メロンの糖度分布の3次元可視化

杉山純一*・小川幸春*

Three-Dimensional Visualization of Sugar Contents of Melons

Junichi SUGIYAMA* and Yukiharu OGAWA*

*National Food Research Institute, 2-1-12 Kan-nondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8642

In order to visualize sugar content of a melon, the relationship between sugar content and absorption spectra was investigated using a near-infrared (NIR) spectrometer. The absorbance at 676 nm had a high inverse correlation with sugar content. A high-resolution cooled CCD imaging camera with the band-pass filter of 676nm was used to capture the spectral absorption image. The calibration method for converting the absorbance on the image into Brix sugar content was developed in accordance with NIR techniques. Applying this method to each pixel of the absorption image, a color distribution map of the sugar content was constructed. Quantitative analysis of sugar distribution for unripe, mature and fully mature melons was carried out. In addition, a special slicing device that can cut a melon in each 5mm thickness was developed in order to create a 3-D image of sugar content distribution.

(Received Oct. 10, 2000 ; Accepted Feb. 2, 2001)

近年、桃、リンゴやメロン等の糖度を光によって非破壊測定して、選別する技術(近赤外分光法)が実用化され、全国の選果場に普及しつつある。しかし、一方で、甘いという糖度でありながら、食べてみるとそれほど甘くないとか、測る場所によってかなりの糖度のバラツキがあることも指摘されている。また、糖の蓄積過程が明らかになれば、新たな品質向上への取り組みも期待できる。そこで、本研究では、これまでポイント測定であった近赤外分光法を、冷却 CCD カメラを用いた2次元・3次元画像測定に拡張し、各ピクセル毎に近赤外分光法にもとずく糖度推定を行い、メロン果実断面の糖の分布の可視化を試みた。

実験方法

1. 糖度測定のための波長決定予備試験

糖度と相関の強い波長を決定するために、メロンの赤道部からφ20 mmの円柱状に果肉を切り出し、まず、内側果肉表面の相互拡散スペクトルを近赤外分光装置(NIRS6500, ニレコ)により400~1100 nmの範囲で測定した。次に、そのスペクトル測定をした部分を厚さ2

mmほど削り取り、果汁を絞ってデジタル糖度計(PR-100, ATAGO)でBrix糖度を測定した。同様にして、果肉の内側から外側に向けて、スペクトルと糖度の測定を繰り返し、3個のメロン(試料数:各22点)について両者の単相関係数を波長に対してプロットしたのが、図1である。アンデス、アールスのいずれの品種も676 nmで最大の逆相関をとることがわかった。これは、クロロフィルの吸収帯にほぼ一致し、逆相関であることから、クロロフィルの少ない所ほど糖度が高いことが明らかになった。

2. 試料

山形県鶴岡市産のアンデスメロンを用いた。未熟果は、収穫適期より6日早めに収穫し、適熟果は通常の収穫適期に収穫、完熟果はそれより5日後に収穫した。なお、完熟果では、熟度が進み過ぎ底部から割れが生じていた。いずれも収穫翌日に宅配便で送られてきた試料を25℃の暗室で測定した。

3. 実験装置

図2に分光画像を撮影するための実験装置を示した。40万画素16 bit階調の冷却 CCD カメラ(CV-04 II, 武

* 独立行政法人食品総合研究所(〒305-8642 茨城県つくば市観音台2-1-12)

図 1 メロン糖度の相関スペクトル

藤工業)にカメラ用アダプタ(光映舎)を介してカメラレンズ(FD28mmF3.5S.C., キヤノン)と干渉フィルタ(J43192, エドモンド)を取り付けた。干渉フィルタは予備試験で確認した676 nmを中心波長とした半値幅10 nmのバンドパスフィルタである。なお, CCDカメラは, 測光を目的としているため, アンチブルーミングゲート無しでガンマ値が1の輝度特性を持つものを選択し, 2段式ペルチェ素子による電子冷却と水冷を併用することにより電氣的ノイズの低減を図っている。照明は, 光学的ノイズを押さえるために直流駆動のハロゲンランプを光源とする光ファイバー冷光照明装置(LA-150S, 林時計工業)を用い, 陰がでにくいように手前上方左右2カ所から被写体を照明した。試料は, カメラとの焦点距離が常に一定になるように垂直に設定された

