

ハイパースペクトルイメージングによる青果物のアントシアニン色素分布の評価に関する研究(1)

誌名	植物環境工学
ISSN	18802028
著者	永田, 雅輝 小林, 太一 Tallada, J. ほか2名,
巻/号	18巻1号
掲載ページ	p. 42-49
発行年月	2006年3月

ハイパースペクトルイメージングによる青果物のアントシアニン
色素分布の評価に関する研究
第1報 紫イモのアントシアニン色素分布の可視化

永田雅輝¹・小林太一^{1,2}・ジャスパ タラダ^{1,2}・豊田 寛¹・後藤有美子¹

¹宮崎大学農学部 889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1

²鹿児島大学大学院連合農学研究科

Study on Anthocyanin Pigment Distribution Estimation for Fresh Fruits and Vegetables
Using Hyperspectral Imaging
Part1. Visualization of Anthocyanin Pigment Distribution of Purple-fleshed Sweetpotato
(*Ipomoea batatas* Poir)

Masateru NAGATA¹, Taichi KOBAYASHI^{1,2}, Jasper TALLADA^{1,2}, Hiroshi TOYODA¹ and Yumiko GOTO¹

¹Faculty of Agriculture, University of Miyazaki, Miyazaki 889-2192 Japan

²United Graduate School of Agricultural Sciences, Kagoshima University

Abstract

Measurement of some internal properties of fruits for quality and safety is becoming more important to consumers and industry in whole. The main goal of this research is to develop prediction models that can estimate anthocyanin pigment content in purple-fleshed sweetpotato 'AYAMURASAKI' and 'MURASAKIMASARI' using hyperspectral imaging in the visible range (450-600 nm). A hyperspectral imaging system was developed based on a liquid crystal tunable filter that took images from 450 to 600 nm at 1 nm wavelength interval. Using stepwise multiple linear regression, calibration model wavelengths were selected using the second derivative of the smoothed absorbance spectral data. The five-wavelength model had a correlation coefficient R of 0.921 with a standard error of calibration (SEC) of 0.045 and prediction (SEP) of 0.052 for the 'AYAMURASAKI' sample sets, and an R of 0.830 with a SEC of 0.023 and a SEP of 0.017 for the 'MURASAKIMASARI' sample sets. By applying these calibration curves to each pixel of the spectral images of sample slices, anthocyanin pigment distribution maps were produced to estimate the internal quality of sweetpotato (AYAMURASAKI and MURASAKIMASARI).

Keywords: anthocyanin pigment content, hyperspectral Imaging, purple-fleshed sweetpotato (*Ipomoea batatas* Poir), quality estimation

緒 言

2005年 6月 7日受付

2005年 10月 25日受理

Corresponding author: Masateru Nagata

(nagatam@cc.miyazaki.ac.jp)

近年、消費者の食に対する「安全性・安心感・機能性」への関心の高まりから、農産物では外観に加えて味や栄養等の品質に関する評価・検査が、これまで以上に強く求められ

るようになった。農産物の品質評価技術は、これまでも光学的手法を中心に研究が進められ、中でも光センサーを用いた品質評価・検査は、果実等の非破壊計測を可能として、選果場等で広く普及している (Ozaki, 1997; Kawano, 2003)。今後、消費者の求める品質をより明確に提示するには、品質分布状態は重要な評価項目に位置づけられる。これまでの光センサーによる計測は、対象成分品質の包括的な測定をするには優れているが、分布状態の評価には多少難がある。

そこで筆者らは、従来の部分的測定を二次元画像測定に拡張した計測技術を検討するために、画素単位に解析可能なハイパースペクトルイメージングを用いて、青果物の品質分布評価に関する研究に取り組んだ (Nagata, 2002)。本手法による研究事例は杉山・蔦等によるメロンにおける糖度分布の可視化がある (Sugiyama, 1999; Tsuta *et al.*, 2002a; Tsuta *et al.*, 2002b)。筆者らもイチゴおよびトマトの糖度・硬度について検討した結果、一定の成果を得ている (Nagata *et al.*, 2004a; Nagata *et al.*, 2004b)。

本報は、機能性成分を有する食品の品質評価として青果物の色 (機能性色素) に着目し、可視光領域 (450 ~ 600 nm) におけるハイパースペクトルイメージングを用いて有色サツマイモのアントシアニン色素分布の評価について試みた。

