

ハイパースペクトルイメージングによる
青果物の品質評価・検査に関する基礎的研究

小林 太一

2006

要 旨

近年、食に対する消費者の健康・安全指向の強い高まりから、農産物の品質評価・検査は、これまで以上に厳密さが要求されるようになった。本研究では、農産物の品質特性抽出にスペクトル情報と画像情報とを融合したハイパースペクトルイメージング法を用いて、サツマイモ（紫イモ）およびイチゴのアントシアニン色素分布の評価およびイチゴの糖度予測を検討したものである。

ハイパースペクトルイメージングでの画像取得は、液晶可変フィルターと高感度冷却CCDカメラを用いて、450~1000nmの範囲を1nm間隔で連続的に行った。取得した分光画像と化学分析値との間で重回帰分析を行い検量線を作成し、この検量線を画素ごとに適用して成分分布の可視化画像を作成した。その結果、以下のような知見を得た。

1) サツマイモ（紫イモ）のアントシアニン色素分布の可視化

アヤマラサキでは、分光画像の523nmと抽出液の525nmにおける吸光度に強い関係が認められた。523nm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 $SEP=0.052$ であった。ムラサキマサリでは、分光画像の523nmと抽出液の526nmにおける吸光度に強い関係が認められた。523nmを第一波長として5波長で検量線を作成した結果、 $R=0.830$ 、 $SEP=0.017$ であり、予測精度は良好であった。また、この検量線を各画素に適用し、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、ハイパースペクトルイメージングの有用性を確認した。

2) イチゴのアントシアニン色素分布の可視化

分光画像の508nmと抽出液の504nmにおける吸光度に強い関係が認められた。508nm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 $R=0.932$ 、標準誤差 $SEP=0.213$ であり、予測精度は良好であった。この検量線を各画素に適用して作成した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から、個体間の評価が可能であった。また、予測精度への撮影距離の差は20mm程度では影響なかったことから、イチゴのような小形果実へのハイパースペクトルイメージングの有用性が示唆された。

3) イチゴの糖度予測

近赤外領域の分光画像データを用いた回帰分析の結果、1~10分、1~2分、3~6分、7~10分着色の各着色区分において、910nm近傍で糖度の吸収帯が確認された。この波長を第一波長とした検量線を各着色区分ごとに作成した結果、1~10分着色で重相関係数 $R=0.690$ 、標準誤差 $SEP=0.614$ 、1~2分着色で $R=0.0778$ 、 $SEP=0.432$ 、3~6分着色で $R=0.796$ 、

SEP=0.377, 7~10分着色で R=0.870, SEP=0.430 であった. このように, 着色度別に作成した糖度の吸収帯を第一波長とした検量線を用いると精度は上がることが明らかになった.

以上の結果, ハイパースペクトルイメージング法によって, アントシアニン色素評価および糖度予測が可能であることが確認された.

Basic study on quality estimation and testing for fresh fruits and vegetables using hyperspectral imaging

Summary

Recently, while consumers are more concerned with better health and enhanced safety of food products, quality estimation and testing of agricultural produce is more incessantly pursued than ever before. In this research, using hyperspectral imaging that combines spectral and image information for estimating quality of agricultural products, the anthocyanin pigment content distribution in purple-flesh sweet potato and strawberry, and prediction models for estimating sugar content in strawberries were developed. A hyperspectral imaging system was developed based on a liquid crystal tunable filter and CCD camera that acquires images from 450 nm to 1000 nm at 1 nm interval. Using multiple linear regression between spectral images and chemical analysis values, calibration models were developed and applied to form the distribution maps of chemical contents. The results are shown as follows:

1) Visualization of Anthocyanin Pigment Distribution in Purple-flesh Sweetpotato

In *AYAMURASAKI*, while the spectral image at 523 nm and liquid extracted pigment at 525 nm have shown high correlation, the five-wavelength model had a correlation coefficient (R) of 0.921 with a standard error of prediction (SEP) of 0.052. In *MURASAKIMASARI*, while the spectral image at 523 nm and the liquid extracted pigment at 526 nm have shown high correlation, the five-wavelength model had a R of 0.830 with a SEP of 0.017. By applying these calibration models, distribution maps and percentage graphs were produced to estimate the anthocyanin pigment of purple-flesh sweetpotato.

2) Visualization of Anthocyanin Pigment Distribution of Strawberry.

The spectral image at 508nm and liquid extracted pigment at 504nm had a strong correlation. The five-wavelength model had a R of 0.932 with a SEP of 0.213. By applying these calibration models, distribution maps and percentage graphs were produced to estimate the anthocyanin pigment in strawberry. To account for the effects of fruit size, the distance between the camera and samples was varied by around 20 mm because the mean radius of strawberry fruits is less than 20 mm. However, it did not affect the results.

3) Prediction of Sugar Content in Strawberry

The results of prediction models developed for estimating sugar content in strawberries using NIR hyperspectral imaging had confirmed the importance of spectral neighborhood around 910 nm at several ripeness groups of 10%-Full, 10-20%, 30-60% and 70%-Full ripeness. The best model for the samples of entire 10%-Full ripeness had an R of 0.690 and SEP of 0.614; the samples of 10-20% had an R of 0.778 and SEP of 0.432; the samples of 30-60% had an R of 0.796 and SEP of 0.377; and the samples of 70%-Full ripeness had an R of 0.870 and SEP of 0.430. The accuracy of predictions of the models according to level of ripeness were reasonably good.

With these results, the anthocyanin pigment and sugar content estimation using hyperspectral imaging was found possible.

ハイパースペクトルイメージングによる青果物の品質評価・検査に関する基礎的研究

【 目 次 】

第1章 緒 言	1
第1節 研究背景	1
第2節 研究目的	2
第3節 構成と概要	2
引用文献	3
第2章 農産物の非破壊品質評価の現状	5
第1節 はじめに	5
第2節 非破壊計測法の種類と特徴	6
1. 光学的方法	7
2. 力学的方法	9
3. 放射線的方法	9
4. 電磁気学的方法	10
第3節 画像情報からの品質評価・検査	10
1. X線画像	11
2. 紫外線画像	11
3. 近赤外線画像	12
4. 赤外線画像	12
5. テラヘルツ画像	12
引用文献	13
第3章 ハイパースペクトルイメージングと品質評価	16
第1節 ハイパースペクトルイメージング	16
第2節 画像計測システム	17
第3節 画像計測法	24
1. 反射光型	24

2.	透過光型	24
第4節	解析方法	26
1.	画像処理	26
2.	検量線の作成	27
3.	検量線の評価	29
	引用文献	30
第4章	青果物の品質評価に関する液晶可変フィルターを用いた分光画像による試み	32
第1節	緒言	32
第2節	実験装置および方法	32
1.	供試材料	32
2.	液晶可変フィルター	33
3.	測定装置	34
4.	測定項目および方法	36
第3節	結果および考察	36
1.	青果物表面色の分光画像と輝度（濃淡度）	36
2.	分光画像と分光分布との関係	40
3.	ニンジン表面に観察される損傷部位の特徴抽出	43
第4節	摘要	45
	引用文献	45
第5章	紫イモのアントシアニン色素分布の評価	46
第1節	緒言	46
第2節	サツマイモとアントシアニン色素	46
第3節	実験装置および方法	48
1.	供試サツマイモ	48
2.	試験片の作成	51
3.	ハイパースペクトルイメージ撮影装置	51
4.	画像の取得と処理	53

5.	アントシアニン色素の化学的抽出	54
6.	検量線の作成および評価	54
第4節	結果および考察	55
1.	アントシアニン色素の吸収波長	55
2.	吸光度二次微分スペクトル	57
3.	検量線の作成と評価	58
4.	アントシアニン色素の評価	60
第5節	摘要	64
	引用文献	65
第6章	イチゴのアントシアニン色素分布の評価	67
第1節	緒言	67
第2節	イチゴとアントシアニン色素	67
第3節	実験装置および方法	68
1.	供試イチゴ	68
2.	ハイパースペクトルイメージ撮影装置および画像の取得とその処理	70
3.	アントシアニン色素の化学的抽出	71
4.	検量線の作成および評価	71
5.	アントシアニン色素分布の可視化および評価	72
6.	画像取得時の撮影距離がアントシアニン色素の予測値に及ぼす影響	72
第4節	結果および考察	72
1.	アントシアニン色素の波長解析	72
2.	検量線の作成と評価	76
3.	アントシアニン色素分布の可視化および評価	77
4.	画像取得時の撮影距離がアントシアニン色素の予測値に及ぼす影響	81
第5節	摘要	81
	引用文献	82
第7章	イチゴの糖度予測の試み	83
第1節	緒言	83

第2節	実験装置および材料	83
1.	供試イチゴ	83
2.	ハイパースペクトルイメージ撮影装置および画像の取得とその処理	84
3.	糖度測定	85
4.	イチゴ糖度の吸収帯と検量線の作成および評価	85
第3節	結果および考察	86
1.	供試イチゴの糖度	86
2.	分光画像の近赤外吸光度スペクトルおよび吸光度二次微分スペクトル	86
3.	検量線の作成および評価	89
第4節	摘要	97
	引用文献	98
第8章	総括	99
	謝辞	103

図表題目一覧

第2章 農産物の非破壊品質判定・評価の現状

図 2-1 非破壊法の概念

Fig.2-1. Concept of non-destruction method.

図 2-2 電磁波の種類

Fig.2-2. Kinds of an electromagnetic wave.

表 2-1 非破壊分析法のエネルギーによる分類

Table. 2-1. Classification by energy of non-destruction method.

表 2-2 近赤外分光法の対象品目と成分

Table. 2-2. Object and ingredients of NIR spectroscopy.

第3章 ハイパースペクトルイメージングと品質評価

図 3-1 スペクトラム・ボリューム

Fig.3-1. Spectral volume.

図 3-2 分光画像撮影装置（可視光用反射型装置）

Fig.3-2. The visible range spectral imaging set-up.

図 3-3 X-Y 走査によるイメージングシステム

Fig.3-3. Imaging system by X-Y scan.

図 3-4 バンドパスフィルターを用いたイメージングシステム

Fig.3-4. Imaging system with bandpassfilter.

図 3-5 AOTF イメージングシステム

Fig.3-5. AOTF imaging system.

図 3-6 AOTF の原理

Fig.3-6. A principle of AOTF.

図 3-7 グレーティングとライン走査

Fig.3-7. A gratings and line scanning.

図 3-8 プリズムとライン走査

Fig.3-8. A prism and line scanning.

図 3-9 FFT イメージングシステム

Fig.3-9. FFT imaging system.

図 3-10 反射照明の測定部位

Fig.3-10. A measurement part of reflective lighting.

図 3-11 全透過照明の測定部位

Fig.3-11. A measurement part of transmitted lighting of all.

図 3-12 半透過照明の測定部位

Fig.3-12. A measurement part of transmitted lighting of half.

第 4 章 青果物の品質評価に関する液晶フィルターを用いた 分光画像による試み

図 4-1 供試材料

Fig.4-1. A test sample.

図 4-2 液晶可変フィルター

Fig.4-2. CRI Varispec Liquid Crystal Tunable Filter.

図 4-3 分光画像撮影装置

Fig.4-3. Spectral imaging set-up.

図 4-4 スペクトロフォトメーター

Fig.4-4. Spectrophotometer.

図 4-5 ピーマンの分光画像 (450nm,500nm,550nm,600nm,650nm)

Fig.4-5. Spectral image on green pepper at 450nm,500nm,550nm,600nm and 650nm.

図 4-6 バナナの分光画像 (450nm,500nm,550nm,600nm,650nm)

Fig.4-6. Spectral image on banana at 450nm,500nm,550nm,600nm and 650nm.

図 4-7 ニンジンの分光画像 (450nm,500nm,550nm,600nm,650nm)

Fig.4-7. Spectral image on carrot at 450nm,500nm,550nm,600nm and 650nm.

図 4-8 新配色カードの分光画像 (450nm,500nm,550nm,600nm,650nm)

Fig.4-8. Spectral image on standard color card at 450nm,500nm,550nm,600nm and 650nm.

図 4-9 分光分布

Fig.4-9. Spectral Distribution of reflected Halogen Lamp.

図 4-10 ニンジン表面に観察される損傷部位の分光画像, 2 値化画像および RGB 画像

Fig.4-10. Spectral image on damage carrot at 500nm,520nm,540nm,560nm,580nm,600nm,620nm and 650nm Binary images and RGB color images.

表 4-1 液晶可変フィルターの仕様

Table. 4-1. Specifications of CRI Varispec Liquid Crystal Tunable Filter.

第 5 章 紫イモのアントシアニン色素分布の評価

図 5-1 サツマイモの栽培畑 (宮崎県都城市九州沖縄農研センター)

Fig.5-1. A cultivation field of a sweet potato (National Agricultural Research Center for Kyushu Okinawa Region) .

図 5-2 供試サツマイモ

Fig.5-2. Sweet potato samples.

図 5-3 試験片の採取位置

Fig.5-3. Measurement points of sweet potato for spectral imaging and extracted material.

図 5-4 ハイパースペクトルイメージ撮影装置

Fig.5-4. Hyperspectral imaging set-up.

図 5-5 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.5-5. Absorbance and 2nd derivative absorbance spectra of extracted material.

図 5-6 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.5-6. Second derivative spectra from spectral imaging.

図 5-7 5 波長検量線による予測値と実測値の関係 (アヤムラサキ, ムラサキマサリ)

Fig.5-7. Relationship between measured and predicted anthocyanin pigment absorbance by five wavelength (*AYAMURASAKI*, *MURASAKIMASARI*).

図 5-8 3 断面の可視化画像の例 (アヤムラサキ, No.6)

Fig.5-8. Anthocyanin pigment distribution map from three sections (*AYAMURASAKI*, No.6).

図 5-9 アントシアニン色素分布の可視化画像の例

Fig.5-9. Anthocyanin pigment distribution map of samples.

図 5-10 アントシアニン色素（吸光度）の度数分布

Fig.5-10 Percentage of anthocyanin pigment (absorbance).

表 5-1 供試サツマイモの性状

Table. 5-1. Size profile of sweet potato samples.

表 5-2 抽出液の吸光度測定値

Table. 5-2. Basic data of absorbance by extracted liquid of anthocyanin pigment.

表 5-3 検量線も作成および評価結果

Table. 5-3. Result of parameters of calibration and prediction by wavelength models.

表 5-4 アントシアニン色素の品質評価

Table. 5-4. Anthocyanin pigment quality estimation.

第 6 章 イチゴのアントシアニン色素分布の評価

図 6-1 アントシアニン色素分布

Fig.6-1. Anthocyanin pigment distribution.

図 6-2 ハウス栽培イチゴ宮崎市木花)

Fig.6-2. A strawberry of house cultivation (kibana, miyazaki-shi).

図 6-3 供試イチゴ（品種：章姫）

Fig.6-3. Strawberry samples ('Akihime').

図 6-4 試料架台

Fig.6-4. A sample footstool.

図 6-5 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

Fig.6-5. Absorbance and 2nd derivative absorbance spectra of extracted material.

図 6-6 分光画像の一例

Fig.6-6. An example of spectral imaging.

図 6-7 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.6-7. Second derivative spectra from spectral imaging.

図 6-8 5 波長検量線による予測値と実測値の関係

Fig.6-8. Relationship between measured and predicted anthocyanin pigment absorbance (five wavelength).

図 6-9 可視化画像の例

Fig.6-9. Anthocyanin pigment distribution map.

図 6-10 アントシアニン色素分布の可視化画像の例 (7~10 分着色)

Fig.6-10. Anthocyanin pigment distribution map of samples (70% Fully Ripeness).

図 6-11 アントシアニン色素 (吸光度) の度数分布

Fig.6-11. Percentage of anthocyanin pigment (absorbance).

表 6-1 供試イチゴの性状

Table. 6-1. Size profile of Strawberry samples.

