトルを解析することにより、試料成分の定性・定量解析とともに、成分分布を可視化できる点が、近赤外分光イメージング法の大きな利点である。

2. 近赤外分光イメージング法の分類

近赤外分光イメージング法で用いられる位置情報取得法と吸光スペクトルの計測法には、特色のあるさまざまな方法があり、近赤外分光イメージング法を適用する対象や目的に応じて、最適な計測法を選択する必要がある。そこで、以下では位置情報取得法と分光法で近赤外分光イメージング法を分類し、それぞれの利点と欠点を述べる。

2.1 位置情報取得法による分類

近赤外分光イメージング法で用いられる主な位置情報取得法を表1に示す。XY走査法は、試料の1画素に相当する範囲の吸光スペクトルを、単素子の検出器で測定する方法である。従来法と異なる点は、試料をXY方向に走査することにより、位置情報を取得する点である。常に同じ条件で計測するため、照明ムラが全くない反面、得たい画像の画素数分だけ計測を繰り返す必要があり、画像の取得に長時間を要する。一方、イメージ撮影法は、CCD素子などの面状の検出器を用い、1回の測定で位置情報を取得する方法である。画像の取得が迅速に行えるのが特徴であるが、正確な計測を行うためには、試料表面における照明ムラを補正する必要がある。また、ライン走査法（pushroom法⁷⁾とも呼ばれる）は、検出器をライン状に並べ、1回の測定で検出器の数だけスペクトルを測定する方法である。試料を検出器が並ぶ方向と垂直に走査することにより、位置情報を取得することが可能である。XY走査法とイメージ撮影法の中間的な特徴を持ち、前者よりも短時間で、後者よりも照明ムラの少ない画像を撮影することが可能である。

2.2 分光法による分類

近赤外分光イメージング法で用いられる主な分光法を表2に示す。バンドパスフィルタは、特定波長の光のみを透過させる特殊なフィルタである。このフィルタは安価であり、光の透過率が高く短時間の露光で画像が得られる利点がある反面、1波長につき1枚のフィルタが必要であり、連続スペクトルの測定は困難である。グレーティング（回折格子）は、従来の近赤外分光法で用いられており、連続スペクトルの測定が可能である。しか

しながら、グレーティングの前に設置されたスリットにより光量が大きく減衰するため、長時間の露光が必要となること、また、試料の空間情報がx方向の1次元に制限され、2次元の空間情報を取得するには試料を機械的にy方向に走査する必要があるのであるため、ハイパースペクトルの取得に時間を要するという難点がある。一方、液晶チューナブルフィルタ（Liquid Crystal Tunable Filter: LCTF）は、液晶チューニングエレメントと複屈折フィルタを組み合わせたモジュールに電圧を印加し、その電圧を変化させることにより、透過波長を任意の波長に設定可能な特殊フィルタである。通常のバンドパスフィルタと異なり、1台で連続スペクトルの測定が可能であること、50ms以下の短時間で透過波長の切り替えが可能なのが特徴である。また、可動部分がなく、保守性にも優れている。しかしながら、1台数百万円と高価であることが難点として挙げられる。AOTF（Acoustic Optical Tunable Filter）は、音響光学素子に超音波を印加すると、光学素子中を伝播する超音波がグレーティングと同様の役割を果たすことを利用した分光フィルタであり、LCTFと同様の長を有する。

3. 近赤外分光イメージング法の応用

本項では、近赤外分光イメージング法を食品の品質評価および安全性評価に応用した事例を紹介する。前者としてメロンの糖度分布可視化を、後者としてブルーベリー果実原料中における異物検知を取り上げる。

3.1 メロンの糖度分布可視化

1) 試料

北海道産のらいでん（青肉メロン）およびらいでんレッド（赤肉メロン）各1個を試料とした。

表1 位置情報取得法による分類

位置情報取得法	検出器形状	機械的走査	利点	欠点
XY走査法	1点	要	照明ムラなし	計測に長時間を要する
イメージ撮影法	面上に配列	不要	短時間で計測可能	照明ムラの補正が必要
ライン走査法	線上に配列	要	照明ムラ小	計測に比較的長時間を要する