実験装置および方法

1. 供試サツマイモおよび試験片

供試した有色サツマイモ (*Ipomoea batatas* Poir.) は、九州沖縄農研センター (宮崎県都城市) で栽培された紫イモと称されている 'アヤマラサキ' および 'ムラサキマサリ' の2品

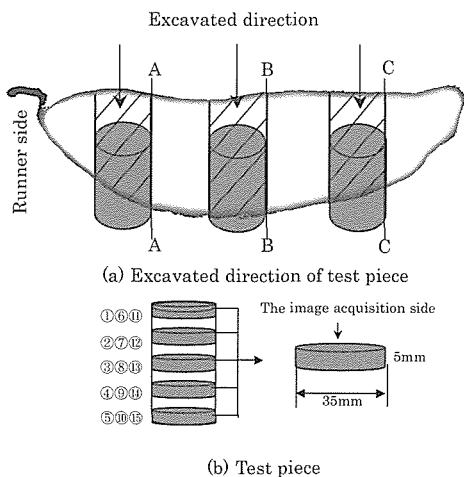


図1 試験片の採取位置

Fig. 1 Measurement points of sweet potato for spectral imaging and extracted material.

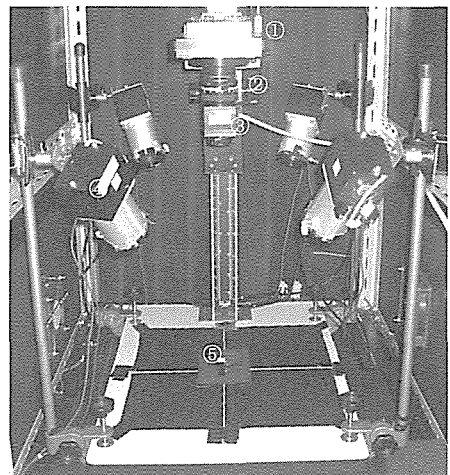
種である。試料は、平成16年10月上旬に収穫され、貯蔵庫で約50日間保管された階級S~3Lのアヤマラサキ11個 (No. 1 ~ No. 11, 平均重量245 g, 平均長径154 mm, 平均直径45 mm), ムラサキマサリ6個 (No. 1 ~ No. 6, 平均重量306 g, 平均長径129 mm, 平均直径58 mm) を供試した。

試験片は、図1(a)に示すように紫イモのなり口から上部、中部、下部の3部位の位置で上方から型抜き器 (φ35 mm) でくり抜き、均一な試験片を得るために図1(b)のように長径方向の切片として、5 mm厚の円板状試験片 (5 g) を各部位あたり5個作成した。一個の紫イモから15個の試験片を検量線作成および評価に供試した。試験片①, ⑤, ⑥, ⑩, ⑪, ⑮は表皮付とした。

また、A-A, B-B, C-Cの断面は、アントシアニン色素分布の可視化に用いた。B-B断面は個体間のアントシアニン色素分布の評価に用いた。

2. ハイパースペクトルイメージ撮影装置

図2はハイパースペクトルイメージ撮影装置を示す。本装置は可視光領域 (400~700 nm) の任意波長を最小1 nm間隔で連続的にスペクトル画像を取得できる反射光型撮影装置として構築した。照明部は、DLライト (フィリップス製ハロゲンランプ, 50W, ビーム角38°, 色温度3200K, エスアイ精工製) による直接照射方式とし、照射位置は被写体上方 (高さ350 mm) の4ヶ所とした。ハレーションを除去するため



①Apogee AP2E camera ②Lens
③Varispec LCTF ④Direct Light illuminant
⑤Sample

図2 ハイパースペクトルイメージ撮影装置

Fig. 2 Hyperspectral imaging set-up.

に、ライトおよびカメラレンズ先端に偏光フィルターを取付けた (Kondou *et al.*, 2004). 照度は試料位置で 4,000 ~ 4,500 lux であった.