表 6-2 抽出液の吸光度測定値

Table. 6-2. Basic data of absorbance by extracted liquid of anthocyanin pigment.

表 6-3 検量線の作成および評価結果

Table. 6-3. Result of parameters of calibration and prediction by wavelength models.

表 6-4 アントシアニン色素の品質評価

Table. 6-4. Anthocyanin pigment quality estimation.

第 7 章 イチゴの糖度予測の試み

図 7-1 ハイパースペクトルイメージング撮影装置 (近赤外域用)

Fig.7-1. Hyper-spectral imaging setup consisted of (a) Apogee AP2EE camera, (b) CRI NIR Varspec LCTF, (c) Varispec Controller Box, (d) Dolan-Jenner Fiber-Lite PL950, (e) Cooler and (f) Sample stage.

図 7-2 ブリックス計 (RA-410)

Fig.7-2. Brix measurement device (RA-410).

図 7-3 近赤外分光画像の一例

Fig.7-3. An example of NIR spectral imaging.

図 7-4 吸光度スペクトル

Fig.7-4. Absorbance spectra.

図 7-5 吸光度二次微分スペクトル

Fig.7-5. 2nd derivative absorbance spectra

図 7-6 イチゴの Brix 値と二次微分吸光度値の相関係数 (1~10 分着色)

Fig.7-6. Correlation coefficient of the 2nd derivative absorbance value with Brix strawberry (10% -Fully Ripeness).

図 7-7 5 波長検量線による予測値と実測値の関係 (1~10 分着色)

Fig.7-7. Plot of measured and predicted sugar content (% Brix) using the calibration set (10% -Fully Ripeness).

図 7-8 イチゴの Brix 値と二次微分吸光度値の相関係数 (1~2 分着色)

Fig.7-8. Correlation coefficient of the 2nd derivative absorbance value with Brix strawberry (10-20% Ripeness).

図 7-9 4 波長検量線による予測値と実測値の関係 (1~2 分着色)

Fig.7-9. Plot of measured and predicted sugar content (% Brix) using the calibration set (10-20% Ripeness).

図 7-10 イチゴの Brix 値と二次微分吸光度値の相関係数 (3~6 分着色)

Fig.7-10. Correlation coefficient of the 2nd derivative absorbance value with Brix strawberry (30-60% Ripeness).

図 7-11 4 波長検量線による予測値と実測値の関係 (3~6 分着色)

Fig.7-11. Plot of measured and predicted sugar content (% Brix) using the calibration set (30-60% Ripeness).

図 7-12 イチゴの Brix 値と二次微分吸光度値の相関係数 (7~10 分着色)

Fig.7-12. Correlation coefficient of the 2nd derivative absorbance value with Brix strawberry (70%-Fully Ripeness).

図 7-13 5 波長検量線による予測値と実測値の関係 (7~10 分着色)

Fig.7-13. Plot of measured and predicted sugar content (% Brix) using the calibration set (70% -Fully Ripeness).

表 7-1 供試イチゴの性状

Table. 7-1. Size profile of Strawberry samples.

表 7-2 供試イチゴの糖度範囲

Table. 7-2. Solid content of Strawberry.

表 7-3 検量線の作成および評価結果 (1~10 分着色)

Table. 7-3. Result of parameters of calibration and prediction by wavelength models (10%-Fully Ripeness).

表 7-4 検量線の作成および評価結果 (1~2 分着色)

Table. 7-4. Result of parameters of calibration and prediction by wavelength models (10-20% Ripeness).

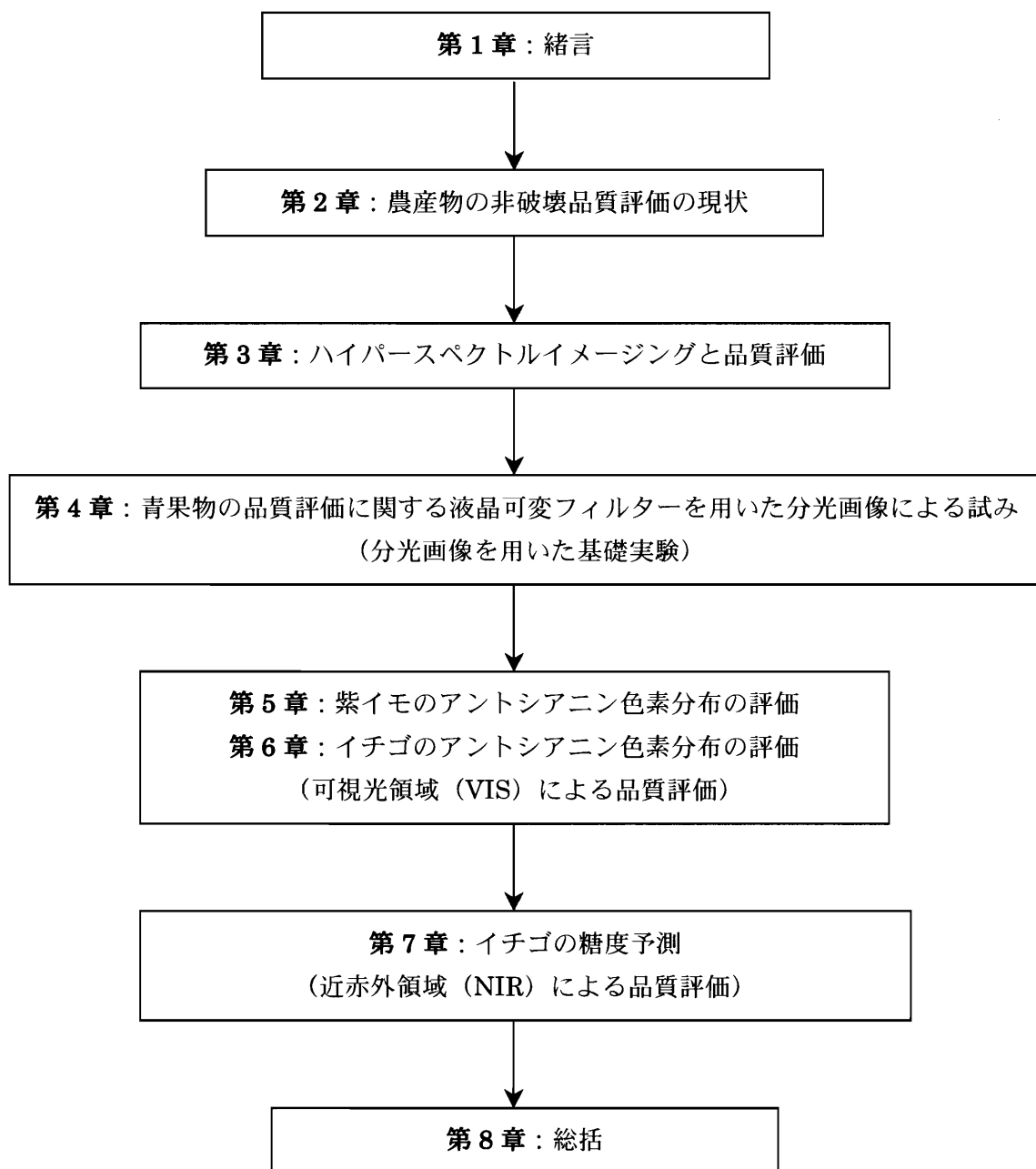
表 7-5 検量線の作成および評価結果 (3~6 分着色)

Table. 7-5. Result of parameters of calibration and prediction by wavelength models (30-60% Ripeness).

表 7-6 検量線の作成および評価結果 (7~10 分着色)

Table. 7-6. Result of parameters of calibration and prediction by wavelength models (70% -Fully Ripe).

「ハイパースペクトルイメージングによる青果物の
品質評価・検査に関する基礎的研究」
における論文の構成および流れ



第1章 緒言

第1節 研究背景

昨今の日本人の食生活は、「飽食の時代」から「趣食の時代」へと著しく変化してきた。これは、農産物に対する消費者の嗜好がこれまでの食糧の確保や価格面といった「量的」要因が、視覚・味覚・風味・フードテクスチャー・温度などの「質的」要因に変化したことを意味する。また、「食」に対する社会的動向を見ると、例えば、鳥インフルエンザ・残留農薬・BSE・偽装表示など安全・安心に関わる問題、さらには健康志向の高まり、とりわけ老化・発ガンの防止や身体の調節作用を助ける効果がある野菜成分の機能性などがクローズアップされ重要視されるようになった。

そこで、生産現場では従来の「量的生産」から「質的生产」に生産目標が変化しつつある。このことから、農産物の評価基準は、「安全・安心性、機能性」といった消費者ニーズに応えられるように、これまで以上に厳しく求められる。これに伴って、選果施設等の選別時における品質評価・検査もこれまで以上に厳密かつ高精度なものが求められるようになった^{1) 2) 3)}。

国内外における品質評価・検査の現状は、外部品質（形状、着色度等）、内部品質（糖度、酸度、空洞等）および一部の安全評価（異物混入、カビ検出、残留農薬）は⁴⁾、化学分析や官能試験に代わって、光学的手法、力学的手法などの物理的計測、すなわち、一個一個の青果物を非破壊計測する研究開発が進められてきた⁵⁾。実際にミカン、モモ、メロン、ナシなどの青果物においては、糖度や酸度の内部品質評価を近赤外分光法で非破壊的に行う光センサー（分光器）を用いた選果施設の建設や選果器具の開発が実施されてきた⁶⁾。しかし、現状の光センサー（分光器）を用いた装置では、果実の部分的な計測にとどまり、果実の広範囲な計測をすることは困難である^{7) 8) 9)}。

そこで、筆者の研究は、これまで以上に高精度な品質評価を目的に、従来の近赤外分光法に用いられる光センサー（分光器）を二次元的な画像に置き換え、広範囲な果実の情報が抽出できる計測法、すなわち、スペクトル情報と画像情報を融合したハイパースペクトルイメージング法を提案し、青果物の品質を評価・検査する目的で検討を行い、ハイパースペクトルイメージングの可能性を明らかにするものである。

第2節 研究目的

本研究は、食品に対する「安全・安心性、機能性」といった社会的問題、また高度化・多様化する消費者ニーズの要望に応えるため、ハイパースペクトルイメージング法を駆使した高精度な非破壊品質評価・検査の確立を目的とした。ハイパースペクトルイメージングによる品質検査・評価は作業者の目視検査と同様に視覚データから解析が出来ること、データが分光画像であることから目的とする成分と関係の強い任意の波長から特徴抽出が得られること、また、分光画像データを画素ごとに解析して、目的とする品質成分分布の可視化ができることなどの多くの特色を有する。

本研究の成果は、農産物に安全・安心の付加価値を与えるとともに、選果結果を栽培管理にフィードバックすることで生産技術の向上を図り、高品質な農産物を生産することができること、また、生産者から消費者まで信頼性が得られる農産物の流通システム化の導入ができることなど、食品産業関連分野の品質向上に大きく寄与するものと思われる。

第3節 構成と概要

本論文は、第2章以下、次の内容で構成した。

- 第2章 農産物の非破壊品質評価の現状
- 第3章 ハイパースペクトルイメージングと品質評価
- 第4章 青果物の品質評価に関する液晶可変フィルターを用いた分光画像による試み
- 第5章 紫イモのアントシアニン色素分布の評価
- 第6章 イチゴのアントシアニン色素分布の評価
- 第7章 イチゴの糖度予測の試み
- 第8章 総括

第2章では、農産物の非破壊計測の概念について述べ、その種類と特徴について詳述した。また、画像情報を用いた農産物の品質評価に特化し、様々な電磁波の画像情報における品質評価の現状について詳述した。

第3章では、農産物の品質評価としてのハイパースペクトルイメージングの適用性について、筆者らの研究内容に国内外の実例を加えて、画像計測システム、画像計測法、解析

方法について詳述した。

第4章では、ハイパースペクトルイメージングによる農産物の品質評価の基礎的資料を得るために、可視光領域(400-720nm)用の液晶可変フィルターとCCDカメラを用いて50nm間隔で取得した分光画像情報から、機能性色素との関連から青果物の表面色の特徴抽出、表面損傷部位の特徴抽出について検討した。

第5章では、機能性成分を有する農産物の品質評価として青果物の色素に着目し、可視光領域(450-600nm)のハイパースペクトルイメージングを用いてサツマイモ(紫イモ)断面から、アントシアニン色素分布の可視化およびその評価について検討した。

第6章では、熟度(着色度1~10分)の異なるイチゴを供試サンプルとして、可視光領域(450-600nm)のハイパースペクトルイメージングを用いて非破壊的に果皮表層から、アントシアニン色素分布の可視化およびその評価について検討した。

第7章では、イチゴ糖度の吸収帯が存在する近赤外領域のハイパースペクトルイメージングを用いた回帰分析で糖度の吸収帯を明らかにし、その吸収波長を第一波長としたイチゴ糖度測定用の検量線の開発について検討した。

第8章では、本研究の総括として、ハイパースペクトルイメージングによる青果物の品質予測についてまとめるとともに、今後の課題について記述した。

以上のように、本論文は、可視光領域から近赤外領域のハイパースペクトルイメージングを用いた高精度な青果物の品質評価および検査法の確立を目的に研究を遂行し、その成果をまとめたものである。

引用文献

- 1) 永田雅輝：農産物の品質判定・評価について，農業機械学会九州支部誌，51，59-64，2002
- 2) 中川勝也，河野澄夫 他：品質の評価要因，野菜園芸大百科 15 共通技術・先端技術-品質・鮮度，養液栽培，施設・資材，バイオテクノロジー-，農山漁村文化協会，35-40
- 3) 農林水産省：食料の安定供給システムの構築，平成14年度食料・農業・農村白書，2002
- 4) 永田雅輝：品質評価，新農業情報工学-21世紀のパーспекティブ-，農業情報学会編，養賢堂，134-135，2004
- 5) 河野澄夫編：食品の非破壊計測ハンドブック，サイエンスフォーラム，16-18

- 6) 尾崎幸洋：分光学への招待，産業図書，2-4，1997
- 7) 杉山純一：非破壊内部品質評価-近赤外イメージングの現状と展望-，2001年版農産物流通技術年報，農産流通技術研究会編，流通研究システムセンター，79-83，2001
- 8) 蔦瑞樹，杉山純一，相良泰行：ハイパ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-，映像情報メディア学会誌，56(12)，2037-2040，2002
- 9) 杉山純一，小川幸春：メロンの糖度分布の3次元可視化，日本食品工業学会誌，48(4)，263-267，2001

第2章 農産物の非破壊品質評価の現状

第1節 はじめに

農産物の非破壊品質評価に関する研究開発は、1940年代にアメリカで開発された果実の成熟度計以来多くの研究が行われてきた。わが国においても1970年代頃から研究が活発となった。研究当初は主に可視光を用いた農産物の表皮色の測定であったが、その後、赤外吸収、打音による振動など多くの研究開発が進められ、現在ではその有用性が認められ³⁾^{5) 6)}、一部の選果施設等では光センサー（分光器）などを用いた選果機が活躍している⁴⁾。非破壊品質評価の概念は、図2-1に示すように、測定対象物の外部から何らかのエネルギーを入力して、対象物の内部成分や形態により影響を受けたエネルギーを測定し、影響の度合いから対象物の内容、形質を評価する手法である。これらに使用されるエネルギーの形態は、光学的方法、力学的的方法、放射線的方法、および電磁気的方法に大別される^{1) 6)}。そこで、本章第2節では、エネルギー形態の違いによる、非破壊計測法の種類とその特徴について適用例を含めて詳述する。また、本研究で取り扱うハイパースペクトルイメージング法による品質評価は、分光画像をデータとして取り扱う。この他にも、画像情報を用いた研究開発は多種多様であることから、本章第3節では、各電磁波における画像情報からの品質評価についての適用例を含めて詳述する。

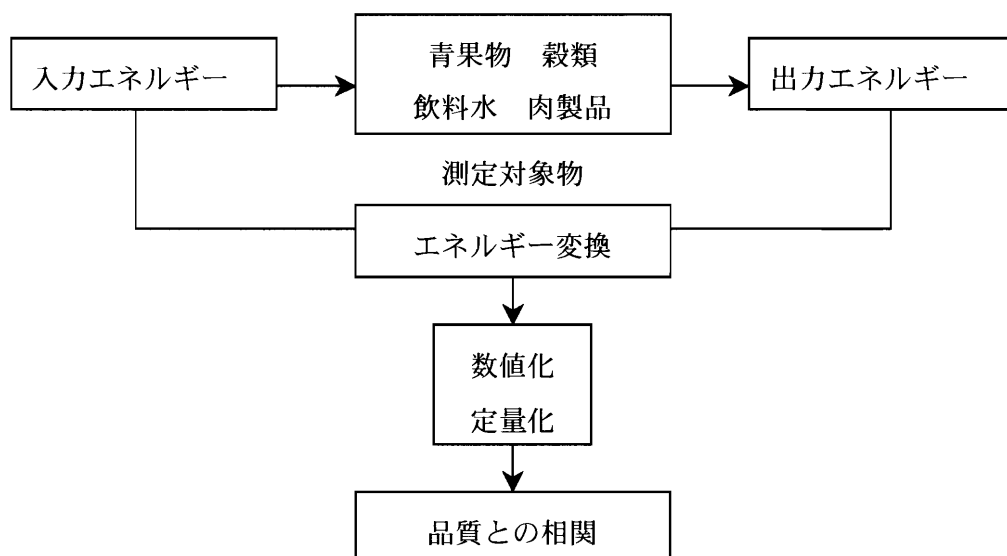


図2-1 非破壊法の概念^{1) 6)}

Fig.2-1. Concept of non-destruction method.