表2 分光法による分類

分光法	機械的走査	利点	欠点
バンドパスフィルタ	不要	安価・高透過率	多波長計測には複数のフィルタが必要
グレーティング	要	連続スペクトル計測可能	位置情報取得に機械的走査が必要・低透過率
LCTF・AOTF	不要	連続スペクトル計測可能・高透過率	高価

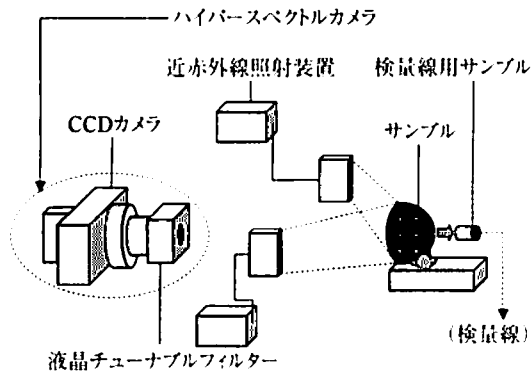


図2 ハイパースペクトルシステム

温度変化によるスペクトルのシフトを防ぐため、それぞれ室温25℃で一晩放置した後、暗室にて実験を行った。

2) ハイパースペクトルシステム

図2にハイパースペクトル計測システムの概略図を示した。通常、CCDカメラは8-bit (256階調) であるが、本研究では40万画素16-bit (65, 536階調) の冷却CCDカメラ (武藤工業社製CV-04 II) を使用した。このCCDカメラは高い階調度を持つ上、線形特性が $\gamma=1$ であることから、各画素が近赤外分光分析装置の受光器と同様の働きをすると考えられる。カメラレンズの前面には、液晶チューナブルフィルタ (Varispec社製VS-NIR1-10-LC-20) を装着した。液晶チューナブルフィルタは液晶チューニングエレメントと複屈折フィルタを組み合わせた構造で、印加電圧を変化させることにより、透過波長を700-1, 100nmの任意の波長に設定することが可能である。したがって、この撮像装置では従来の近赤外分光装置と同様に測定対象の連続スペクトルを取得することが可能であり、ハイパースペクトルカメラとしての機能を有していると言える。照明には近赤外線照射装置 (林時計工業社製LA-100IR) を用い、サンプル表面の輝度がなるべく均一になるよう、サンプルの左右に配置した。また、CCDカメラとサンプル表面の焦点距離が一定となるよう、石英ガラスをカメラレンズと水平に設置し、その表面にサンプルを密着させた。

3) 分光画像の撮影

青肉・赤肉メロンサンプルをそれぞれ半分に分断して、その断面画像を800~1,000nmの範囲で5nmおきに撮影した。画像サイズは384×192ピクセルであり、露光時間は各波長におけるハイパー

スペクトルシステムの感度にあわせて0.2~5秒の範囲で変化させた。さらに、撮影したサンプルから直径25mmの円柱状に果肉をくり抜き、これを検量線作成用サンプルとし、内側表面の画像を半割サンプルと同様にして撮影した。画像を取得した部分から1mm厚のスライスを切り出し、その果汁を絞って糖度をデジタル糖度計 (アタゴ社製PR-100) で測定した。以上の作業を果肉の内側から果皮付近まで繰り返すことにより、さまざまな深さにおけるメロン果肉の分光画像と糖度のデータを得た。

4) 画像処理

得られた画像に含まれる①暗電流ノイズ、②バイアス電圧、③各ピクセルの感度ムラ、④不均一な照明に起因する光量ムラを画像処理によって補正した。さらに、吸光度の定義に従い、以下のように補正画像の各画素における輝度値を吸光度に変換した。

$$A(\lambda) = -\log(R/M) \quad (1)$$

ここで、 $A(\lambda)$ は撮影波長 λ における吸光度である。また、 M は標準白色板を撮影した画像の各画素における輝度値、 R は補正画像の各画素における輝度値であり、それぞれ近赤外分光法における入射光強度、反射光強度に相当する。