石英ガラスに密着させ, 暗幕シートを背景とする移動壁で押さえた。

4. 撮影方法

(1) 糖度分布測定用画像の撮影

CCDカメラの冷却温度は -15°C に設定し, シャッタースピードは0.5秒, 絞りはF16にてメロンの果肉断面の676 nmにおける分光画像を撮影した。画像サイズは 768×512 ピクセルである。

(2) 糖度キャリブレーション用画像の撮影

また, 果実の半割断面とは別に, 同一試料から予備試験と同様に $\phi 20$ mmの円柱状の果肉を切り出し, その $\phi 20$ mmの果肉部分の画像を上記(1)と同一条件で撮影した後, 2 mm厚の切片にスライスして糖度を測定した。この作業を果皮の部分まで繰り返した。

5. 画像処理

(1) 補正画像への変換処理¹⁾

得られた画像は, そのままではCCDの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や④照明系に起因する光量ムラが含まれる。これらを補正するために, 以下の画像処理を行った。

[補正画像]=

$$\frac{[\text{原画像}] - [\text{ダークフレーム}]}{[\text{フラットフィールド}] - [\text{フラットフィールドのダークフレーム}]} \times m$$

.....(1)

(1)式において, ダークフレームは, 原画像撮影と全く

図 2 実験装置

同じ条件で光を当てずに露光を行った画像であり、これを差し引くことにより、上記①②（注：②は暗電流そのものでなく、それによる積算画像）による誤差が除去できる。一方、フラットフィールドはテフロン板などの光学的に均一な面を撮影した画像で、同様にダークフレームを差し引いて、比をとることにより、上記③④の影響を軽減するものである。また、 m はフラットフィールド全体（第1項目の分母）の平均輝度値で、これにより画像間の比から輝度値への再変換を行っている。

(2) 糖度画像への変換処理

(1)式により得られた補正画像は、各ピクセルが16bit階調（65536段階）の輝度値で表現されている。そこで、この輝度値を近赤外分光法の原理に基づき糖度値へ変換することを考える。

近赤外分光法は、近赤外スペクトル（波長-吸光度曲線）そのものが物質の化学構造の特定部分（官能基）による共振に由来することを利用して、逆に特定波長の吸光度から注目する物質の定量化を行うものである²⁾³⁾

近赤外分光法において吸光度 A は、次のように定義される。

$$A = \log (I_s/I) \quad \dots\dots\dots(2)$$

I_s : 標準白版の反射光の強さ

I : 試料の反射光の強さ

これらは分光画像の(1)式第1項の分母・分子にそれ

ぞれ対応しており、

I_s = [フラットフィールド] - [フラットフィールドのダークフレーム]

I = [原画像] - [ダークフレーム]

となる。従って、分光画像における吸光度 A は、次のように表される。

$$\begin{aligned} A &= \log (I_s/I) \\ &= \log (m / [\text{補正画像}]) \\ &= \log (m/R) \quad \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

R : 補正画像における各ピクセルの輝度値

m : フラットフィールドの平均輝度値

さて、メロンの糖度に関しては、既に実験方法1.節の予備試験において676nmの吸光度だけで糖度と高い相関があることがわかっているの、これを本実験装置の画像光学系でも確認した。すなわち、実験方法4.(2)節のキャリブレーション用の画像群に対して、まず $\phi 20$ mmの範囲内の平均輝度を求め、(3)式により平均吸光度に変換し、それぞれの糖度との単相関をとったデータが図3である。ここでは、未熟果、適熟果、完熟果の3個体を示しており、それぞれ近似式は少し異なったものになっているが、これは測定条件（照明等）による影響が大きいと思われる。いずれにしても、このような画像光学系においても、高い相関が得られ、吸光度から糖度を推定するキャリブレーション式がそれぞれのメロン個体