第2節 非破壊計測法の種類と特徴

非破壊による品質評価は、測定対象物に与える何らかのエネルギーの入力と出力との間に影響を受けた関係を調べることによって、品質特性を得ようとする手法である。これらに使われるエネルギーの種類を表 2-1 に示し^{3) 5) 6)}、その内容を以下に詳述する。

表 2-1 非破壊分析法のエネルギーによる分類¹⁰⁾

Table 2-1. Classification by energy of non-destruction method.

		[エネルギーなどによる分類]	[測定される品質]		
非破壊法	光学的方法	分光法	吸収	紫外分光法	成分分析
			可視分光法	[反射, 透過など]	色彩, 色素量, 表面・内部欠陥
			近赤外分光法 (NIRS)	[拡散反射など]	成分分析など
			赤外分光法	[透過, ATR法など]	成分分析
			光音響分光法 (PAS)	[可視~赤外]	成分分析, 熱的性質など
		発光	紫外誘起蛍光		蛍光物質の検出, 定量
			遅延光放散特性 (DLE)		クロロフィル, 低温障害の検出
			化学発光		油脂の酸化
		画像計測	可視		形状, 損傷の検出など
			赤外	[熱画像計測など]	温度分布
	レーザ計測	回折の利用	[フラウンホーファー回折など]	粉粒体の粒径など	
		散乱の利用		表面の欠陥, 異物の検出など	
		干渉の利用	[ホログラフィ干渉法など]	変位, 変形	
	電磁気的方法	その他	濁度測定		懸濁物の濃度
			屈折率測定		糖度など
			反射率測定		光沢, 表面粗さ
		磁気的性質	核磁気共鳴法 (NMR)	[MHz帯, CTなど]	プロトンなどの量, 存在状態
			電子スピン共鳴法 (ESR)	[GHz帯]	油脂の酸化など
		電気的性質	インピーダンス法	[DC~GHz帯]	水分量, 内部状態
			生体電気計測		熟度など
力学的的方法		動的的方法	振動励起法		硬さ, 粘弾性
			打音解析法		硬さ, 粘弾性
	超音波測定		パルス透過法	弾性	
		パルス反射法-[断層映像など]	内部欠陥, 組織構造など		
	静的的方法	クリープ		粘弾性	
応力緩和		粘弾性			
その他の方法	放射線	X線	[CTなど]	内部欠陥, 組織構造	
		γ線		組織構造	
		β線		水分, 密度	
		中性子線		水分	
	バイオセンサ		特定有機物質		
	ガスクロマトグラフィ		揮発性物質 (においなど)		

1. 光学的方法

光学的方法は、紫外光、可視光、近赤外光、赤外光などの光と対象物の相互作用によって生じる吸収や放射を利用する方法である^{3) 5) 6)}。物質に光が照射されると、物質を構成する原子、分子のエネルギー状態は、低いエネルギー（基底状態）状態から高いエネルギー状態（励起状態）へ遷移され吸収が生じる。励起状態から基底状態への逆の遷移では、吸収されたエネルギーに応じた光が放射される。このとき、吸収、放射される光の振動数（波長の逆数に比例する）は、原子や分子の種類、構造に関して非常に選択的であり、このため光の吸収スペクトルや放射スペクトルを物質の同定や定量に利用することができる。

(1) 紫外光の利用

紫外光を利用した非破壊計測は、紫外光を励起光として使い吸収物質のエネルギー状態を高め、基底状態に戻るときに生じる蛍光強度を定量する場合に用いられる。例えば、カンキツ類の油胞中に含まれる精油は、紫外光下で560nmにピークを有する強い蛍光を発することから、貯蔵中に腐敗の原因となる表皮損傷果の定量化に摘要できる⁷⁾。その他にも、微生物汚染卵の検出⁸⁾、ナッツのアフラトキシンの検出⁹⁾などの適用例がある。

(2) 可視光の利用

可視光を利用した非破壊計測は、可視光を励起光として物質の吸収と放射を定性・定量分析するもので、食品の色彩、損傷、内部状態の判定に用いられる。測定法としては、透過光スペクトル法、反射スペクトル法、遅延光放散法などがある。適用例として、一粒玄米の色彩・形状・胴割の選別装置³⁾、渋柿の判定装置¹⁰⁾、携帯型のパイナップル内部品質評価装置^{11) 12)}、青果物（ミカン、ナシ、モモ等）の色彩・傷の判定装置¹³⁾等の開発研究が行われ、実用化された技術は多い。

(3) 近赤外光の利用

近赤外光を利用した非破壊計測は、近赤外光を励起光として物質に含まれる各種成分のC-H、N-H、O-Hの原子団（官能基）による吸収現象を用いて、これらの反射率および透過率から、食品の内容成分および形質の判定に用いられる。この方法は、非破壊計測の中で最も進んだもので、水の構造解析¹⁴⁾などの基礎的な研究から、牛乳・乳製品¹⁵⁾・畜肉¹⁶⁾の成分分析、果実の糖度自動選別器の開発¹⁶⁾に至るまでその適用例は多岐に亘る。一例として表2-2に、近赤外吸収スペクトル法の対象品目と成分を示した。

表 2-2 近赤外吸収スペクトル法の対象品目と成分⁵⁾

Table. 2-2. Object and ingredients of NIR spectroscopy.

対 象 品 目	成 分
穀類および種子	
小麦	水分, たんぱく質, 炭水化物, アミノ酸
大豆	水分, 脂質, たんぱく質, 炭水化物
トウモロコシ	水分, 脂質
エン麦	水分, 脂質
ソルガム	水分
米	たんぱく質, 水分
コーヒー	カフェイン, 炭水化物, 脂質, 水分
ココア	水分, 脂質
クルミ	水分
ピーナッツ	水分
肉製品	
ひき肉	水分, 脂質
ベーコン・ハム等	水分, 脂質
シリアルフード	繊維量, 糖
飲料品	
ワイン	アルコール
チョコレートリカー	水分, 脂質
牛乳	水分, 脂質
青果物	
ジャガイモ	水分, たんぱく質, 炭水化物
ミカン・ナシ等	糖

(4) 赤外光の利用

赤外光を利用した非破壊計測は、赤外光を励起光として有機化合物の同定および定量分析に用いられる。測定方法は、吸収スペクトル（赤外分光法）や赤外放射を用いる方法がある。この領域は、分子構造に由来した特異的な吸収バンドが存在するため、スペクトル分析には重要な波長帯である。しかし、この波長帯での赤外吸収は強すぎるため、非破壊的に試料を扱うには困難が伴う。この欠点を補うために多重全反射法（ATR法）が採用され、残留農薬の測定¹⁷⁾などの適用例がある。また、赤外放射を用いた方法では、リンゴなど青果物障害の判定¹⁸⁾、有精卵と無精卵の判別¹⁹⁾などの適用例がある。

2.力学的方法

力学的方法は、音波や振動のエネルギーを用いて食品のテクスチャー、組織構造、粘弾性など、主に食品の力学的特性が関与する品質の評価法として使われる^{3) 5) 6)}。この方法には、超音波による方法、振動励起による方法、打音による方法などがある。

超音波による方法にはパルス反射法とパルス透過法がある。パルス透過法は、試料の一端に入力した超音波が他端に到達するまでの時間を測定し、超音波の伝播速度と力学的特性値間に相関を求めるもので、大豆の弾性率測定²⁰⁾、牛乳中の脂肪含量測定²¹⁾などの適用例がある。一方、パルス反射法は、対象物の一端に入力した超音波が対象物中を伝播するとき、密度差があればその境界で反射する性質を利用するもので、牛・豚などの皮下脂肪や筋肉脂肪の肉質測定²²⁾などの適用例がある。

振動励起による方法は、対象物を振動励起させたとき、対象物に生じる振動の振動数と振幅を観察し共振点を求めるもので、ゲル状食品、肉製品などの食品をはじめ、特に果実の成熟に伴って変化する果肉のテクスチャー測定²³⁾などの適用例がある。

打音による方法は、対象物を打撃したときの反響音を解析するもので、加速度計の代わりにマイクロフォンを用いて非接触での打音振動を測定することから、打撃の強度、位置などの影響を受けないなどの特徴を有する。この方法は、主に果実の硬度やテクスチャーなどの測定に用いられ、スイカの空洞検出³⁾、リンゴの硬度測定²⁴⁾、メロンの硬度測定²⁵⁾などの適用例がある。

3.放射線的方法

放射線的方法は、放射線（X線、 γ 線および β 線）の物質に対する透過率の違いを利用した方法で、主に青果物・加工食品の内部状態（空洞、欠陥など）の検出に使われる^{3) 5) 6)}。X線、 γ 線は、光学的方法と同様に反射、透過、吸収、散乱などの性質を持ち、非破

壊計測の観点からはこれらの透過性を利用するケースが多く、レタスの熟度（結球度）²⁶⁾、オレンジの凍結害検出²⁷⁾などの適用例がある。一方、 β 線は電子線であるため透過性が非常に小さく、透過係数の小さいものに限られ、卵殻の厚み測定装置²⁸⁾などの適用例がある。

4. 電磁気学的方法

電磁気学的方法は、対象物のもつ電磁気学的特性を利用したもので、インピーダンス、静電容量のほか、核磁気共鳴（NMR）や電子スピン共鳴（ESR）を利用した計測法が開発されている^{3) 5) 6)}。インピーダンスを用いた計測法として、キュウイフルーツの熟度測定²⁹⁾、魚肉の鮮度判定³⁰⁾、などの適用例が、静電容量を利用した計測法としてスイカの空洞・熟度の測定³⁾などの適用例がある。その他、NMRを用いた計測法としてミニトマトの登熟過程の水分布測定³¹⁾、3次元マイクロNMRを用いた計測法として登熟中のイネ穎果内水分分布の測定³²⁾などの適用例がある。

第3節 画像情報からの品質評価・検査

画像情報を用いた農産物の品質評価・検査の多くは、CCDカメラをセンサーとして用いて、対象物の最大径、最小径および表面積などの「階級選別」、果皮色、障害および形状（異形）などの「等級選別」といった外観品質評価、また、果実などの熟度と関係する、クロロフィル、カロチノイド、アントシアニンなどの色素量の変化といった一部の内部品質評価が行われてきた。主にこれらは、可視光領域でのRGB画像およびモノクロ画像計測として行われてきた^{33) 34) 35)}。しかしながら、多様な対象物および変化する環境下において、近年ではIT技術の発達や計測機器の高度化などから、可視光領域の画像情報からの品質評価にとどまらず、植物や農産物の分光反射特性をもとにして、近赤外領域、赤外領域および紫外領域はもちろんのこと、X線およびテラヘルツ波領域など幅広い電磁波の画像が利用されるようになった。図2-2に各種電磁波の種類を示し、その特徴と適用例を下記に詳述する^{2) 36)}。

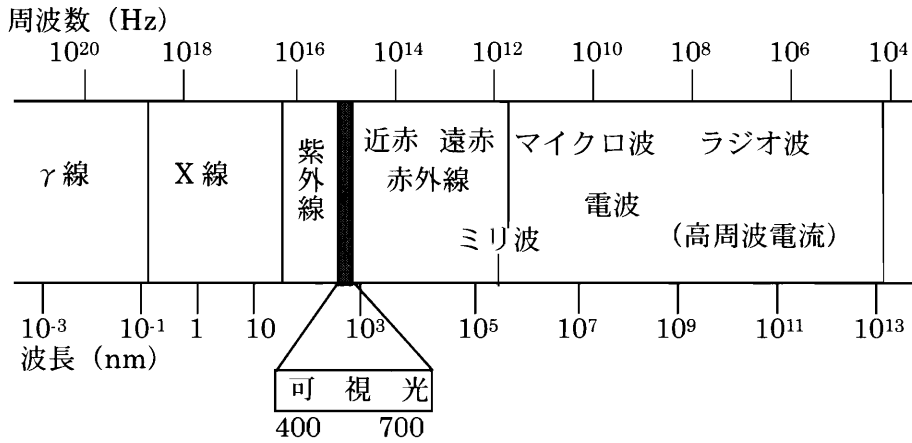


図 2-2 電磁波の種類^{2) 34)}

Fig.2-2. Kinds of an electromagnetic wave.