5) 検量線の作成

図3に、らいでんの場合を例にした検量線の作成手順を示す。まず、得られた検量線作成用サンプルの分光画像に、上記と同様の画像処理を行い、

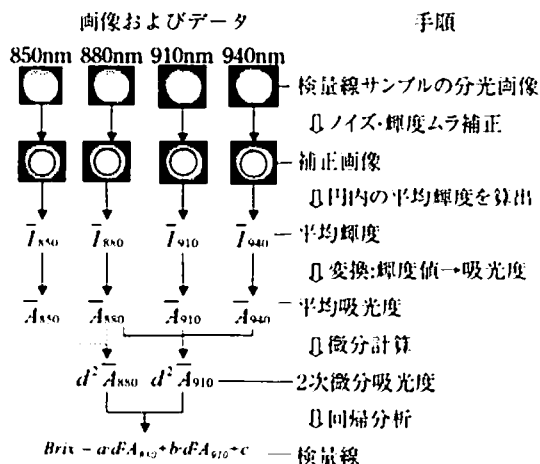


図3 検量線作成手順

800nm~1,000nmにおけるφ25mm内の平均吸光度を求めた。図4にこれを連続的にプロットした吸光スペクトルを示す。スペクトルの加算的・乗算的な変動の影響を軽減し、吸光ピークを強調するため、得られたスペクトルを波長で2次微分し⁹⁾、図5に示すような2次微分スペクトルを得た。2次微分は近赤外分光分析において一般的に用いられるスペクトル前処理法である。さらに、らいでん、らいでんレッドそれぞれの2次微分スペクトルと糖度の実測値について重回帰分析を行い、糖度と2次微分吸光度が高い相関を持つ波長を2つ採用した。ここで、採用波長を2つに限ったのは、

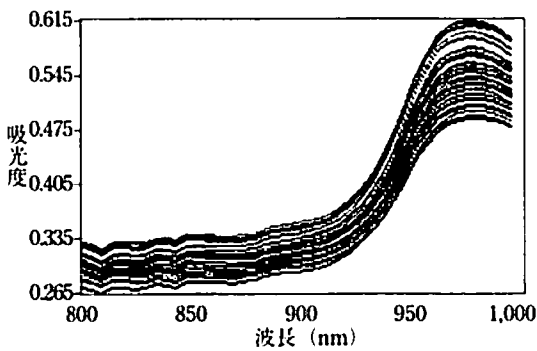


図4 検量線用サンプルの吸光スペクトル

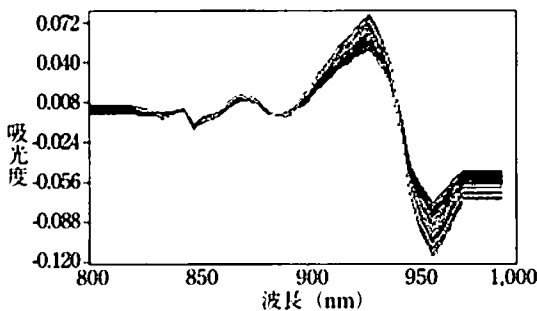
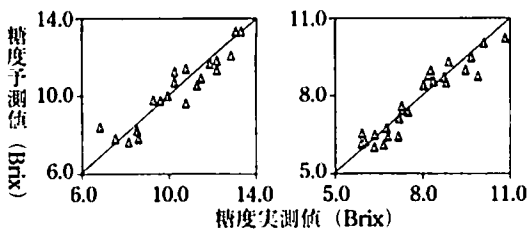


図5 検量線用サンプルの2次微分吸光スペクトル



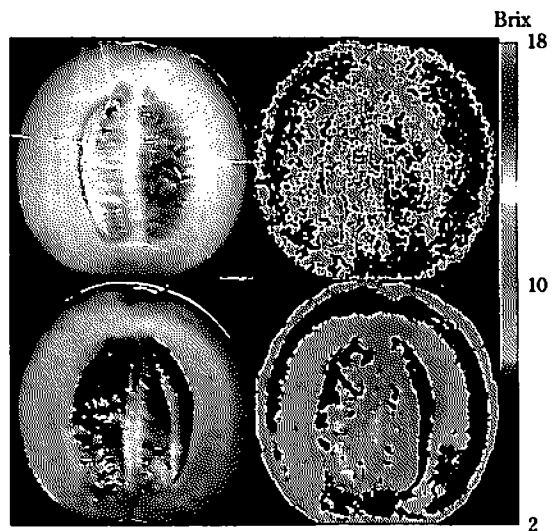
(左:らいでん, 右:らいでんレッド)