図3 糖度と吸光度のキャリブレーション

図 4 メロンの糖度分布

左列：未熟果，中央列：適熟果，右列：過熟果，上段：水平断面，中段：垂直断面，下段：実画像

ごとに得られることが明らかになった。

実験結果及び考察

1. 糖度分布の可視化

4. (1)節で得られたメロンの断面画像に対して(1)式の処理をして補正画像に変換し，さらに(3)式の処理で吸光度に変換し，その吸光度に図3のキャリブレーション式をあてはめて，各ピクセル毎に糖度を求めた。実際の作業は，補正画像をファイルとして受け取り，上記の処理を行って糖度値をバイナリでファイルに保存するプログラムを Visual Basic で自作した。そして，この糖度ファイルを可視化ソフト (AVS/Express Viz, Advanced Visual Systems Inc.) に読み込み，カラーマッピングを施した。これらの作業は全てパソコン (Windows95, WindowsNT) で行った。

図4に可視化事例を示す。それぞれ，図3の未熟果，適熟果，完熟果のメロンに対応している。いずれも収穫直後に測定したため，果肉はかためで，肉眼で見た目には糖度の違いはわからないが，可視化した像からは，日を追う毎にメロン内側に糖が蓄積していくのがわかる。また，場所によってかなり糖度が異なっており，糖度計等によるポイント測定においては，部位を特定して比較する必要があることが明らかになった。さらにいずれの図においても底部より頭部の方が糖度が高く，これは軟

図 5 熟度の違いによる糖度分布

化が先に始まる底部の方が糖度が高いという一般通念が必ずしも当てはまらないことを示唆していた。

2. 糖度分布の定量化

図4において，各糖度毎 (1 Brix おき) の画素数を計数し，糖度分布の度数分布グラフ (但し，縦軸は面積割合に換算) を作成したものを図5に示す。糖度の度数分布グラフは，未熟から適熟にかけて大きな変化を示すが，適熟から過熟はごく一部の变化に留まるというパターンが明らかになった。これは，図4の可視化画像において，未熟果から適熟果にかけては，緑色部分が黄色に，黄色部分が赤色にと，比較的広域にわたって変化しているのに対し，適熟果から完熟果にかけては，赤色が

図 6 スライス装置 (マクロトーム)

図 7 3次元表示試料のキャリブレーション

図 8 メロンの糖度分布の3次元可視化画像(適熟果)

さらに強い赤色になるだけの部分的な変化に留まっていることを表していると考えられた。

3. 3次元の可視化表示

この手法を用いて、3次元の可視化を行うには、スライス画像が必要となる。そこで、メロンを正確に位置決めしながら、一定厚さでスライスできる装置(顕微鏡切片試料用のマイクロトームならぬマクロトーム)を試作した。

その写真を図6に示す。これは、図2の実験装置を改良したもので、移動壁の代わりにラボジャッキを水平に設置し、メロンとジャッキの間は粘土で堰を作り、そこへ溶融パラフィンを流し込むことにより両者を固定した。これにより、ガラス面方向は定位置を保ったままスライス厚さに応じた微小送りが可能になる。また、ガラス面と平行にスライスガイドを試料を挟む形で両側に設け、刃渡り30cmの包丁でもって果肉を正確にスライスできるようにした。本装置でもって、適熟果のメロンから5mmおきに18枚のスライス画像を取得し、そのうちの16枚(ちょうどメロン半分に相当)を用いて、それぞれ糖度分布を可視化し、ボリュームレンダリングにより、3次元画像の構築を行った。その際のキャリブレーションを図7に、3次元可視化画像を図8に示す。これにより、立体的な糖度の分布が一目でわかり、今後、品種や栽培方法の違いが品質に与える影響を調べる上で、有力なツールになり得ると考えられた。

要 約

メロン果肉の糖度が、クロロフィル吸収帯に相当する676nmの吸光度と逆相関にあることを見いだすとともに、冷却CCDカメラを用いた画像光学系において各ピクセル毎に近赤外分光法にもとづく糖度推定を行い、その結果にカラーマッピングを施すことにより糖度の分布を可視化した。可視化した画像から、糖度の度数分布図を作製し、糖の蓄積過程の定量評価を試みた。さらに、メロンを5mmごとにスライスする装置を試作し、スライス画像からの糖の3次元可視化を行った。

文 献

- 1) 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，東京)，p.149(1996)。
- 2) 尾崎幸洋，河田 聡：近赤外分光法，(学会出版センター，東京)，p.11(1996)。
- 3) 岩元睦夫，河野澄夫，魚住 純：近赤外分光法入門，(幸書房，東京)，p.40(1994)。

(平成12年10月10日受付，平成13年2月2日受理)