1. X線画像

X線は光と同じく反射，透過，吸収，散乱の性質を持つ^{6) 34) 35)}。X線では特に直進透過性が強いため，青果物の品質評価では軟X線透視画像による，内部性状評価・検査が試みられ，バレイショの空洞検出⁶⁾，スイカの空洞検出³⁷⁾，温州ミカンの内部損傷検出³⁸⁾，ナシ，モモ，リンゴの内部損傷³⁹⁾などの適用例がある。また，より鮮明に内部の構造等を評価する場合は，X線CTによる断層映像が有効であり⁴⁰⁾，青果物への適用例としては，ナシ，モモ，リンゴの内部損傷検出⁴¹⁾など一部の青果物において報告はあるが，装置が高価であるため，青果物の品質評価への導入・普及には難がある。

2. 紫外線画像

紫外線画像は，蛍光画像と紫外線画像に大別できる^{2) 34)}。蛍光画像は，紫外線を照射すると目に見える蛍光を発するカビ毒や柑橘果皮の画像を取得し分析する方法で，柑橘類の果皮損傷検出⁷⁾やトウモロコシ・ナッツ類のカビ検出（アフラトキシンの蛍光利用）⁹⁾などの適用例がある。紫外線画像は，紫外領域に感度および透過率を有するカメラおよびレンズを用いて，モノクロ画像を取得して解析する方法で，カビの検出（アフラトキシンの吸収利用）⁴²⁾などの適用例はあるが，その例は少ない。これは，ほとんどの青果物の部位において，紫外線領域での反射率が低いことが理由として上げられる。しかし，植物の花弁や肉類においては反射率が高いことから，その特徴を利用することで効率的な作業が可能になると，今後に期待される。

3. 近赤外線画像

近赤外線領域は、前述したように物質に含まれる各種成分の C-H, N-H, O-H の原子団（官能基）による吸収現象が生じる^{2) 34)}。このことを利用して、任意波長のバンドパスフィルターを取り付けた近赤外領域に感度を有するカメラと近赤外線照射器を用いて、青果物の近赤外画像を取得し解析する方法で、イチゴの内部および外部損傷部位検出⁴³⁾などの適用例がある。また、同領域は蛋白質、脂質、炭水化物、糖、水分などの内容成分に吸収帯があり、これらに由来される任意波長の画像を取得し解析することで、内容成分の分布状態などの評価が可能であり、メロンの糖度予測^{44) 45)}などの適用例がある。

4. 赤外線画像

物体は温度や放射率に応じた強さの赤外線を放射している^{2) 34)}。その赤外線を検知し、画像化することによって物体の温度分布の情報を得ることができる。農産物では、品質の差が表面温度の差として表れる場合に品質評価として適用できる。例えば、無精卵に比べ温度の高い有精卵の判別、果皮の正常部に比べ温度の低い表面傷の検出などに適用することができる。

5. テラヘルツ画像

テラヘルツ波帯 (Tz 波) は、波長に換算すると $1000\ \mu\text{m}\sim 30\ \mu\text{m}$ (遠赤外とミリ波の間) の領域を示す。この領域は、その発生および検出が困難とされ「未開拓電磁波領域」とされていたが、光源開発の進展により、さまざまな分野への応用研究が進むようになった。同領域は、透過性が強い特徴を有している。X線には及ばないが、X線で懸念されるような被爆を意識することなく、多少性能を犠牲にしても人体に安全な代替技術としての要望が強い。また、電磁波では困難なレンズによる集光やミラーによる反射が可能なことから光波としての取り扱いが簡便である。これらの特徴を利用して、農産物への応用研究も以下のように示唆されている。同領域は、いくつかの農薬やビタミンなどにおいて固有の吸収スペクトルを有していることが判明したことから、これらの品質評価に期待される。また、可視光などに比べ波長が長いため生体の細胞レベルの構造による散乱の影響を受けることが少ないと同時に、水に対しての感度が高いため、農産物の水分計測などの期待も示唆されている^{36) 46)}。

引用文献

- 1) 中川勝也, 河野澄夫 他: 品質の評価要因, 野菜園芸大百科 15 共通技術・先端技術-品質・鮮度, 養液栽培, 施設・資材, バイオテクノロジー-, 農山漁村文化協会, 35-40, 57-62
- 2) 永田雅輝: 品質評価, 新農業情報工学-21世紀のパーспекティブ-, 農業情報学会編, 養賢堂, 134-135, 2004
- 3) 河野澄夫編: 食品の非破壊計測ハンドブック, サイエンスフォーラム, 16-18, 2004
- 4) 尾崎幸洋: 分光光学への招待, 産業図書, 2-4, 1997
- 5) 河野澄夫: 食品品質の非破壊評価法, 食品分析法, 日本食品工業学会, 食品分析法編集委員会編, 光琳, 823-854, 1982
- 6) 岩本睦夫, 河野澄夫, 魚住純: 近赤外分光法入門, 幸書房, 12-37, 2002
- 7) 魚住純, 河野澄夫, 岩本睦夫, 西成勝好: 日食工誌, 34, 163, 1987
- 8) Karl H. Norris: Automatic Detection of “Green-Rot” in Shell Eggs, IRE Transactions on Industrial Electronics, 2, 57-60, 1995
- 9) W. F. McClure and A. Farsaie: Dual-Wavelength Fiber Optic Photometer Measures Fluorescence of Aflatoxin Contaminated Pistachio Nuts, Transaction of the ASAE, 23 (1), 204-207, 1980
- 10) 秋元浩一, 黒田佐俊: カキ果実(富有)の品質に関する要因分析と品質保証, 農業機械学会誌, 44, 347-354, 1982
- 11) 大森定夫, 平田晃: 光透過法による可搬型内部品質判定装置の開発, 第52回農業機械学会年次大会公演要旨, 423, 1993
- 12) 平田晃, 中元陽一: 光透過法による可搬型内部品質判定装置の開発(第2報), 第53回農業機械学会年次大会公演要旨, 213, 1994
- 13) 前田弘: 青果物の選別包装施設におけるメカトロニクス化に関する研究, 118-153, 1997
- 14) M. Tanaka et al.: Discrimination of commercial natural mineral waters using near-infrared spectroscopy and principal component analysis, J. Near Infrared Spectroscopy., 3, 203-210, 1995
- 15) 佐藤哲生: 牛乳・乳製品の水分・栄養素成分, 食品品質成分の分析・測定技術による食品の品質評価法の開発に関する研究, 農林水産技術事務局研究成果 256, 18, 1991

- 16) Mitsumoto, M., et al. : Near Infrared Spectroscopy determination of physical and chemical characteristics in beef cuts, *Food Sci.*, 56, 1493-1496, 1991
- 17) 石澤広明：全反射減衰赤外分光法によるハクサイ残留殺虫剤の非破壊計測, *農業機械学会誌*, 62 (2), 106-114, 2000
- 18) 河野澄夫：食品の非破壊計測技術の現状と展望, *非破壊検査*, 47 (11), 784-791, 1998
- 19) A. Danno, M. Miyazato, E. Ishiguro, *ibid.*, 15, 148, 1979
- 20) 法貴誠, 伊藤信孝：*農業機械学会誌*, 36, 555, 1975
- 21) J. W. Fitzgerald, G. R. Ringo, W. C. Winder, Publication M-58, The 56th Annual Meeting of the American Dairy Science Association, 1961
- 22) Ozutsumi, K. and Okada M. : On the development of longissimus muscle in Holstein steers during the fattening period aftergrazing, *Jpn. J. Zootech.*, 53, 116, 1982
- 23) E. E. Finney, *J. Text. Studies*, 2, 62, 1971
- 24) Yamamoto H et al. : Acoustic Impulse Response Method for Measuring Natural Frequency of Intact Fruits and Preliminary Applications to Internal Quality Evaluation of Apples and Watermelons, *J. Texture Stud.*, 11 (2), 117, 1980
- 25) 杉山純一 他：打音によるマスクメロンの非破壊品質評価, *日本自動制御学会論文集*, 26 (6), 367-374, 1990
- 26) Garrett, R.E. and Talley, W.K : *Trans. ASAE*, 13, 820, 1990
- 27) Anonymous : *Citrograph*, 64, 77, 1979
- 28) James, P. E. and Retzer, H. J : *Poultry Sci.*, 46, 1200, 1967
- 29) 杉山純一 他：キュウイフルーツのインピーダンス特性, *日本食品工業学会誌*, 34 (11), 725-730, 1987
- 30) 加藤宏郎 他：インピーダンス特性による魚肉の鮮度判定, *農業機械学会誌*, 62 (5), 59-69, 2000
- 31) Ishida N et al.: Ontogenetic changes in water in cherry tomato fruits ,easured by nuclear magnetic resonance imaging, *Hort.*, 57, 335, 1994
- 32) Horigane A K et al.: Differences in hollow volumes in cooked rice grains with various amylose contents as determined by NMR micro imaging, *J.Food Sci.*, 65, 408, 2000
- 33) 佐竹隆顕, 中島教博, 大森定夫：青果物流通施設の研究・技術動向, *農業施設*, 34 (4), 293-300, 2004

- 34) 加藤宏郎：1995年版非破壊内部品質評価，農産物流通技術年報，農産流通技術研究会編，流通研究システムセンター，69-77，1995
- 35) 大森定夫：1996年版非破壊内部品質評価，農産物流通技術年報，農産流通技術研究会編，流通研究システムセンター，69-75，1996
- 36) 近藤直，門田充司，野口伸：マシンビジョンシステム，農業ロボット（I）-基礎と理論-，コロナ社，11-80，2004
- 37) 本間秀明：X線を利用したスイカの空洞検査装置，食品における非破壊検査システムの現状と展望，流通システム研究センター，105-109，1989
- 38) 鷹尾広之進，大森定夫：カンキツの品質選果装置の開発，カンキツ栽培用機械緊急開発事業受託研究報告書，生研機構，29-43，1990
- 39) 小川雄一，近藤直，澁澤栄：軟X線を用いた透過画像による果実の内部品質評価，農業機械学会誌，67（3），114-121，2005
- 40) 瀬尾康久：X線CTスキャンによる青果物の非破壊検査-非破壊検査を理解するために-，農業機械学会関東支部，43-48，1987
- 41) 小川雄一，近藤直，澁澤栄：X線CTによる果実の内部品質評価，植物環境工学17（2），75-83，2005
- 42) 安藤・渡辺・伊藤：家畜疾病の研究における紫外線の利用，第4回非破壊生体シンポジウム公演要旨，17-20，1990
- 43) Nagata M, Bim P. Shrestha, Gejima Y.: Study on image processing for quality estimation of strawberries (Part 2) –Detection of bruises on fruit by NIR image processing- , J SHITA, 14(1), 1-9,2002
- 44) 杉山純一，小川幸春：メロンの糖度分布の3次元可視化，日本食品工業学会誌，48（4），263-267，2001
- 45) Sugiyama J : Visualization of Sugar Content in the Flesh of a Melon by Near- Infrared Imaging, Journal of Agricultural and Food Chemistry, 47(7), 2715-2718, 1999
- 46) 川瀬晃道：テラヘルツ，新農業情報工学-21世紀のパーспекティブ-，農業情報学会編，養賢堂，150-151，2004

第3章 ハイパースペクトルイメージングと品質評価

第1節 ハイパースペクトルイメージング

植物や農産物はそれぞれの水分や栄養状態さらには部位により固有の波長依存性をもっている。このことは、分光器などで反射・透過分光スペクトルを見ると明らかである¹⁾²⁾。しかし、分光器を用いた計測では特定部位でのスペクトル情報であり、対象物全体の計測とはなっていない。また、画像情報を得るために通常の CCD カメラを用いた計測では、波長分解能が低いため、精細なスペクトル情報を得ることができない³⁾。

しかしながら近年では、IT 技術の発達や計測機器の高度化などから、スペクトル情報と画像情報を同時に満たす「ハイパースペクトルイメージング」の計測法が確立された。これは図 3-1 に示すように、ある平面領域における光強度の測定、すなわち、分光画像を連続的に測定するものである。このようにして得られた全データをスペクトラム・ボリュームと呼ぶ。ハイパースペクトルイメージングでは、CCD カメラから取得した画像の各画素を受光部として取り扱うことで、二次元的、三次元的に対象物全体からの評価が可能となる。また、画素ごとに品質成分の定量解析を行うことで、目的とする成分分布状態を可視化できる大きなメリットがある⁴⁾。農業生産物の範疇における本計測法の発展は、米国では 1990 年代後半頃から Chi Thai⁵⁾ Renfu Lu⁶⁾ B. park らにより進められてきた。我が国では杉山⁷⁾、蔦⁸⁾⁹⁾ らによるメロンの糖度分布評価が行われ、その後、永田らによって本計測法を用いた研究が活発化してきている¹⁰⁾¹¹⁾。

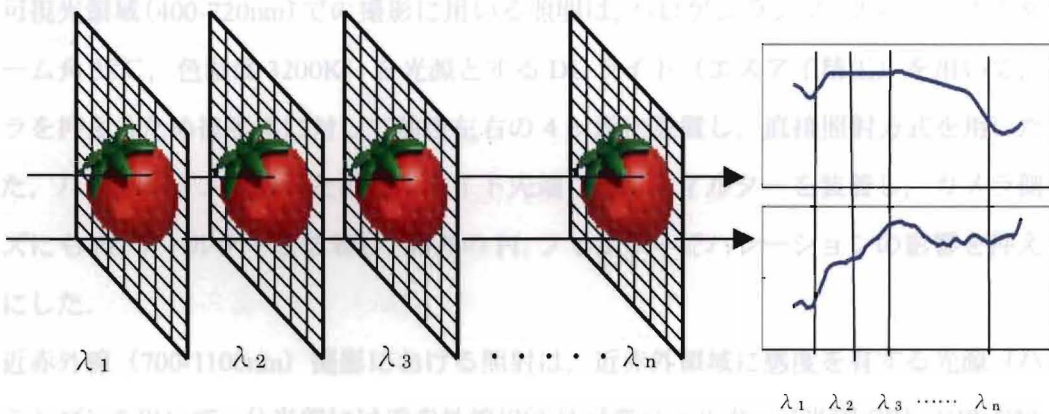


図 3-1 スペクトラム・ボリューム¹¹⁾

Fig.3-1. Spectral volume.

第2節 画像計測システム

ハイパースペクトルイメージングによる画像計測では、光量ムラを生じないようなライティング技術、画像処理技術が必要である。そのために、対象物のコントラストを独立させ、安定した状態で撮影できるように特化した照明システムが要求される。ライティング技術で重要なポイントは照射した物体から得られる正しい反射光あるいは透過光の濃淡差の確保、すなわち高品質な画像情報を得ることである¹²⁾。そこで、筆者らの画像撮影装置を例に、撮影器具、撮影条件等について以下に述べる。

図3-2は、その画像撮影装置である。本装置は可視光(400-720nm)用に構築した反射光型である。装置は、外乱光の影響(昼や夜、天候などに影響されないこと)や照明の方向(反射、影および照射ムラがないこと)の影響を受けないように構築することが重要である。

撮影器具は、高感度冷却CCDカメラ(米国 Apogee, AP2E)、レンズ(NIKKOR, 1:1.4, f=50)、液晶可変フィルター(米国 CRI, VS-150-10-HC-20, NIR-C20-EX)から成る。通常のCCDカメラは8bit(256階調)であるが、本装置の冷却CCDカメラは、1,572,864画素、14bit(16384階調)の高い階調値を持っており、波長域は320~1100nmの感度領域を有する。分光に用いるフィルター(液晶可変フィルター)は、カメラレンズ前部に装着する。本フィルターは、偏光子と液晶セルを積層することで構成されて、印加電圧を可変することにより任意の波長成分の光のみを通過させるものである。したがって、任意間隔の波長(最小1nm間隔)で測定対象物の連続スペクトル画像の取得が可能となり、ハイパースペクトルカメラとしての機能を備えるものである¹³⁾。

可視光領域(400-720nm)での撮影に用いる照明は、ハロゲンランプ(フィリップス 50W, ビーム角38°, 色温度3200K)を光源とするDLライト(エスアイ精工)を用いて、照射ムラを押えるため被写体に対して前後左右の4ヶ所に設置し、直接照射方式を用いた¹⁾。また、ハレーション除去のために、ライト先端にPLフィルターを装着し、カメラ側のレンズにもPLフィルターを装着し、両者のPLフィルターでハレーションの影響を押えるようにした。

近赤外線(700-1100nm)撮影における照射は、近赤外領域に感度を有する光源(ハロゲンランプ)を用いて、分光部には近赤外線用液晶可変フィルター(米国 CRI, NIR-C20-EX)を用いて撮影するようにした。

撮影装置は、外乱光の影響を除去するために、装置全体をブラックボードおよび暗幕で

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が対象物に影響を及ぼすことが考えられるので⁴⁾、撮影ボックスの側面および上面へファンモータを取り付けて排熱を行い、撮影装置内温度を 22℃ になるように設定した。また、実験室内の温度は 20℃ に設定した。顕微鏡や X 線蛍光顕微鏡撮影条件となるカメラ高さ（撮影距離）、ライト高さと照射角度、カメラ露光時間と絞り等は、対象物の形状・大きさや特性（光沢等）および液晶可変フィルターの感度によって、最適な条件に設定する必要がある。

以上、筆者らの研究室における反射光型装置を例に述べた。透過光型・半透過光型の撮影装置においても基本的な構成は同じであり、被写体に応じて光源の選定、照射の方法、分光部感度（波長レンジ）を変更することで対応できる。

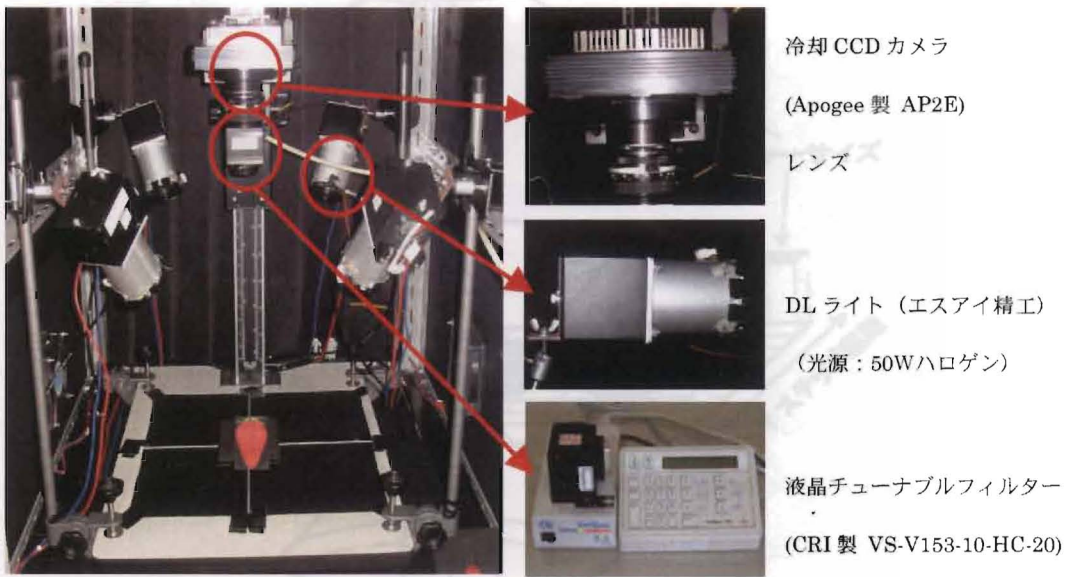


図 3-2 分光画像撮影装置（可視光用反射光型装置）

Fig.3-2. The visible range spectral imaging set-up.