撮影装置は、外乱光による影響除去のために、装置全体をブラックボードと暗幕で覆った。さらに、装置の内側を全て黒色にして拡散光を吸収するようにした。また、光源部から発生する熱 (Honma *et al.*, 2003) の影響を除くために、撮影ボックスの側面および上面に取り付けた冷却ファンで排熱し、装置内温度を 22°C に保った。室内温度は 20°C に設定した。

撮影器は、有効画素数 1,572,864 画素、14bit 階調の冷却 CCD カメラ (Apogee 製, AP2E), レンズ (NIKKOR, 1:1.4, $f = 50$), 液晶チューナブルフィルター (CRI, 450–600 nm, 半値幅 5 nm, VS-V153-10-HC-20) から構成され、被写体の上方 650 mm に設置した。

3. ハイパースペクトルイメージングによる画像の取得と処理

1) 画像の取得

ハイパースペクトルイメージングによる画像取得は、冷却 CCD カメラの画像処理ソフトウェア Max-Im を用いて試験片表面を 450 ~ 600 nm の範囲において 1 nm 間隔で行い、151 枚の分光画像 (サイズ 512 × 726 画素) をパソコンに取り込んだ。この時の撮影条件は、冷却 CCD カメラの冷却温度を -15°C、シャッタースピードを 1.3 秒、絞りを $F = 8$ とした。

2) 画像の補正

取得した分光画像の処理は、自作プログラム (Matlab Ver 6.5.1) を用いて次のように行った。まず、画像全体から目的とする対象物のみを抽出するために、本実験では背景と対象物との間で最も濃淡差があった 650 nm の画像をもとにスレッシユホールド法を用いて対象物のみ切り出すことによって背景除去を行った。次に、取得した分光画像には、暗電流ノイズ、バイアス電圧、読み出しノイズ、各画素の感度ムラ、光学系の光量ムラが含まれるので、各画素の輝度値 (反射強度) を補正するために、(1) 式により画像補正を行い、各画素を 14 bit 階調の輝度値で表現した (Fukushima. 1999).

$$I_{norm(x,y)} = \frac{I_{sample(x,y)} - I_{dark(x,y)}}{I_{reference(x,y)} - I_{dark(x,y)}} \cdot m \quad (1)$$

ここで、 $I_{norm(x,y)}$ は補正画像の輝度値、 $I_{sample(x,y)}$ は分光画像の輝度値、 $I_{dark(x,y)}$ はダークフレーム (光を当てずに撮影した画像) の輝度値、 $I_{reference(x,y)}$ はフラットフィールド (標準板を撮影した画像) の輝度値、 m はフラットフィールドの平均値である。

3) 吸光度への変換と二次微分処理

(1) 式によって得られた補正画像は各画素が 14Bit 階調の輝度値で表現されているので、輝度値を (2) 式によって吸光度値 A へ変換した (Iwamoto, *et al.*, 2002).

$$A_{(x,y)} = \log(I_{s(x,y)} / I_{(x,y)}) = \log(1 / I_{norm(x,y)}) \quad (2)$$

ここで、 $A_{(x,y)}$ は吸光度値、 $I_{s(x,y)}$ は標準白色板の反射光の強さ、 $I_{(x,y)}$ は試料の反射光の強さ、 $I_{norm(x,y)}$ は補正画像である。

(2) 式によって得られた各画素の吸光度を試験片ごとに平均し、450 ~ 600 nm の波長域 (1 nm 間隔) で連続的にプロットして平均吸光度のスペクトルを求めた。次に、このスペクトルの加算的なベースライン変動の除去や微小ピーク等を強調するために二次微分処理を行った。

4. アントシアニン色素の化学的抽出

アントシアニン色素の含量は、対象物からの抽出液のある吸収波長 (490–530 nm) における吸光度を測定し、その数字の大小によって相対量として示されている (Uematsu 1998). 紫イモでは、抽出液が 5% ギ酸の場合 524 nm, 0.5% 硫酸の場合 518 nm (Yoshinaga *et al.*, 1998), 醸造酢の場合 525 nm (Ohda *et al.*, 2000) における吸光度で示されている。

本研究では、50% 酢酸の抽出液 100 ml (Yoshinaga and Ishiguro. 2000) を用いて、画像撮影直後の試験片 (5 g) を侵漬 (20 時間以上) して色素を抽出した。その抽出液からスペクトロメーター (Avantes 製, Avaspec-2048) を用いて 490–530 nm の透過光強度を測定し、吸光度変換を行い、吸収の強い波長をアントシアニン色素の吸収波長 (λ_a) とし、その吸光度を実測値とした。

5. 検量線の作成および評価

検量線の作成は、試験片表面 ($\phi 35$ mm) の各波長における平均吸光度二次微分値 (d^2A) を説明変数、アントシアニン色素の実測値を目的変数として重回帰分析で行った。ここで、第一波長は、抽出液のアントシアニン色素の吸収波長 (λ_a) に由来する分光画像の吸収波長とした。また、選択波長数は、オーバーフィッティングの現象が発生しない範囲とした。なお、標準誤差 SEC を (3) 式で求めた (Iwamoto, *et al.*, 2002).