図6 糖度の検量線

説明変数の増加による検量線の過剰適合および画像処理が煩雑になることを防ぐためである。重回帰分析の結果、らいでんにおいては910nmと880nm、らいでんレッドにおいては915nmと955nmにおける2次微分吸光度の組み合わせと、糖度の間に高い相関があることが明らかになり、図6に示すように、選択波長における2次微分吸光度と糖度の検量線を作成した。910nm近辺には糖の吸収帯があることが報告されている^{10) 12)}。また、880nm近辺の2次微分吸光度は果肉における光路長と¹⁰⁾、955nm近辺の2次微分吸光度は水分と高い相関があることが知られており¹³⁾、前者は果肉の光学的性質、後者は果肉の含水率による影響を補正する効果があると考えられた。したがって、らいでんの検量線で採用された910nmおよび880nm、らいでんレッドで採用された915nmと955nmは、メロン果肉の糖度検量線として妥当であり、2つの検量線は誤差を補正した上で糖度を正確に反映していると判断した。また、2つの検量線は共に高い精度を示し、本研究で用いたハイパスベクトルシステムを用いて、糖度の推定に十分な精度の検量線が得られることが分かった。

6) 糖度分布の可視化

半割サンプルの断面画像について、検量線作成用サンプルと同様の画像処理を行い、各画素における2次微分スペクトルを求めた。次に、らいでんにおいては910nmと880nm、らいでんレッドに



(上段:らいでん, 下段:らいでんレッド)

写真1 サンプルの実画像と糖度分布可視化画像

おいては915nmと955nmにおける2次微分吸光度に図6の検量線を適用し、各画素における糖度を求めた。最後に、糖度の大小をカラーマッピングし、写真1に示す糖度分布の可視化画像が得られた。実画像から糖度分布を予測することは不可能であるが、糖度分布可視化画像では、果皮付近より果実の中心部において糖度が高いことが明らかであり、これは実際にメロンを食した際の食味と一致している。また、底部よりは上部がより糖度が高い傾向が観察され、「先に柔らかくなる底部が最も甘い」という通念が必ずしもあてはまらないことが分かった。

3.2 ブルーベリー果実原料中の異物検知¹⁴⁾

近年、消費者が食品の品質や安全性に大きな関心を持つようになり、ジャムやフルーツヨーグルトのソースなどの果実を加工した製品に混入した異物に対するクレームも増加している。そのため、果実加工工場では人手による目視検査を増強しているが、異物が果汁に染まり、果実とほぼ同じ色となってしまうため、異物を完全に除去することができないのが現状である。そこで筆者らは、近赤外分光イメージング法を応用して、近年機能性食品として関心が高く、輸入量も増加しているブルーベリー果実を対象に、目視検査に代わる高精度な異物検知技術の開発を試みた。

1) 計測装置

図7に計測装置の概略を示す。本装置は照明装置(Megalight50, HOYA-SCHOTT)、液晶チューナブルフィルタ(VS-VIS2-10-MC-35, Cambridge Research & Instrumentation Inc.)、カメラレンズおよびモノクロCCDカメラ(ORCA-ER-1394, 浜松ホトニクス)により構成されている。照明装置からの光はライトガイドを通じて試料に照射され

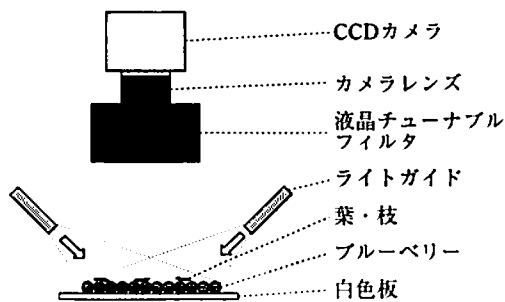


図7 計測装置および試料の設置方法

る。また、試料からの反射光は、液晶チューナブルフィルタにより400~720nmの任意の波長で分光されるため、本装置により試料のハイパースペクトルを計測することが可能である。先に述べた分類では、イメージ撮影・液晶チューナブルフィルタ方式に該当する。

2) 試料

冷凍された状態で輸入した米国産ブルーベリー果実を用い、適量の果実を常温で2時間放置して解凍した。解凍の際生じる果汁を採取し、これに異物として用意した小石、毛髪、葉、枝、虫を1時間浸漬し、果汁の色を付けた。これを、「異物が果汁の色に染まり、肉眼ではほとんど識別できない」という加工現場の状況を再現するためのモデル試料とした。