本装置のような液晶可変フィルターを用いたイメージングシステム以外にも、分光手法による分類として、バンドパスフィルター、グレーティング・プリズム、AOTF、FFT（高速フーリエ変換）法などがある。また、画像取得方法による分類では、XY 走査（Point to Point）、ライン走査（Line to Image）がある。参考としていくつかの実例を以下に掲げる⁴⁾。

1) XY 走査によるイメージングシステム

XY 走査によるイメージングシステムを図 3-3 に示す。本システムでは、分光された光が1画素に相当するアパーチャーサイズで試料を透過し単素子検出器に導かれ、試料をXY方向に走査することにより、1画像分のデータを取得する。共焦点顕微鏡やX線蛍光顕微鏡でよく使われている。

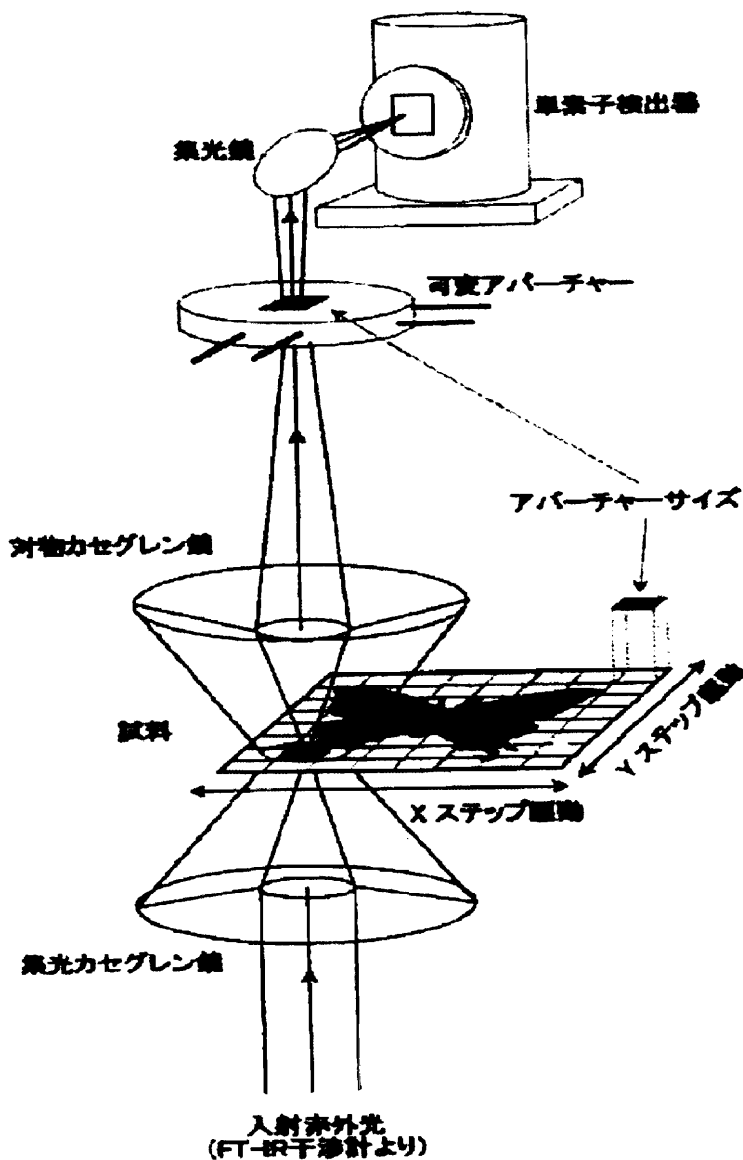


図 3-3 XY 走査によるイメージングシステム 4)

Fig.3-3. Imaging system by X-Y scan.

2) バンドパスフィルターを用いたイメージングシステム

バンドパスフィルターを用いたイメージングシステムを図 3-4 に示す。近年のデジタルビデオカメラで採用されている 3CCD カメラの場合、カラー画像構成に必要な RGB の 3 枚のフィルター画像を取得するためにプリズムで光路を 3 方向に分岐し、それぞれの分岐した部分に RGB のフィルターをいれて 3 つの CCD で画像検出している。このフィルターを所望のバンドパスフィルターに変えれば 3 波長の画像が一度に取得可能となり、マルチスペクトルの機能を有しているといえる。

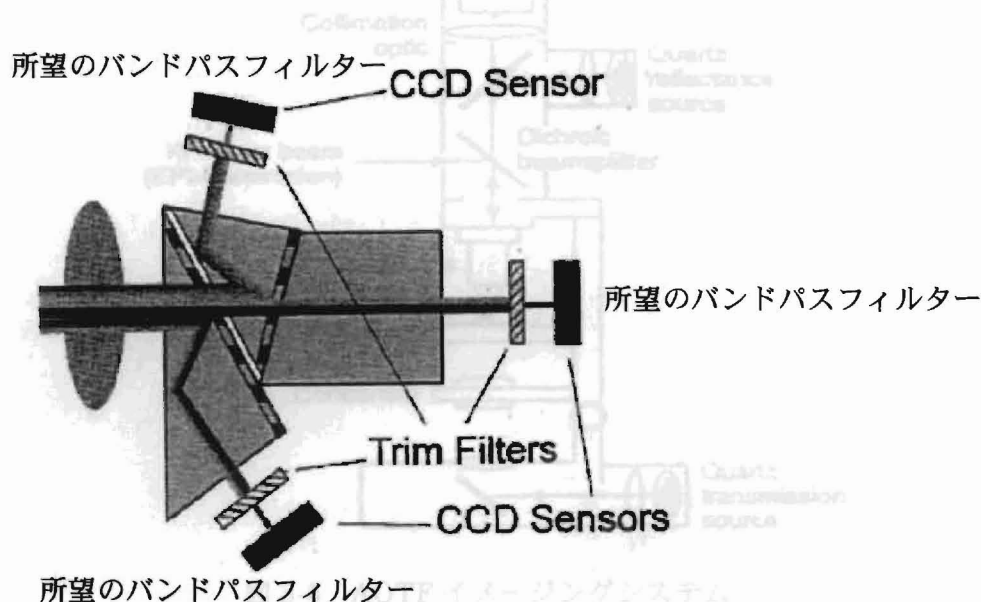


図 3-4 バンドパスフィルターを用いたイメージングシステム⁴⁾

Fig.3-4. Imaging system with bandpassfilter.

3) AOTF によるイメージングシステム

AOTF によるイメージングシステムを図 3-5 に示す。AOTF (Acoustic Optical Tunable Filter) は、音響光学素子の一種で、図 3-6 に示すように超音波を光学結晶に印加することにより、その超音波がグレーティングのような役割を果たし、交差方向から入射する光を分光するものである。

前述したように、著者らが採用している分光方式は、液晶可変フィルターを用いている。これは、液晶の配向を工夫することにより波長可変のバンドパスフィルターを構成するもので、AOTF と類似した分光方式であるといえる。

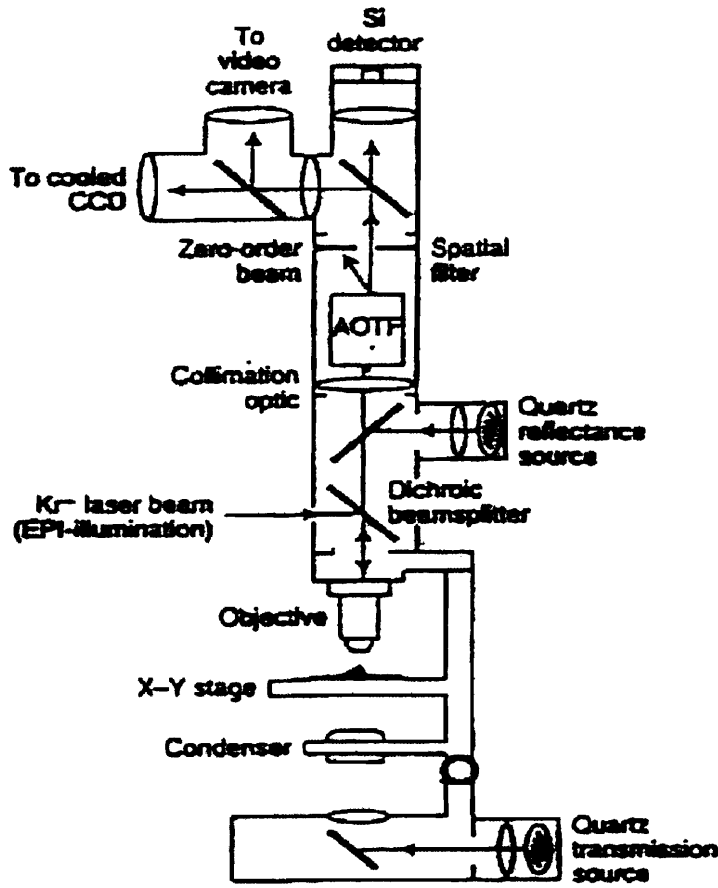


図 3-5 AOTF イメージングシステム ⁴⁾

Fig.3-5. AOTF imaging system.

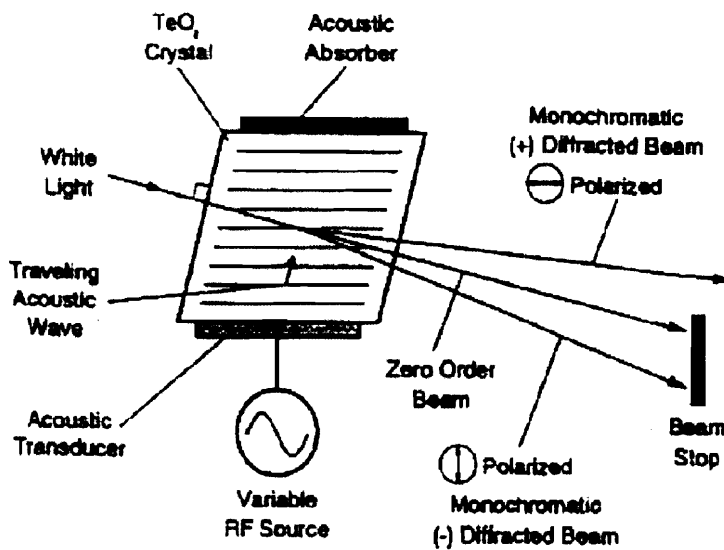


図 3-6 AOTF の原理 ⁴⁾

Fig.3-6. A principle of AOTF.

4) ライン走査によるイメージングシステム

ライン走査によるイメージングシステムを図3-7に示す。本システムでは、分光にグレーティング（回折格子）を適用している。グレーティングの場合は、スリットを通すので、空間情報は1次元（ライン、Y方向）に限定されてしまうが、2次元の画像情報を測定するために機械的にX方向に走査することで、イメージングを実現できる。また、同様に図3-8に示すように、プリズムで分光するライン走査のイメージングシステムもある。

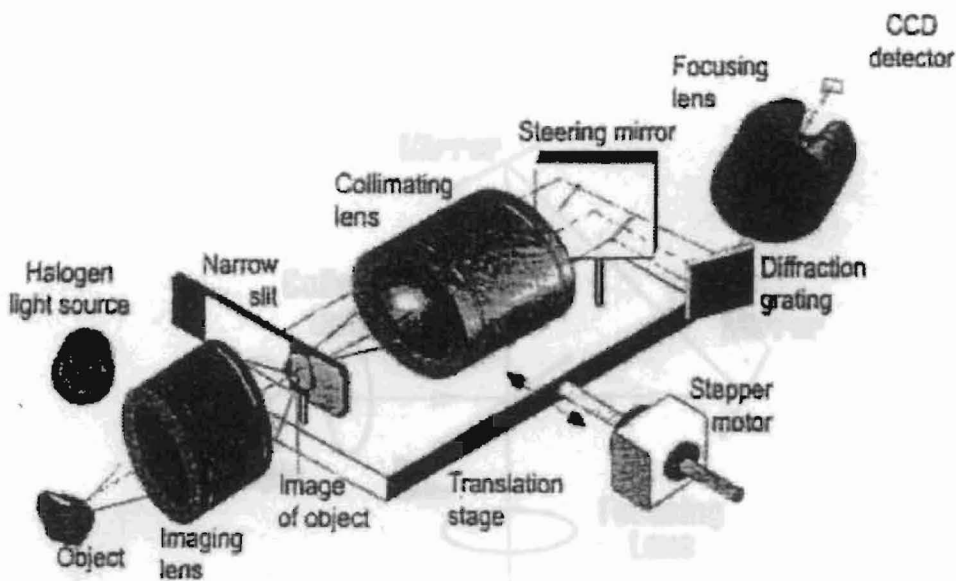


図3-7 グレーティングとライン走査⁴⁾

Fig.3-7. A gratings and line scanning.

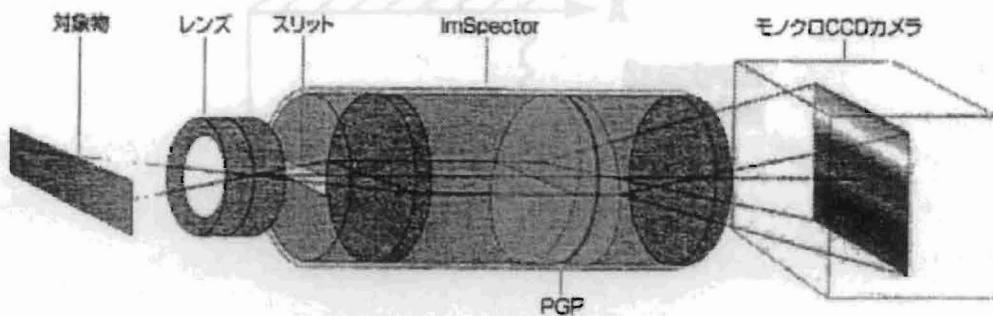


図3-8 プリズムとライン走査⁴⁾

Fig.3-8. A prism and line scanning.