$$SEC = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 / (n - p - 1)} \quad (3)$$

ここで、 SEC は検量線作成時の標準誤差、 y_i は対象とする成分の実測値 (吸光度)、 \bar{y}_i は対象とする成分の予測値 (検量線から求める吸光度)、 n は検量線作成試料の数、 p は検量線作成に用いた波長の数である。

また、得られた検量線については、検量線評価用試料を用い、(4) 式でその精度 SEP を評価した (Iwamoto, *et al.*, 2002).

$$SEP = \sqrt{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2 / (n - 1)} \quad (4)$$

ここで、 SEP は検量線評価用試料に対する標準誤差、 d_i は検量線による予測値(吸光度)と抽出法による実測値(吸光度)の差、 \bar{d} は d_i の平均値、 n は評価用試料の数である。

結果および考察

1. アントシアニン色素の吸収波長

表1は検量線作成用および評価用に用いた試験片の吸光度を示す。図3は化学的抽出法によるアントシアニン色素抽出液の(a)吸光度および(b)吸光度二次微分スペクトルの結果である。アヤマラサキでは、505 nm、508 nm および 525

nmの波長において、ムラサキマサリでは、503 nm、508 nm および 526 nmの波長において強い吸収が見られた。よって、アントシアニン色素の吸収波長(λ_a)は最も強い吸収が見られた、アヤマラサキで $\lambda_a = 525$ nm、ムラサキマサリで $\lambda_a = 526$ nmと決定した。

2. 吸光度二次微分スペクトル

アントシアニン色素の吸収波長である490~530 nmの波長域において、分光画像から作成したアヤマラサキとムラサキマサリの吸光度二次微分スペクトルを図4に示す。図から、アヤマラサキおよびムラサキマサリの両者とも507 nm、513 nm および 523 nmで強い吸収が見られた。これらの吸収波長と図

表1 抽出液の吸光度測定値

Table 1 Basic data of absorbance by extracted liquid of Anthocyanin pigments

Variety		AYAMURASAKI		MURASAKIMASARI	
Calibration equation		Calibration set	Prediction set	Calibration set	Prediction set
Absorbance	N*	110	55	60	30
	Mean	2.117	2.136	2.044	2.036
	Min.	1.97	1.949	1.982	1.966
	Max.	2.489	2.43	2.180	2.082
	S.D.	0.142	0.134	0.038	0.028

N*: Number of test piece

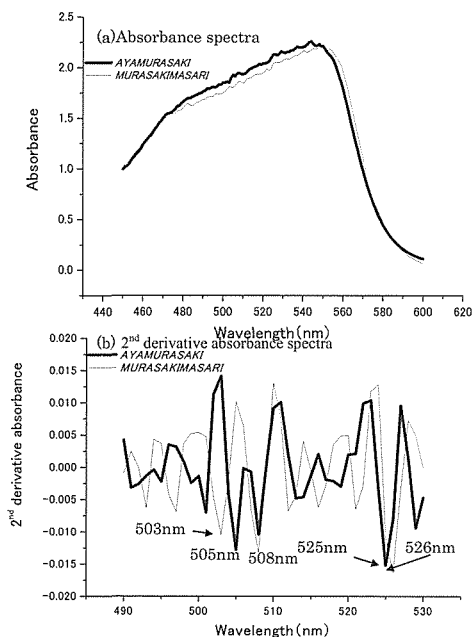


図3 抽出液の吸光度および吸光度二次微分スペクトルの解析結果

Fig. 3 Absorbance and 2nd derivative absorbance spectra of extracted material.

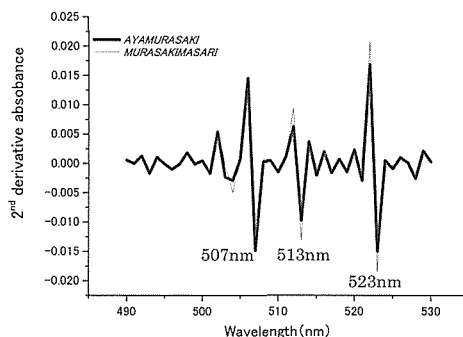


図4 分光画像による吸光度二次微分スペクトルの解析結果

Fig. 4 Second derivative absorbance spectra from spectral imaging.