3) 分光画像の取得

図7に示すように、セラミック製標準白色板を計測装置の下に置き、白色板表面をなるべく均一に照明するよう、照明装置の位置を調整した。この状態で白色板の画像を405~720nmの範囲で、5nmおきに計64枚撮影した。次に、白色板の代わりにバランスディッシュ(D-M, イナ・オプティカ)を置き、その上に解凍したブルーベリー果実と染色した異物を乗せて試料とし、白色板と同一条件で撮影した。さらに、吸光度の定義に従い、式1を画像の各画素に適用して吸光度を算出することにより、各波長における吸光度画像を得た。また、吸光度画像より果実部分および異物部分の平均吸光度を算出し、それぞれの吸光スペクトルを得た。

4) 異物検知条件の決定

図8に示すように、得られた吸光スペクトルを2次微分し、果実と異物の違いを比較・検討した

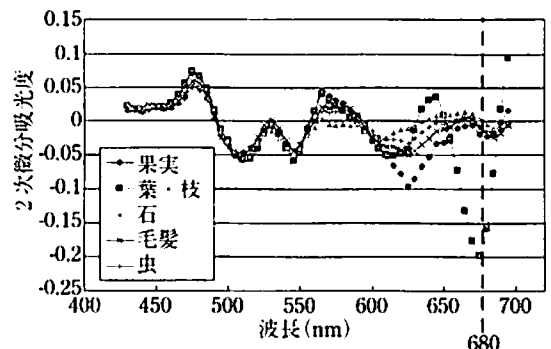
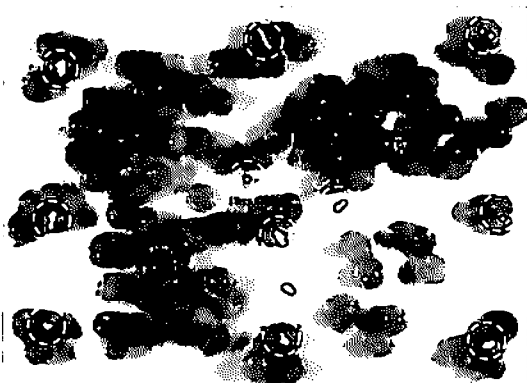


図8 ブルーベリー果実および異物の2次微分吸光スペクトル

ところ、クロロフィルの吸光帯である680nm付近で葉・枝の2次微分吸光度が果実より大幅に小さくなることが明らかとなった。したがって、葉・枝および果実の680nmにおける2次微分吸光度を算出し、両者の中間値を閾値に設定することにより、葉・枝を検知することが可能であると考えられた。

5) 異物検知画像の作成

680nm前後の3枚の吸光度画像を用い、差分処理を行って2次微分吸光度画像を作成した。さらに、前述した値を閾値とし、値が閾値以上の画素を黒、閾値未満の画素を白とする二値化処理を行い、写真2に示す葉・枝の検知画像を作成した。検知画像の白色部分と実際に葉および枝が置かれた位置は良好に一致し、本手法が異物検知に有効であることが明らかとなった。今後は、分光画像の撮影および画像処理速度を向上させることによ



○：実際に異物が置かれた位置、○：画像処理により異物と判定された位置

写真2 異物の検知画像

り、本手法が食品加工の現場において実用化されることが期待される。

4. 近赤外分光マイクロスライサの開発

本誌2007年12月号の「感性センシングシステム～視覚センサー（その1）～」で紹介した「マイクロスライサ画像処理システム」では、凍結試料、特に氷結晶の性状や分布状態を計測する場合、下記のような問題点が指摘されてきた。

- 1) 試料はプログラムフリーザで凍結後、同システムのマイクロスライサ部に移設する必要があるが、このハンドリング時間にサンプルの温度上昇による氷結晶性状の変化が生起する可能性がある。
- 2) マイクロスライサにセットした試料温度は -40°C に維持可能であるが、極低温領域(-80°C 以下)における観察は不可能である。
- 3) 試料内氷結晶とこれ以外の組織を識別するために、前処理として組織の蛍光染色を必要としたが、この方法では氷結晶の直接観察が不可能であり、また、前処理による試料固有の形態維持が困難である。