5) FFT 法によるイメージングシステム

FFT 法（高速フーリエ変換）によるイメージングシステムを図 3-9 に示す。本システムでは、試料からの光がビームスプリッタ（半透鏡）により2つの光束に分けられ、平面鏡により光路差の異なった光束がビームスプリッタで干渉を起こしてインターフェログラムとして計測される。このインターフェログラムを CCD 素子にて一度に画像として記録する。測定後、コンピュータで画素ごとに FFT を施すことにより分光画像が得られる。計測時間が短いことが特徴である。また、図では試料からの光を分光しているが、試料に照射する前の光源段階で分光する方式のシステムもある。

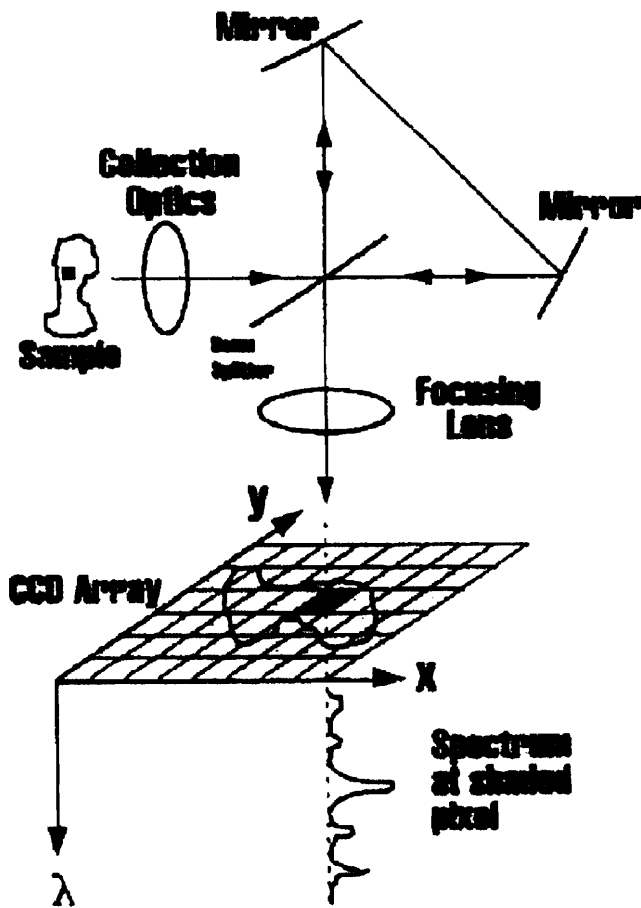


図 3-9 FFT イメージングシステム⁴⁾

Fig.3-9. FFT imaging system.

第3節 画像計測法

ハイパースペクトルイメージングによる画像取得は、反射光型と透過光型に分類される。さらに透過光型は測定対象物の形状、大きさなどの違いによって、全透過光型と半透過光型とに二分される¹⁵⁾。以下に各計測法の特徴を述べる。

1. 反射光型

反射光型の投受光と測定部位の概要を図3-10に示す。反射光型は、投光した光量に対して、受光できる光量の割合すなわち反射率が計測される。反射光から得られる情報は果皮近傍の果肉部位である。

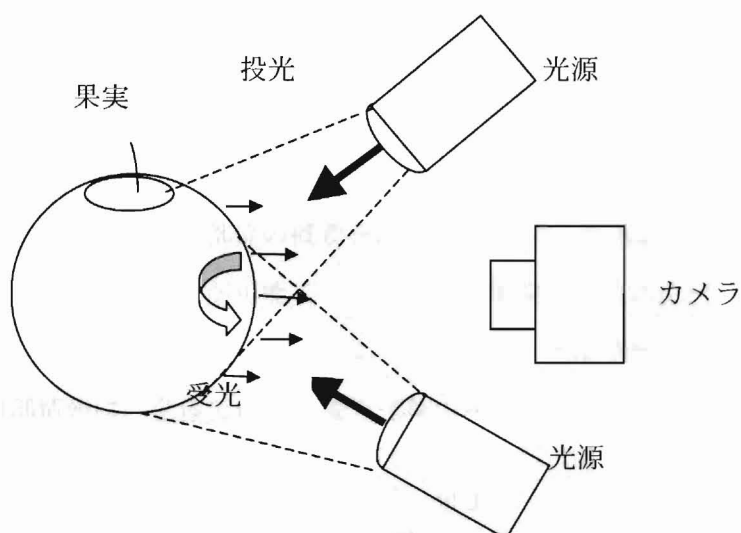


図3-10 反射照明の測定部位¹¹⁾

Fig.3-10. A measurement part of reflective lighting.

2. 透過光型

透過光型は青果物の内部を通過した光を計測することから、反射光型では得られない果肉内部の障害やリンゴの蜜などの内部品質における情報を得ることができる特徴がある。スイカやメロン等のように果皮が厚く光が通りにくい青果物に適用するのは困難であるため、全透過光型と半透過光型の2方式がある。青果物の形状、大きさおよび種類によって透過する光量が大きく異なるため、ダイナミックレンジの大きな信号処理系が必要となる。

1) 全透過光型の場合

全透過光型の投受光と測定部位の概要を図3-11に示す。全透過光型は、投光部と受光部

が対向配置されているため、測定部位は果実内部となることが特徴である。しかし、適用できる青果物はミカンなどの光の通りやすいものに限定される。

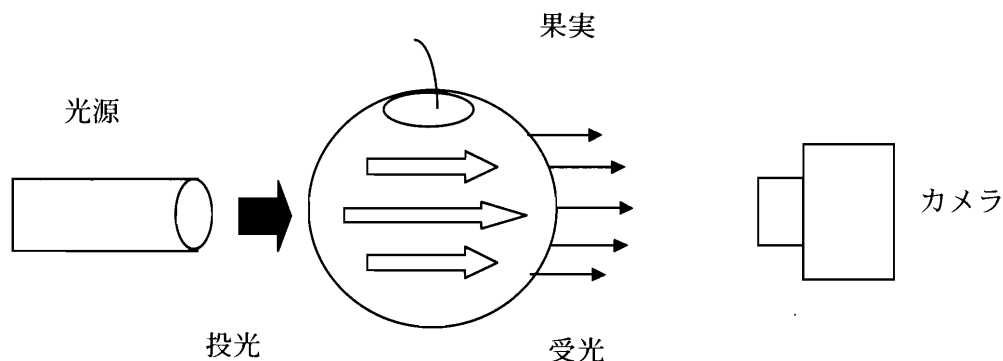


図 3-11 全透過照明の測定部位¹¹⁾

Fig.3-11. A measurement part of transmitted lighting of all.

2) 半透過光型の場合

半透過光型の投受光と測定部位の概要を図 3-12 に示す。半透過光型は、メロンやスイカ等の果皮の厚い青果物の測定が可能である。光源を果実の赤道部位付近の複数箇所から照射して、光源が直接カメラへ入射しないように遮光し、内部情報を得る。この方式で得られる果実の内部情報は、全体ではなく受光部側の半分である。

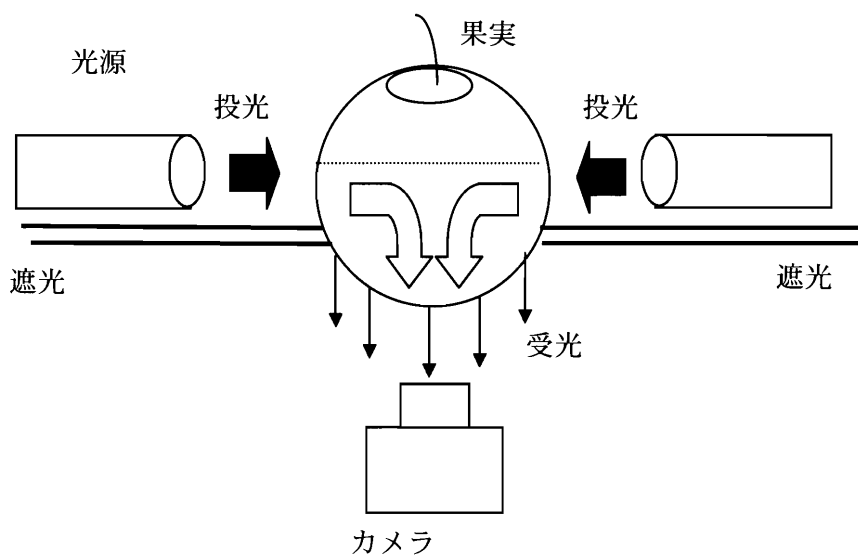


図 3-12 半透過照明の測定部位¹¹⁾

Fig.3-12. A measurement part of transmitted lighting of half.

第4節 解析方法

上述した、画像計測システムおよび方法で取得したデータ（分光画像）は輝度値で示されている。しかし、取得したままの分光画像には、CCDの暗電流ノイズ、バイアス電圧、各画素の感度ムラ、照明に起因する光量ムラが含まれるため¹⁶⁾、これらを補正する画像処理が必要である。また、定量解析のための検量線を作成するには、近赤外分光法の定義に従って、輝度値で表現された各画素を対数変換により吸光度に換算する必要がある⁴⁾。その吸光度を用いた検量線の作成には、重回帰分析をはじめ、PLS (Partial Least Squares) 解析等の多変量回帰分析が利用されている。以下に、画像処理^{16) 17)} および検量線^{17) 18) 19) 20)} について述べる。

1.画像処理

1) ダークフレームの引き算

取得した分光画像には、暗電流ノイズ、バイアス、読み出しノイズが含まれる。これらのノイズ成分を補正して取り除くのは重要である。そこで、分光画像撮影時と同じ温度、かつ同じ露出時間で、CCDにまったく光が当たらないようにして撮影した「ダークフレーム」を分光画像から引き算することにより、ノイズ成分を取り除く。

2) フラットフィールドの割り算

取得した分光画像には、CCD各画素の感度ムラ、光学系が原因で起こる光量ムラが含まれる。これらの補正は「ダークフレーム」による補正と共に必ず必要である。そこで、分光画像撮影時と全く同じ状態のまま、標準白色板の光学的に均一な面を撮影した「フラットフィールド」で分光画像を割り算することにより、ムラの補正を行う。

3) 補正画像への変換

上述した1) 2)により、ノイズ除去およびムラ補正を行い、輝度値画像の再変換は以下の式で行っている。

$$I_{norm(x,y)} = \frac{I_{sample(x,y)} - I_{dark(x,y)}}{I_{reference(x,y)} - I_{dark(x,y)}} \cdot m \quad (3-1)$$

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）の輝度値である。また、 m はフラットフィールド全体の平均値で、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。

3) 吸光度への変換

(3-1) 式によって得られた補正画像は、各画素が撮影カメラの階調値（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定義に従い、(3-2)式によって吸光度値 A へ変換する。

$$A_{(x,y)} = \log(I_{s(x,y)} / I_{(x,y)}) = \log(1 / I_{norm(x,y)}) \quad (3-2)$$

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. 検量線の作成

検量線の作成は、式 3-3 に示す線形回帰式を仮定している。切片 b_0 と回帰係数 b_k を特定波長の吸光度を使って算出するのが重回帰分析で、 x_k と y の関数で表される潜在因子スコアをもとに算出するのが PLS 回帰分析である。

$$y = b_0 + \sum_{k=1}^A b_k x_k + f \quad (3-3)$$

1) 重回帰分析

重回帰分析は、近赤外分光法において最も多く利用されている多変量解析法である。目的変数として対象成分値（化学分析値）を、説明変数としてスペクトルを用いる。目的変数を C 、特定波長の吸光度を $\log(1/R)$ とすると式 3-4 のように表すことができる。

$$C = K_0 + K_1 \log(1/R_1) + K_2 \log(1/R_2) \cdots K_n \log(1/R_n) \quad (3-4)$$

ここで $K_0, K_1, K_2 \cdots K_n$ は重回帰係数である。 $\log(1/R_x)$ は特定波長における吸光度を表す。また、スペクトルに微分処理などの前処理を施す場合には、吸光度ではなく処理後の値（吸光度 1 次微分値、吸光度 2 次微分値など）を用いる。変数（波長）の選択には、全可能回

帰法、変数増加法、変数減少法、変数増減法、および変数減増法があり、全可能回帰法、変数増加法および変数減少法が有効であり、利用する機会が多い。ただし、重回帰分析を利用する場合、スペクトルデータの各波長間の相関が高いため、重回帰式に選択された波長間に高い相関が存在すると誤差が大きくなり、測定精度を低下させる危険性が生じる。この現象を多重共線性と呼ぶ。また、重回帰式の説明変数の数を増やしていくと、検量線作成試料に検量線が過剰に適合して、それ以外の試料では大きな誤差を生じる、オーバーフィッティングの現象が見られる。そこで、波長を選択する際には、目的変数および特性と関連した分子構造（官能基）に帰属される吸収帯を意図的に説明変数として選択しておく必要がある。

2) PLS 回帰分析

PLS (Partial Least Squares) 回帰分析は、1960年にH. Woldにより開発された解析法である。通常の回帰分析では、誤差の存在は説明変数の中のみ仮定するが、PLS回帰分析は、説明変数と目的変数の両方に誤差を仮定して回帰モデルの作成を行う。PLS回帰分析においては、目的変数に化学分析値を用い、説明変数にスペクトルから変換した存在的因子を用いる。説明変数となる因子は、目的変数に含まれる存在的因子を用いて、スペクトルデータに含まれる情報を互いに相関の低い合成変数に集約し、これを抽出因子として用いる。これによりスペクトルのもつ多重共線性の危険性が減少する。

n番目の因子抽出は、(n-1)番目の因子を抽出する時の分散を用いて行われ、因子数が増える程、分散に含まれる有用な因子が抽出されてゆく。従ってオーバーフィッティングの危険性が低く、説明変数を安定して増やすことが可能となる。また、はじめに抽出される因子ほど、回帰計算に及ぼす寄与率（因子負荷量）が大きく、後に抽出される因子ほど寄与率は小さい。

最適な因子数の決定には、クロスバリデーションを用いる。まず、①検量線作成試料を複数のグループに分け、②一つのグループを除いてPLS計算を行う。③除いたグループを未知試料として、作成した回帰モデルで予測を行い、予測値と実測値の残差の標準偏差（SEP）を算出する。④全試料が未知試料として扱われるまで②と③を繰り返す。因子数が増加するに伴ってSEPは減少するので、nを最適因子とする。ただし、クロスバリデーションにより指定されて最適因子数よりも多い因子数を用いても、必ずしも未知試料の測定精度が減少するわけではない。A個の存在因子を持つPLS回帰分析の検量線は以下のよう示される。

$$X_p = \sum_{a=1}^A t_a \times b_{ap} + e_p \quad (3-5)$$

$$Y_p = \bar{y} + \sum_{a=1}^A b_a \times c_a \times t_a \quad (3-6)$$

ここで、 X_p は (A+1) 個の検量モデルにおいて使用される説明変数で、 Y は検量モデルにより計算される目的変数である。 t_a は検量線評価用試料によって計算された X の存在因子 (X-score)、 b_{ap} は負荷ベクトル (loading)、 e_p は残差、 b_a は Y の存在因子 (Y-score)、および c_a は X と Y の存在因子の相関家数である。存在因子に関する情報は、負荷量ベクトル b_{ap} に反映される。従って、負荷量ベクトル上で多くの重みが存在する波長帯に関連する性質について検討すれば、存在因子の帰属を推定することができる。

3.検量線の評価

検量線作成用試料以外の試料で検量線作成用試料と成分分布の類似した試料を用いて、作成された重回帰式の測定精度が評価される。この作業をバリデーション (validation) あるいはプレディクション (prediction) という。

重回帰式の未知試料に対する測定精度は、検量線による予測値と従来法による分析値 (化学分析値) との残差の標準偏差や平均値によって評価される。この残差の標準誤差を SEP (standard error of prediction, 予測標準誤差) という。平均値をバイアスという。SEP とバイアスは次式で求められる。

$$SEP = \sqrt{\sum (d_i - \bar{d})^2 / (n-1)} \quad (3-7)$$

$$\text{バイアス} = \bar{d} = \frac{1}{n} \sum d_i \quad (3-8)$$

ここで、 d_i は検量線による予測値と従来法による分析値との差、 \bar{d} は d_i の平均値、および n は評価用試料の数である。

ハイパースペクトルイメージングで検量線の作成をするにあたって、スペクトルデータは画素ごとに得られても、それに対応する化学分析値をどのようにして得るかがキーポイントになると思われる。杉山らは、測定対象物から目的とする成分分布が比較的均一で小さめの試験片を切り出し、その試験片における画像の取得および化学分析を行っている。すなわち、試験片における各画素の平均値を用いて検量線の作成を行っている⁷⁾。本研究においても同様の方法を適用した。