3での抽出液の吸収波長を比較した結果、アヤマラサキにおける507 nm, 513 nmおよび523 nmは、抽出液の505 nm, 508 nmおよび525 nmに由来する吸収波長と言える。一方、ムラサキマサリでは、507 nm, 513 nmおよび523 nmは、抽出液の503 nm, 508 nmおよび526 nmに由来する吸収波長と言える。このように、分光画像からの吸収波長は抽出液からの吸収波長と類似することから、ハイパースペクトルイメージングによる色素分布評価の可能性が示唆できた。なお、両試料において、分光画像からの吸収波長と抽出液からの吸収波長に2~5 nmの差異が見られたが、これは測定物（液体、固体）の差および測定器の機差等が影響したと思われる。

3. 検量線の作成と評価

表2に示すようにアントシアニン抽出液の吸収スペクトルで最も吸収の強い波長 λ_a （アヤマラサキで525 nm, ムラサキマサリで526 nm）に由来する分光画像の523 nmを第一波長として5波長までの検量線の作成と評価を行った。この結果、両者とも5波長の検量線においてアヤマラサキは $R = 0.921$, $SEP = 0.052$, ムラサキマサリは $R = 0.830$, $SEP = 0.017$ となり、オーバーフィッティングの現象も見られず、最も高い精度が得られ、この時の予測値（吸光度）と実測値（吸光度）の関係は図5として得られた。また、予測値の式は次式で導入された。

アヤマラサキの場合

$$\begin{aligned} \text{予測値(吸光度)} &= 2.111 - 5.393 d^2 A \lambda_{523} + 15.277 d^2 A \lambda_{592} \\ &\quad - 64.426 d^2 A \lambda_{564} - 40.283 d^2 A \lambda_{539} \\ &\quad + 32.212 d^2 A \lambda_{516} \end{aligned} \tag{5}$$

ムラサキマサリの場合

予測値(吸光度)

表2 検量線の作成および評価結果
Table 2 Result of parameters of calibration and prediction by wavelength models

Selected Wavelength					Calibration		Prediction		
λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	R	SEC	R	Bias	SEP
<i>AYAMURASAKI</i>									
523					0.655	0.086	0.590	0.00	0.110
523,592					0.818	0.066	0.890	0.02	0.064
523,592,564					0.900	0.051	0.890	0.01	0.061
523,592,564,539					0.914	0.047	0.906	0.01	0.056
523,592,564,539,516					0.921	0.045	0.921	0.01	0.052
<i>MURASAKIMASARI</i>									
523					0.353	0.038	-0.166	0.00	0.038
523,451					0.408	0.038	-0.182	0.00	0.037
523,451,479					0.508	0.035	0.178	0.00	0.031
523,451,479,501					0.816	0.024	0.739	0.01	0.020
523,451,479,501,500					0.843	0.023	0.830	0.00	0.017

$$\begin{aligned} &= 2.003 - 19.968 d^2 A \lambda_{523} + 44.942 d^2 A \lambda_{451} \\ &\quad + 121.242 d^2 A \lambda_{479} - 161.761 d^2 A \lambda_{501} \\ &\quad + 159.84 d^2 A \lambda_{500} \end{aligned} \tag{6}$$

ここで、 $d^2 A$ は各選択波長における平均吸光度二次微分値である。

4. アントシアニン色素の評価

1) アントシアニン色素分布の可視化

アントシアニン色素分布の可視化画像を作成するためにアヤマラサキとムラサキマサリの全試料の断面（図1のA-A, B-B, C-C）の分光画像を取得し、試験片と同様な画像処理を行い、画素ごとにアヤマラサキでは(5)式、ムラサキマサリでは(6)式の検量線を適用してアントシアニン色素（吸光度）