このような問題点を改善するために、システムの機能を拡大・強化した極低温マイクロスライサ分光画像処理システム(Cryo Micro-Slicer Spectral Imaging System: CMSIS)を開発した。具体的にはこれまでに、1)本システムの撮像方式にこれまで述べた近赤外分光イメージング法を用い、氷結晶を含む着目成分の直接可視化法を開発し、2)この機能をシステムとして実現するための機器仕様

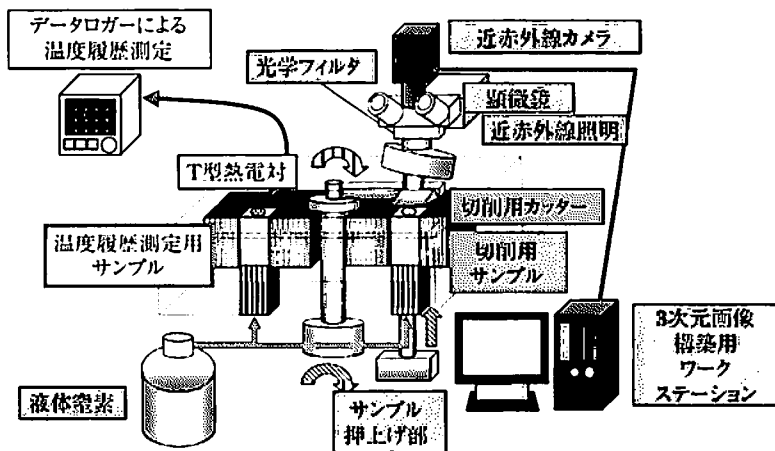


図9 極低温マイクロスライサ分光画像処理システムの構成

の選択およびシステム設計と試作を行い、現段階では3)試作システムの性能試験結果に基づいて開発目標の達成度と今後の改善指針を明らかにしつつある。

以下にCMSISの主な開発目標およびシステムの概念図を図9に示す。

- 1) 近赤外分光イメージング法により試料内部構造・成分(氷結晶)分布の3次元画像処理を可能とする。
- 2) マイクロスライサ部に温度履歴測定部と切削観察部を設け、これらの観察部に同一試料をセットする。これら両試料の底面温度を等速度・等温度に制御・維持する。
- 3) 観察部の冷却媒体として液体窒素を用いることにより、 -80°C 以下の極低温領域における計測を可能とする。
- 4) 撮像系装置類の容易な交換を可能とし、蛍光、近赤外観察などの多目的計測に対応する。

これらの基本的開発目標は試作したCMSISにより達成された。その一例として図10に濃度1.0%の寒天溶液を -80°C で凍結したa)試料断面の氷結晶2値化画像とb)3次元再構築画像の計測例を示す。

このシステムは試料の構造、着目成分の性状と分布などを室温から極低温領域で高精度に3次元計測することを可能とした画期的システムとして注目され、食品や生体を対象とする多分野における利用が期待されている。

5. おわりに

本稿では、測定対象の分光特性と空間情報を同時に取得・解析することにより、対象の成分分布を明らかにする「近赤外分光イメージング法」について概説した。本稿で紹介した事例以外にも鶏肉の汚染部位検知¹⁰⁾などにも応用されており、食

品の品質を定量化するなどの基礎研究の分野と、食品加工現場などの実用分野の双方において、この手法が幅広く活用されていくことが期待される。本稿では主に計測法について解説したが、本手法で得られた計測結果と測定対象の物理化学的計測・官能評価結果などとの相互関連性を「食感性モデリング」により定量化することにより、いわゆる「感性センシングシステム」を構築することが可能となる。いずれにせよ、近赤外分光イメージング法は、近い将来、視覚センシングシステム開発の核心計測法となることが予測されている。