以上のようにして得た検量線を、各画素に適用し目的とする品質成分の定量化を行い、その差異を擬似カラー化することで、品質成分の分布状態の把握が可能となる。

引用文献

- 1) 近藤直, 門田充司, 野口伸: マシンビジョンシステム, 農業ロボット (I) -基礎と理論-, コロナ社, 11-80, 2004
- 2) Muhammad Amri, Taichi Kobayashi, Shoko Nagatomi, Jasper Tallada, Yoshinori Gejima, Masateru Nagata, Color Analysis of Carrots and Lemons by Using Spectrophotometer, Bulletin of the Faculty of Agriculture Miyazaki University, Vol50, 49-55, 2003
- 3) 中野恵一, 小宮康宏: マルチスペクトルカメラを用いた物体識別, 応用物理 65 (5), pp496-499, 1996
- 4) 杉山純一: 非破壊内部品質評価-近赤外イメージングの現状と展望-, 2001年版農産物流通技術年報, 農産流通技術研究会編, 流通研究システムセンター, 79-83, 2001
- 5) Evans, M.d., C.N.Thai. and J.C.Grant 1998. Development of a spectral imaging system based on a liquid crystal tunable filter. Trans. ASAE 41(6):1845-1852.
- 6) Lu, R. 2003. Detection of bruises on apples using Near-infrared hyperspectral imaging. Trans. ASAE 46(2):523-530.
- 7) Sugiyama J: Visualization of Sugar Content in the Flesh of a Melon by Near-Infrared Imaging, Journal of Agricultural and Food Chemistry, 47(7), 2715-2718, 1999.
- 8) Tsuta, M., Sugiyama, J., Sagara, Y. 2002a. Near-Infrared Imaging Spectroscopy Based on Sugar Absorption Band for Meron. J.Agric.Food Chem, 50:48-52.
- 9) 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- Journal of the Institute of Image Information and Television Engineers, 56(12):159-162.
- 10) 日本ハイパースペクトル応用学界: <http://www.hit.ac.jp/~satori/hyper-spectrum/>
- 11) 永田雅輝: 分光画像と品質評価, 日本植物工場学会平成16年度九州支部大会シンポジウム要旨, 21-28, 2004

- 12) 増村茂樹：画像処理システムにおけるライティング技術とその展望
- 13) 富永昌治：映像情報メディア学会誌, 54 (2), 268-276, 2000
- 14) 本間念規, 澤山一博他：近赤外分光によるトマトの糖度計測技術の開発, 北海道工業試験場報告, 302, 9-14, 2003
- 15) 木村美紀夫：Qscope シリーズの開発, 「食品の非破壊計測ハンドブック」, 河野澄夫編, サイエンスフォーラム, 216-220, 2003
- 16) 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, 149-152, 1996
- 17) 岩本睦夫, 河野澄夫, 魚住純：近赤外分光法入門, 幸書房, 12-37, 2002
- 18) 尾崎幸洋・河田聡：近赤外分光法, 学会出版センター, 1-7, 1998
- 19) 尾崎幸洋・宇田明史・赤井俊雄：化学者のための多変量解析-ケモメトリック入門, 講談社, 40-47, 2003
- 20) 石村貞夫・有馬哲：多変量解析のはなし, 東京図書, 37-77, 2002

第4章 青果物の品質評価に関する液晶可変フィルターを用いた

分光画像による試み

第1節 緒言

前章で述べたように、本研究で用いた画像撮影装置は分光部に液晶可変フィルターを用いた反射光型である。本章では、本撮影装置の基礎的なデータを得ることを目的に、二・三の青果物を用いて可視光領域（400-720nm）の分光画像情報を得て、機能性色素との関連から青果物の表面色の特徴抽出、表面損傷部位の特徴抽出について検討した¹⁾。

第2節 実験装置および方法

1. 供試材料

供試した青果物は図 4-1(a)に示すように、市販されているバナナ果実 (*Musa sapientum* L.)、ピーマン果実 (*Capsicum annuum* L.) およびニンジン果実 (*Daucus carota* L.) の3種類である。また比較のために、図 4-1 (b) に示す新配色カード 199c (日本色研事業株式会社) も撮影した。これは、液晶可変フィルターの波長レンジ (400~700nm) に対応した紫 (V20)・藍 (V19)・青 (V18)・緑 (V12)・黄 (V8)・橙 (V5)・赤 (V2) の vivid トーン 7 色を用いた。



図 4-1 供試材料

Fig.4-1. A test sample.

2.液晶可変フィルター

従来、画像によるスペクトル情報（分光画像）は、予め用意した干渉フィルター、または、吸収フィルターの組合せ、連続的な波長を提供する回折格子を使用した機械、固体結晶複屈折フィルターによって光をフィルタリングすることによって得られていた。しかし、今まで大口径で、しかもアクセスタイムの速いチューニング方式はなかった。これらのことを背景に開発されたのが液晶可変フィルターであるため、これまで以上に、分光画像の取得および解析が容易になるとと思われる。

本研究で用いた液晶可変フィルター（米国 CRI 社：VARISPECT™TUNABLE FILTER VS-V153-10-HC-20）を図 4-2 に示す。本フィルターは、可視光（400-720nm）用に開発されたのもで、偏光子とネマティック液晶セルを積層することで構成され、印加電圧を可変することにより任意の波長成分の光を取り出す事が可能である。主な特徴は、帯域幅で連続波長操作が可能、フィルター口径 20mm での画像処理が可能、波長選択が高速でランダムアクセス可能等である。なお、仕様を表 4-1 に示した²⁾。

3.測定装置



図 4-2 液晶可変フィルター

Fig.4-2. CRI Varispec Liquid Crystal Tunable Filter.

表 4-1 液晶可変フィルターの仕様

Table. 4-1. Specifications of CRI Varispec Liquid Crystal

波長レンジ (nm)	帯域幅 (nm)	平均バンド 外透過光	有効径 (mm)	光学系 ハウジング
400~720	10	HC	20	STD
応答時間 (25℃にて)		50ms (ランダムアクセス)		
最大入射照度		500mW/cm ²		
許容角 (半角), 波長精度		±7°, 帯域幅/8		
貯蔵(動作時)温度範囲		0~45℃ (20~45℃)		
インターフェイス		RS-232C/TTL/ビデオ同期		
寸法		79mm×51mm 50mm		

3. 測定装置

1) 画像の撮影装置および取得

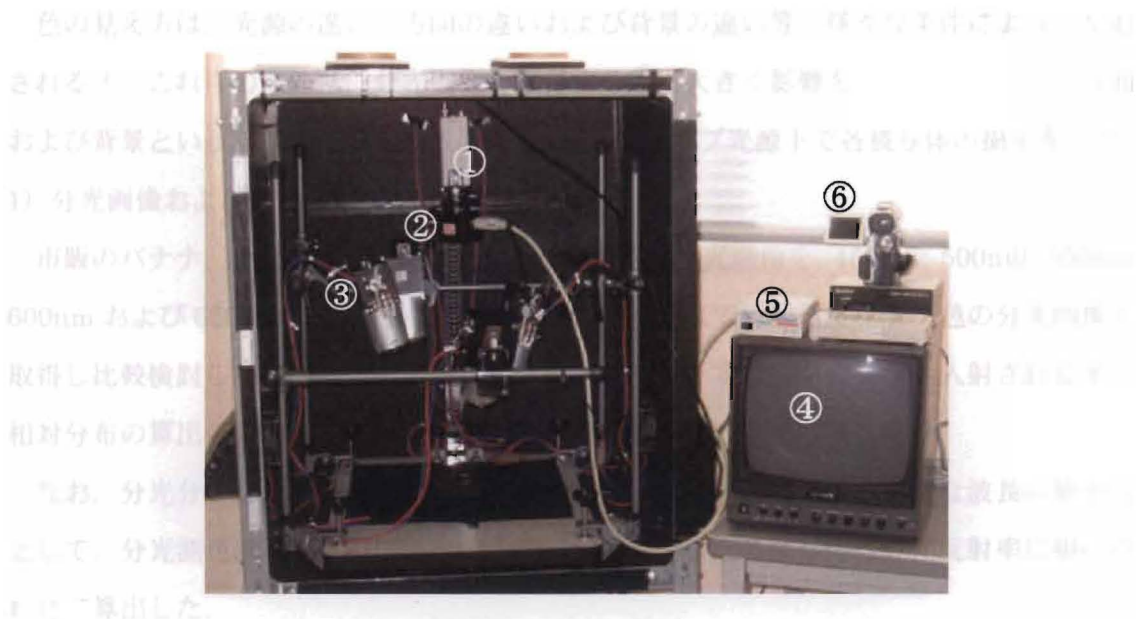
画像装置を図 4-3 に示す。照明にはハロゲンランプ (50W) を光源とする③DL ライト (エスアイ精工) を、陰影およびハレーションが出来にくいように被写体に対して前後左右の 4ヶ所 (高さ 350mm) に設置した。この時の照明照度は 2300lux であった。また、外乱光の影響を除去するために、装置全体をブラックボードおよび暗幕で囲んだ。

撮影器は、①カメラ (SONY CCD VIDEO CAMERA AVC-D5) にレンズ (COCMICAR TELEVISION LENS 1:1.4 f=16mm) と②液晶可変フィルター (CRI 製, VARISPECT™TUNABLE FILTER VS-V153-10-HC-20) を取り付け、被写体の上方 500mm に設置した。撮影はレンズ絞りを $F=2$ とし、画像を④モニタを介して、⑥SONY デジタルビデオカメラ (DCR-PC100) の MEMORY STICK に記録した。

2) スペクトロフォトメーター

分光反射率測定に用いたスペクトロフォトメーター (MINOLTA 製: CM-508i) を図 4-4 に示す。本装置は、受光部に分光センサを搭載し高精度測定が可能で、測定データは付属の色彩管理ソフトウェア (CM-S5) で分析、解析できる。

4.測定項目および方法



- ① CCD カメラ
- ② 液晶可変フィルター
- ③ DL ランプ
- ④ モニター
- ⑤ ハンドヘルドコントローラー
- ⑥ デジタルビデオカメラ

図 4-3 画像撮影装置

Fig.4-3. Spectral imaging set-up.



図 4-4 スペクトロフォトメーター

Fig.4-4. Spectrophotometer.

4.測定項目および方法

色の見え方は、光源の違い、方向の違いおよび背景の違い等、様々な条件によって左右される³⁾。これらの条件は、分光画像を取得する際に大きく影響を与える。そこで、方向および背景といった条件を一定に設置し、ハロゲンランプ光源下で各被写体の撮影をした。

1) 分光画像および分光分布の測定

市販のバナナ、ピーマンおよびニンジンの表面色の分光画像を、450nm, 500nm, 550nm, 600nm および 650nm の5波長にて取得した。同波長にて新配色カード7色の分光画像も取得し比較検討した。次に、被写体から反射される光、すなわちカメラへ入射される光の相対分布の算出を行い、5波長で取得した分光画像の濃淡差を考察した。

なお、分光分布は、ハロゲンランプ光源の比エネルギー分布の最も大きな波長の値を1として、分光測色計(MINOLTA:CM-508i)で測定した各被写体の分光反射率に掛け合わせて算出した。

2) ニンジン表面に観察される損傷部位の特徴抽出

市販されているニンジンの表面に、損傷部位(傷①:直径2mm程度で黒く凹型の形状、傷②:長さ10mm幅3mm程度の黄色く変色した引っかき傷)が観察されるものを購入し、その特徴抽出を行うために、500~640nm(±5nm)の波長域を20nm間隔で8波長の分光画像を取得し、損傷部位抽出の可能性について検討した。また、損傷が判断し難いと考えられるニンジンの表面と同色の損傷部位の特徴抽出を行うため、ニンジン表面にカッターで任意的に傷をつけ(傷③)、上記と同じ8波長の分光画像を取得し、その傷の抽出の可能性を検討した。

解析には、Photoshop6.0(Adobe)を用いて、取得した原画像を色調補正機能のコントラスト強調を行った後、閾値を128へ設定し、2値化画像に変換し、特徴抽出を行った。

第3節 結果および考察

1.青果物表面色の分光画像と輝度(濃淡度)

1) ピーマンの場合

ピーマンのRGB画像および5波長における分光画像を図4-5に示す。ピーマンは、550nmで撮影した場合に最も白く映し出され、この時の輝度値は74.80であった。その他の波長での輝度値は450nmで18.71, 500nmで29.04, 600nmで59.80, 650nmで50.70

であった。ピーマン表面色の緑と同色の配色カード緑(図4-8参照)と比較すると550nmで撮影した分光画像が最も白く写しだされ、他の波長においてもピーマン表面色の濃淡差と同様の結果が得られた。

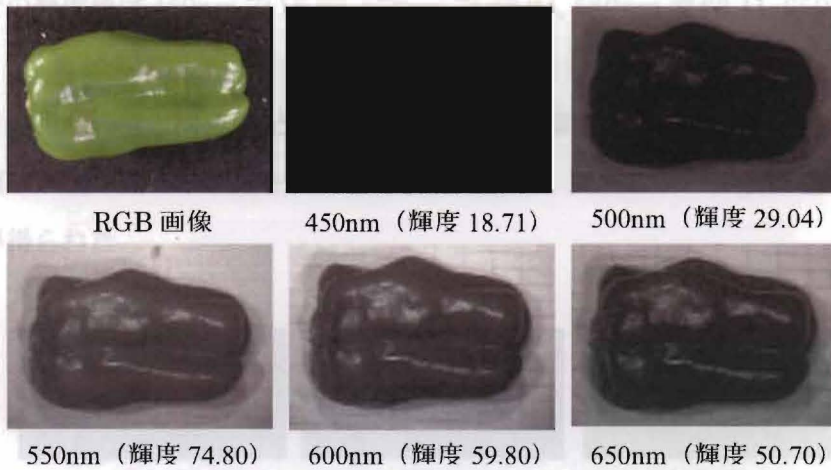


図4-5 ピーマンの分光画像(450nm,500nm,550nm,600nm,650nm)

Fig.4-5. Spectral image on Green pepper at 450nm,500nm,550nm,600nm and 650nm.

2) バナナの場合

バナナのRGB画像および5波長における分光画像を図4-6に示す。バナナは、650nmで撮影した場合に最も白く映し出され、この時の輝度値は152.92であった。その他の波長での輝度値は450nmで19.65、500nmで29.02、550nmで122.58、600nmで150.87であった。バナナ表面色の黄色と同色の配色カード黄色(図4-8参照)と比較すると650nmで撮影した分光画像が最も白く写しだされ、他の波長においてもバナナ表面色の濃淡差と同様の結果が得られた。

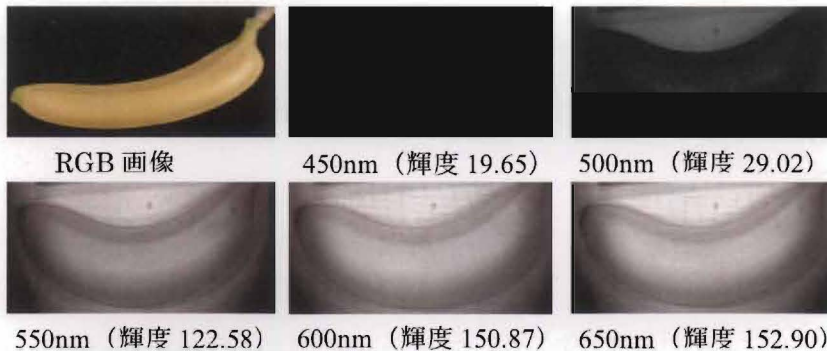


図4-6 バナナの分光画像(450nm,500nm,550nm,600nm,650nm)

Fig.4-6. Spectral image on banana at 450nm,500nm,550nm,600nm and 650nm.