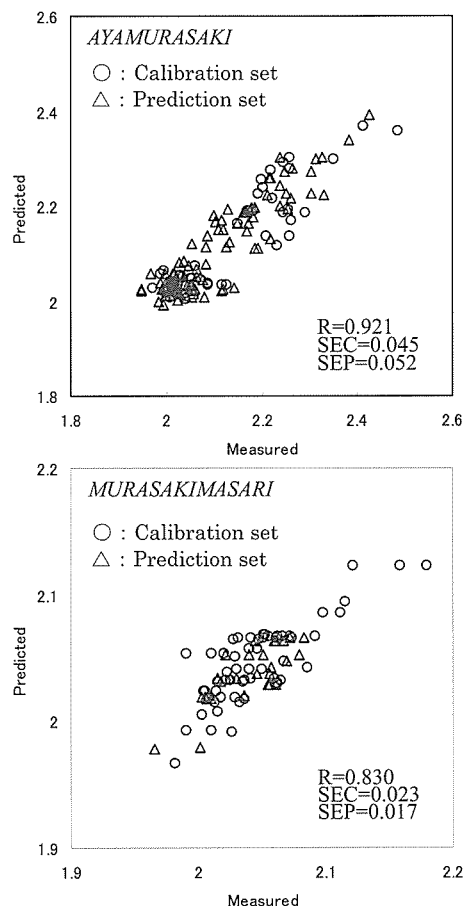


図5 5波長検量線による予測値と実測値の関係（アヤマラサキ, ムラサキマサリ）

Fig. 5 Relationship between measured and predicted anthocyanin pigment absorbance by five wavelength (AYAMURASAKI, MURASAKIMASARI).

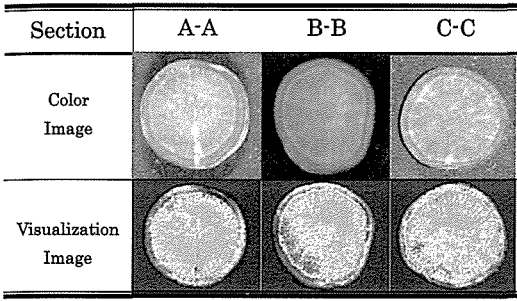


図6 3断面の可視化画像の例 (アヤマラサキ, No.6)

Fig. 6 Anthocyanin pigment distribution map from three sections (AYAMURASAKI, No.6).

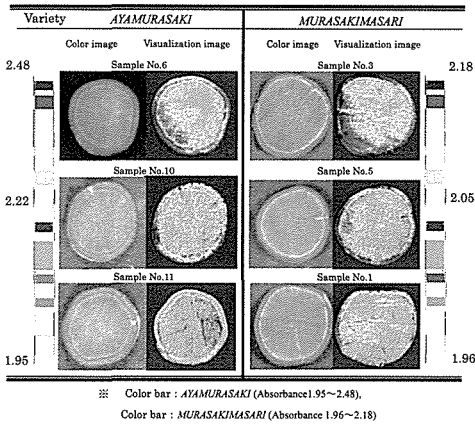


図7 アントシアニン色素分布の可視化画像の例

Fig. 7 Anthocyanin pigment distribution map of samples.

を求め、その差異をカラーマッピング (擬似カラー) した。一例として、アヤマラサキ (No. 6) の3断面の実画像および可視化画像を図6に示した。次に、個体間のアントシアニン色素含有度合を比較するために、固体の代表部位となる中央のB-B断面における可視化画像を用いて、その差異を全試料について検討した。その結果、個体間でアントシアニン色素含有度合ならびに分布の相違が明確となった。図7に代表例としてアヤマラサキのNo. 6, No. 10 および No. 11の試料、ムラサキマサリのNo. 1, No. 3 および No. 5の試料における実画像および可視化画像を示した。

このように実画像ではアントシアニン色素の含有度合や分布は目視では確認しにくい、可視化画像とすることで確認が容易にできた。特に皮層部近傍ではアントシアニン色素が多いと言われている事実と合致する結果が得られた (Yoshimoto *et al.*, 1999)。

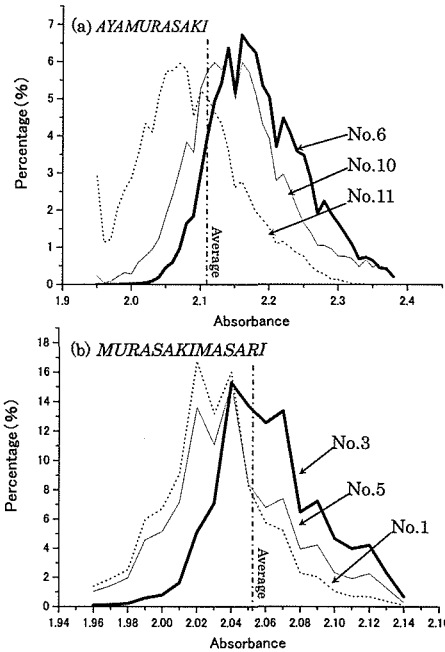


図8 アントシアニン色素 (吸光度) の度数分布

Fig. 8 Percentage of anthocyanin pigment (absorbance).