参考文献

- 1) 竹谷光司：新しい製パン基礎知識，パンニュース社 (2001)
- 2) 河野澄夫：糖度選別機（光センサー）がもたらす新しい流通技術の展望—果実の品質も味の時代—，果実日本，**56** (1), 80-82 (2001)
- 3) P. Martinsen : Measuring soluble solids distribution in kiwifruit using near-infrared imaging spectroscopy, *Postharvest Biol. Technol.*, **14** (3), 271-281 (1998)
- 4) J. Sugiyama : Visualization of sugar content in the flesh of a melon by near-infrared imaging, *J. Agric. Food Chem.*, **47** (7), 2715-2718 (1999)
- 5) M. Tsuta and J. Sugiyama : Near-Infrared Imaging Spectroscopy Based on Sugar Absorption Band for Melons, *J. Agric. Food Chem.*, **50** (1), 48-52 (2002)
- 6) 葛瑞樹ほか：ハイバースペクトルシステムによる近赤外分光イメージング手法—メロン糖度分布の可視化事例—，映情学誌，**56**, 2037-2040 (2002)
- 7) P. M. Mather : Computer processing of remotely-sensed imagery, Wiley (1987)
- 8) 福島英雄：天文アマチュアのための冷却CCD入門，誠文堂新光社，pp. 133-188 (1996)
- 9) 岩本睦夫ほか：近赤外分光法入門，幸書房 (1994)
- 10) S. Kawano et al. : "Nondestructive Determination of Sugar Content in Satsuma Mandarin using Near Infrared (NIR) Transmittance", *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* **62**, 2, pp. 465-470 (1993)
- 11) S. Kawano and H. Abe : "Development of a calibration equation with temperature compensation for determining the Brix value in intact peaches", *J. Near Infrared Spectrosc.*, **3**, pp. 211-218 (1995)



a) 試料断面氷結晶の2値化画像 b) 3次元再構築画像
 図10 近赤外分光マイクロスライサによる凍結寒天
 内氷結晶の計測例

- 12) 天間毅ほか：携帯型りんご糖度計の開発とその応用、第15回非破壊計測シンポジウム講演要旨集, pp. 113-117 (1999)
- 13) (株)ニレコ：近赤外分光分析法技術資料, NIRECO NIR News, pp. 18 (1994)
- 14) Tsuta et al. : Foreign substance detection in blueberry fruits by spectral imaging, *Food Sci. Technol. Res.*, 12 (2), 96-100 (2006)
- 15) K. C. Lawrence et al. : A hyperspectral imaging system for identification of fecal and ingesta contamination on poultry carcasses, *J. Near Infrared Spectrosc.*, 11 (4), 269-281 (2003)



つた・みずき

(独)食品総合研究所

2004年 東京大学大学院農学生命科学研究科農学国際専攻博士課程修了, 博士(農学)取得。日本学術振興会特別研究員を経て, 2005年より(独)農業・食品産業技術総合研究機構食品総合研究所食品工学研究領域計測情報工学ユニット研究員。専門は食品工学。



さがら・やすゆき

東京大学大学院農学生命科学研究科農学国際専攻 教授

1972年東京大学大学院農学研究科農業工学専攻博士課程在学中に東京大学農学部助手採用。83年農学博士, 85年東京大学講師, 88~90年インドネシア共和国ポゴール農科大学大学院客員教授に派遣。97年東京大学助教授。03年同教授, 現在に至る。

- 99年アジア・オセアニア乾燥会議メダル賞
- 02年第13回国際乾燥シンポジウムにてクリオファルマ凍結乾燥賞
- 03年第2回北欧乾燥会議最優秀R&D賞
- 趣味：モダンジャズプロデュース, 精神分析, 映画・民族音楽集録ほか多趣味

小岩井純良バターがリニューアル発売

小岩井乳業は、1月中旬に100年以上の歴史を持つ小岩井伝統の発酵バター「小岩井純良バター」をリニューアル発売した。

今回、使いやすさと環境にも配慮する目的で、パッケージおよび同社オリジナルのピンをリニューアルした。フタは、より開閉しやすく握りやすい凸凹のついたツイストキャップを採用。ピンは、持ちやすいくびれのある形状にただでなく、ガラスの強度を保ちつつ、厚みを薄くして22gの軽量化も実現した。また、ピンを覆うフィルムにデザインを印刷することで、空のピンを簡単にラベルと分別することが可能となり、より環境に配慮した商品となっている。

「小岩井純良バター」は、1899(明治32)年当時の日本には、ほとんど無かったヨーロッパで主流の発酵バターの製法を習得し、研究・試作を進め1902(明治35)年に発売した。1966(昭和41)年には同品のおいしさが評価され、農林大臣賞を受賞している。今回、リニューアル発売した同品は、内容量160g、メーカー希望小売価格600円(税込630円)で全国販売している。