2)アントシアニン色素の度数分布

図7においてアヤマラサキの可視化画像のNo. 6とNo.11を比較すると、前者が後者より全体的に赤色系が多いことからアントシアニン色素の含有度合が高いと言える。そこで、この可視化画像をもとに吸光度0.1単位で画素を計数し、個体間のアントシアニン色素の分布割合 (度数分布) を比較した。

図8は各個体間の可視化画像からアントシアニン色素の分布割合を代表固体3例 (No. 6, No. 10, No. 11) についてグラフ化したものである。図のようにアントシアニン色素の含有度合が高いNo. 6がNo. 10やNo. 11よりも波形が右側にシフトすることが判った。ムラサキマサリも同様な傾向であった。これにより、固体間におけるアントシアニン色素の含有度合の評価が可能と言える。

3)アントシアニン色素の個体間評価

表1の平均吸光度を評価基準値として、図8の分布波形をもとに品種ごとにアントシアニン色素の個体間評価を行った。判定は、平均吸光度以上で分布波形の面積割合が50%以上をA (優) 評価、50%未滿をB (良) 評価とする。その結果、表3に示すように固体をAとBに区別することができた。アヤマラサキのNo. 5, No. 6はA評価とする割合が80%台で他より高くなっているが、これは肉眼でも色素が濃く感じられ

表3 アントシアニン色素の品質評価
Table 3 Anthocyanin pigment quality estimation

Sample No	Percentage of anthocyanin pigment (absorbance)		Estimation
	Less than average	More than average	
<i>AYAMURASAKI</i>			
1	41	59	A
2	51	49	B
3	46	54	A
4	33	67	A
5	13	87	A*
6	13	87	A*
7	64	36	B
8	65	35	B
9	61	39	B
10	31	69	A
11	68	32	B
<i>MURASAKIMASARI</i>			
1	82	18	B
2	67	33	B
3	45	55	A
4	47	53	A
5	70	30	B
6	76	24	B

Average absorbance : *AYAMURASAKI* : 2.117, *MURASAKIMASARI* : 2.044

たことと一致した。しかし、肉眼や CCD カメラ (RGB) では微小な差は捉え難いことから、ハイパースペクトルイメージングを用いた評価 (選別) はアントシアニン色素の含有度合を知る有用な指標として期待できる。

以上のように、有色サツマイモのアントシアニン色素の評価において、ハイパースペクトルイメージングはデータを高精度・高精細に取り扱うことができることから、色素分布の可視化、分布割合、評価 (選別) に有用であることが明らかとなった。今後は、より緻密な成分分布の簡易的計測法を見出して、分光画像を用いた面からの品質評価の実用化研究を進めたい。

摘 要

ハイパースペクトルイメージングを用いて、有色サツマイモ (アヤマラサキ, ムラサキマサリ) のアントシアニン色素の評価を行った。

(1) 分光画像の取得は、高感度冷却 CCD カメラと液晶チューナブルフィルターを用いて 450 ~ 600 nm の可視光領域を 1 nm 間隔で分光画像を取得した。画像処理は分光画像を画素ごとに輝度値から吸光度値に変換し、平均吸光度二次微分値を求めてスペクトル作成を行った。

- (2) アントシアニンの抽出液 (50% 酢酸に 24 時間浸漬) の吸光度二次微分スペクトルから 490 ~ 530 nm の範囲で最も吸収の強い波長をアントシアニン色素の吸収波長として選択した。
- (3) アントシアニン色素の検量線は、分光画像から求めた平均吸光度の二次微分値を説明変数、化学的抽出法で求めた波長の吸光度値を目的変数として重回帰分析から求めた。
- (4) 検量線から画素ごとの吸光度を求め、その値をカラーマップピングしてアントシアニン色素分布の可視化画像を作成した。
- (5) アヤマラサキでは、523 nm の分光画像と 525 nm の抽出液に強い相関が認められた。523 nm を第一波長として 5 波長で検量線を作成した結果、重相関係数 $R = 0.921$ 、標準誤差 $SEP = 0.052$ となり、予測精度は良好であった。
- (6) ムラサキマサリでは、523 nm の分光画像と 526 nm の抽出液に強い相関が認められた。523 nm を第一波長として 5 波長で検量線を作成した結果、重相関係数 $R = 0.830$ 、標準誤差 $SEP = 0.017$ であり、予測精度は良好であった。
- (7) 選択された波長域で検量線を適用し、アントシアニン色素分布の可視化画像と分布割合のグラフを作成し、個体間の評価を試みた結果、ハイパースペクトルイメージングの有用性を確認した。

謝 辞

本研究は文部科学省科学研究費 (課題番号 16658098) の一部として遂行した。試料は独立行政法人農業・生物系特定産業技術研究機構九州沖縄農業研究センター畑作研究部の協力を得た。ここに記して関係者各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- Fukushima, H. 1999. Introduction to cooled CCD camera for amateur astronomy (in Japanese) (天文アマチュアのための冷却 CCD カメラ入門). SeibundouSinkousya, Tokyo, 149-152.
- Honma, T., Sawayama, K., Arai, H., Baba, N., Miyashita, I., Aoyama, T. 2003. Development of measurement techniques for evaluating sugar content in Tomatoes by NIR spectroscopy (in Japanese). Hokkaido Industrial Research Institute report, 302: 9-14.
- Iwamoto, M., Kawano, S., Uozumi, J. 2002. An introduction to Near-Infrared spectroscopy (in Japanese) (近赤外分光法入門). Saiwaishobo, Tokyo, 50-57.
- Kawano, S., et al. 2003. Food Non-destructive Measurement

- Handbook (in Japanese) (食品の非破壊計測ハンドブック). Science Forum, Tokyo, 161-252.
- Kondou, N., Monta, M., Noguti, N. 2004. Agri-Robot (1) -Fundamentals and Theory- (in Japanese) (農業ロボット ((1)) -基礎と理論-). Coronasya, Tokyo, 23-26.
- Nagata, M. 2002. Quality judgment and estimation of agricultural products (in Japanese). Journal of Kyushu Branch of JSAM, 51: 59-64.
- Nagata, M., Tallada, J., Kobayashi, T., Gejima, Y. 2004a. Predicting maturity quality parameters of strawberries using hyperspectral imaging. ASAE Paper No. 043033. St. Joseph, Michigan: ASAE.
- Nagata, M., Kobayashi, T., Tallada, J., Toyoda, H. 2004b. Trial study on non-destructive prediction of sugar content of Tomatoes by NIR spectral imaging using liquid crystal tunable filter products (in Japanese). Journal of Kyushu Branch of JSAM, 53: 11-15.
- Ohda, R., Igarashi, K., Tsukui, A. 2000. Anthocyanin -Food Color with Health Benefits- (in Japanese) (アントシアニン -食品の色と健康-). Kenpakusya, Tokyo, 74
- Ozaki, Y. 1997. Invitation to Spectroscopy (in Japanese) (分光学への招待), Sangyoutosyo, Tokyo, 2-4.
- Sugiyama, J. 1999. Visualization of sugar content in the flesh of a Melon by Near-Infrared imaging. J. Agric. Food Chem, 47: 2715-2718.
- Tsuta, M., Sugiyama, J., Sagara, Y. 2002a. Near-Infrared imaging spectroscopy based on sugar absorption band for Melon. J. Agric. Food Chem, 50: 48-52.
- Tsuta, M., Sugiyama, J., Sagara, Y. 2002b. Near-Infrared imaging spectroscopy using a hyper-spectral camera -Visualization of the sugar distribution in the flesh Melons- (in Japanese). Journal of the Institute of Image Information and Television Engineers, 56(12): 159-162.
- Uematsu, T. 1998. A theory and a fact of strawberry cultivation (in Japanese) (イチゴ栽培の理論と実際). Seibundoushinkousya, Tokyo, 167.
- Yoshimoto, M., Okuno, S., Kumagai, T., Yoshinaga, M., Yamakawa, O. 1999. Distribution of antimutagenic components in colored sweetpotatoes. Reprinted from JARQ, 33(3): 143-148
- Yoshinaga, M., Nakatani, M., Yamazaki, A., Yamakawa, O. 1998. Extraction of anthocyanins from purple-fleshed sweetpotato by folmic acid and utilization of the residue (in Japanese). Kyushu Agriculture Research, 60: 38.
- Yoshinaga, M., Ishiguro, K. 2000. Improvement on the evaluation method of anthocyanin content and composition in purple-fleshed sweetpotato (in Japanese). Kyushu Agriculture Research, 62: 15.