3) ニンジンの場合

ニンジンの RGB 画像および 5 波長における分光画像を図 4-7に示す。ニンジンは、600nm で撮影した場合に最も白く映し出され、この時の輝度値は 128.25 であった。その他の波長での輝度値は 450nm で 18.69, 500nm で 28.24, 550nm で 63.11, 650nm で 115.04 であった。

ニンジン表面色の橙と同色の配色カード橙（図 4-8参照）と比較すると 600nm で撮影した分光画像が最も白く写しだされ、他の波長域においてもニンジン表面色の濃淡差と同様の結果が得られた。



図 4-7 ニンジンの分光画像（450nm,500nm,550nm,600nm,650nm）

Fig.4-7. Spectral image on carrot at 450nm,500nm,550nm,600nm and 650nm.

図 4-8 新配色カードの分光画像（450nm,500nm,550nm,600nm,650nm）

Fig.4-8 Spectral image on standard color card at 450nm,500nm,550nm,600nm and 650nm.

	450	500	550	600	650
紫 V20	Black	Black	Dark Gray	Dark Gray	Dark Gray
藍 V19	Black	Black	Dark Gray	Dark Gray	Dark Gray
青 V18	Black	Black	Dark Gray	Dark Gray	Black
緑 V12	Black	Black	Dark Gray	Dark Gray	Dark Gray
黄 V8	Black	Black	Dark Gray	Dark Gray	Dark Gray
橙 V5	Black	Black	Dark Gray	Dark Gray	Dark Gray
赤 V2	Black	Black	Dark Gray	Dark Gray	Dark Gray

図 4-8 新配色カードの分光画像 (450nm,500nm,550nm,600nm,650nm)

Fig.4-8. Spectral image on standard color card at 450nm,500nm,550nm,600nm and 650nm.

2.分光画像と分光分布との関係

1) ピーマンの場合

ピーマンから反射される光の相対分布を図 4-9 (a) に示す。ピーマン表面色の分光分布は、500nm 付近の波長域から立ち上がりを示し 550nm をピークに長波長になるに従って徐々に減少する山成り波形を示した。ピーマンと同色の緑カードの分光分布は (図 4-9 (b) 参照)、多少の反射強度の差はあるがピーマンと同様の波形を示した。

反射強度と輝度値の関係を撮影に用いた 5 波長において比較してみると、450nm で反射強度 1.12, 輝度値 18.71, 500nm で反射強度 2.17, 輝度値 29.04, 550nm で反射強度 9.40, 輝度値 74.80, 600nm で反射強度 6.59, 輝度値 59.80, 650nm で反射強度 4.95, 輝度値 50.70 と、反射強度の大きな波長で撮影した場合の濃淡画像は白く映し出され、逆に反射強度の低い場合には黒く映し出される事が判った。この事から、ピーマン表面色である緑系波長域 (500~600nm) では反射強度が強く映し出される濃淡画像は白く、短波長の青系波長域 (400~500nm) や長波長の赤系波長域 (600~700nm) では光を吸収し反射強度が低くなり、映し出される濃淡画像は黒くなる事が明らかとなった。

2) バナナの場合

バナナから反射される光の相対分布を図 4-9 (a) に示す。バナナ表面色の分光分布は、500nm 付近の波長域から特徴を示す右上がりの波形である。バナナと同色の黄カードの分光分布は (図 4-9 (b) 参照)、多少の反射強度の差はあるがバナナと同様の波形を示した。

反射強度と輝度値の関係を撮影に用いた 5 波長において比較してみると、450nm で反射強度 3.26, 輝度値 19.65, 500nm で反射強度 7.70, 輝度値 29.02, 550nm で反射強度 29.31, 輝度値 122.58, 600nm で反射強度 40.31, 輝度値 150.87, 650nm で反射強度 50.40, 輝度値 152.92 と反射強度の大きな波長で撮影した場合の濃淡画像は白く映し出され、逆に反射強度の低い場合には黒く映し出される事が明らかとなった。

バナナの表面色は黄色であることから黄系波長域 (600nm 前後) において最も白く映し出されると考えられる。しかし、赤系波長域 (600~700nm) で撮影した分光画像の方が白く映し出される結果と成った。これは、図 4-9 (b) の黄色カードの分光分布からも分かるようには、緑系波長域 (500~600nm) ,黄系波長域 (600nm 前後) および赤系波長域 (600~700nm) で反射し、他の波長域を吸収していることを意味する。すなわち、黄色は、人間の目では感じられない緑系および赤系の色の要素を多く含んでいる事が分かる。このように本実験で用いたバナナの場合、赤系の成分を多く含んだものであるため、

650nm で撮影した画像の方が白く映し出される結果となった。

3) ニンジンの場合

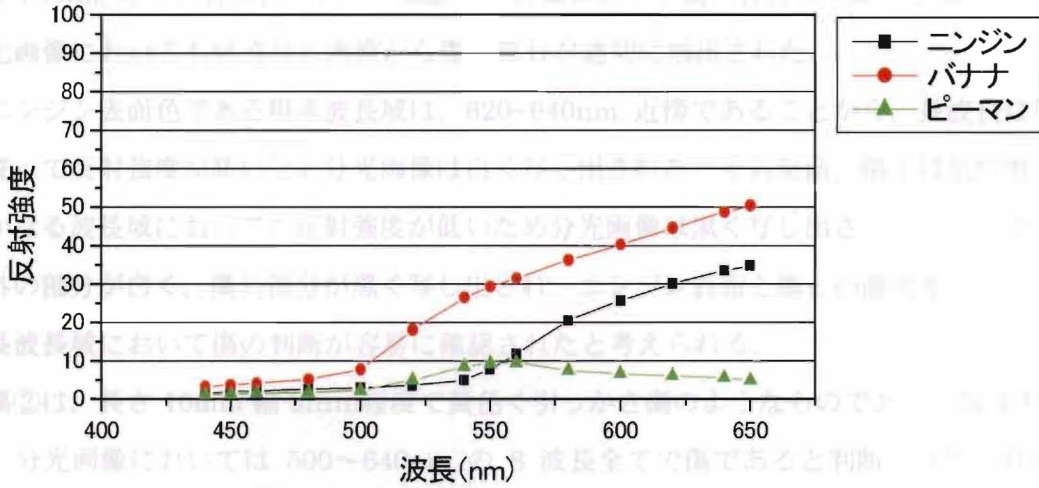
ニンジンから反射される光の相対分布を図 4-9 (a) に示す。ニンジン表面色の分光分布は、550nm 付近の波長域から特徴を示す右上がりの波形である。ニンジンと同色の橙カードの分光分布は (図 4-9 (b) 参照)、多少の反射強度の差はあるがニンジンと同様の波形を示した。

反射強度と輝度値の関係を撮影に用いた 5 波長において比較してみると、450nm で反射強度 1.83,輝度値 18.69, 500nm で反射強度 2.99,輝度値 28.24, 550nm で反射強度 7.86,輝度値 63.11, 600nm で反射強度 25.64,輝度値 128.25, 650nm で反射強度 34.77,輝度値 115.04 となった。600nm と 650nm の反射強度と輝度値の関係が反転している事がわかる。これは、ニンジン表面色の橙系波長域が、より多くの黄色成分を含んでいること、または、今回用いたハロゲンランプ光源色の影響を受けたものと思われる。

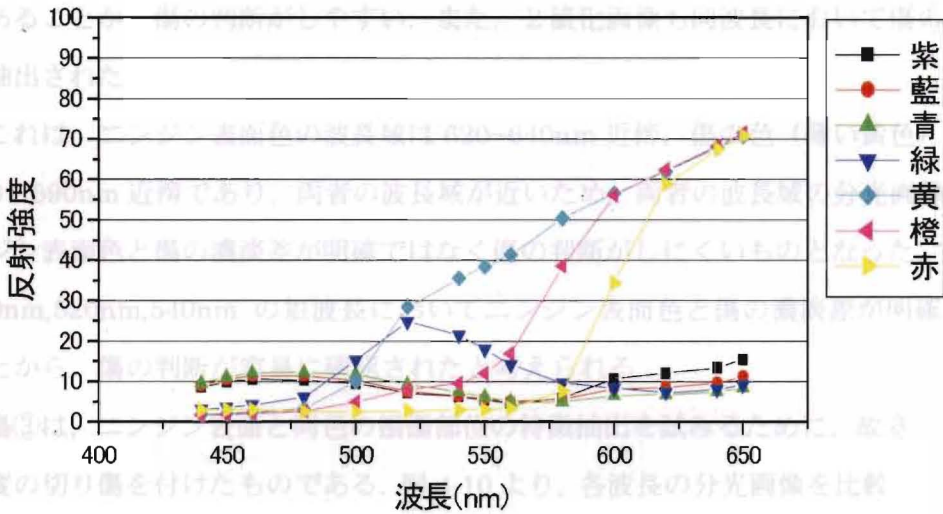
以上の事から、各波長内にある青果物の表面色は反射強度が高く、フィルターへの入射光が多くなり映し出される画像は白い事が判った。また、各青果物表面色から反射される光の分光分布の波形に類似した濃淡差を得る事ができた。また、バナナで示されるように、分光画像情報では目視では確認しにくい精細な色情報を表すことができた。

3.ニンジン表面に観察される損傷部位の特徴抽出

図4-10は、ニンジン表面に観察される損傷部位の特徴抽出に用いた分光画像のRGB画像と、その分光画像の反射強度を示すグラフである。図4-10(a)は、ニンジン表面の色である可視光領域(400-650nm)近傍である。図4-10(b)は、ニンジン表面の色である可視光領域(400-650nm)近傍である。



(a) ピーマン, ニンジン, バナナ



(b) 新配色カード

図 4-9 分光分布

Fig.4-9. Spectral Distribution of reflected Halogen Lamp.

これは、適切な閾値の選定、ノイズを除去できると思われる。また、さらに微細な損傷を確保するため、画像の取得間隔を狭く、すなわち高波長分解能での画像取得をすることで、本指図のような同色/損傷部位の特徴抽出

3.ニンジン表面に観察される損傷部位の特徴抽出

図 4-10 に、損傷部位（傷①，②，③）の各波長における分光画像，2値化画像および RGB 画像を示す。傷①は、直径 2mm 程度で黒く凹型の形状である。各分光画像を比較すると 560nm 以上の長波長において撮影した画像において傷の存在を判断できる。また、2値化画像においても同波長の画像から傷の部分が適切に抽出された。

ニンジン表面色である橙系波長域は、620~640nm 近傍であることから、長波長になるに従って反射強度が高いため分光画像は白く写し出された。その反面、傷①は色が黒く、いかなる波長域においても反射強度が低いため分光画像は黒く写し出された。よって、傷以外の部分が白く、傷の部分が黒く写し出され、ニンジン表面と傷との濃淡差が大きくなる長波長域において傷の判断が容易に確認されたと考えられる。

傷②は、長さ 10mm 幅 3mm 程度で黄色く引っかき傷のようなものである。図 4-10 より、分光画像においては 500~640nm の 8 波長全てで傷であると判断できる。特に、500nm,520nm,540nm の短波長における分光画像で、ニンジン表面と傷との濃淡差が明確であることから傷の判断がしやすい。また、2値化画像も同波長において傷の部分が適切に抽出された。

これは、ニンジン表面色の波長域は 620~640nm 近傍、傷の色（薄い黄色）の波長域は 570~590nm 近傍であり、両者の波長域が近いこと、両者の波長域の分光画像からは、ニンジン表面色と傷の濃淡差が明確ではなく傷の判断がしにくいものとなった。その反面、500nm,520nm,540nm の短波長においてニンジン表面色と傷の濃淡差が明確に示されたことから、傷の判断が容易に確認されたと考えられる。

傷③は、ニンジン表面と同色の損傷部位の特徴抽出を試みるために、故意に長さ 10mm 程度の切り傷を付けたものである。図 4-10 より、各波長の分光画像を比較してみると 520 nm,540nm の画像において傷であると判断できる。これは、傷の部分から反射される光の強度とニンジン表面から反射される光の強度の差を 520 nm,540nm の波長においてうまくとらえることができ、濃淡に差が現れたものと思われる。しかし、2値化画像では傷①と②に比べて損傷部位の特徴抽出が適切に行われず 540nm の画像から傷である部位が微かに判断できる程度であった。

これは、適切な閾値の選定、ノイズ除去、テクスチャ解析等の画像処理によって解決できると考えられる。また、さらに微細な濃淡差を確保するため、画像の取得間隔を狭く、すなわち高波長分解能での画像取得をすることで、本損傷のような同色の損傷部位の特徴抽

出が可能になると考えられる。

以上、各画像から分かるように、ニンジン表面色と損傷部位の色の違い、また、反射強度の差などから、色・傷の特徴ある波長の選定を行うことで、目的とする特徴検出が可能になると思われる。

	傷① 分光画像 2 値化	傷② 分光画像 2 値化	傷③ 分光画像 2 値化
RGB 画像			
500nm			
520nm			
540nm			
560nm			
580nm			
600nm			
620nm			
640nm			

図 4-10 ニンジン表面に観察される損傷部位の分光画像，2 値化画像および RGB 画像

Fig.4-10. Spectral image on damage carrot at 500nm, 520nm, 540nm, 560nm, 580nm, 600nm, 620nm and 650nm Binary images and RGB color images.

第4節 摘要

本章では、可視光領域での分光画像を用いて農産物の色（機能性色素との関連）の特徴抽出、損傷部位の特徴抽出を行うことを目的とし、これらの特徴抽出に用いる液晶可変フィルターの基礎資料を得ることを試みた。

供試サンプルには、青果物としてピーマン、バナナおよびニンジン、また比較のために新配色カード7色を用いて、ハロゲンランプ光源下で各被写体から反射しカメラへ入射される光の分光分布を算出した後、450～650nm内の5波長で分光画像を取得した。その結果、各波長において撮影した分光画像と青果物から反射される光の分光分布との関係から、各波長域内にある物体の色は被写体から反射される強度が強いため、フィルターへの入射光が多くなり白く写しだされる事がわかった。また、被写体から反射される光の分光分布の波形に類似した濃淡画像を得る事ができた。

ニンジンの表面における3種類の損傷部位の特徴抽出を500～640nm内の8波長の分光画像から行った。その結果、色・傷の特徴ある波長の分光画像から損傷部位の特徴抽出が可能であることがわかった。

以上の結果より、目的とする農産物の品質特徴に即した波長域の選定を行い、その分光画像情報から品質評価・検査が可能になるものと思われる。

引用文献

- 1) 永田雅輝・小林太一・槐島芳徳・M.アムリ・後藤有美子・戸次里枝：液晶可変フィルターを用いた分光画像による青果物の品質評価の試み，宮崎大学農学部研究報告，50（1・2），57-64，2004
- 2) フォトテクニカ株式会社：Image&Macro Images, CRI 液晶チューナブルフィルター資料，<http://www.phototechnica.co.jp/pdf/cri/japanese/jp-varispec.pdf>
- 3) ミノルタ株式会社：色を読む話-色彩管理は「感覚」から「知覚」へ-，計測機器システム部，7-9

第5章 紫イモのアントシアニン色素分布の評価

第1節 緒言

近年、健康志向の高まりから、農産物の機能性色素に強い関心が急速に高まりつつある。そのために食品関連業界では、「健康」をキーワードとして合成品の着色料に比べ安全性の高い天然色素（アントシアニン、リコピン等）を使用した加工食品に開発をそそぎ、数多くの商品が市場に出ている^{1) 2) 3)}。中でも紫イモやイチゴなどに含まれるポリフェノール的一种であるアントシアニン色素は、がんや動脈硬化などの生活習慣病に深く関わっている活性酵素を除去する抗酸化物質として注目され、今後一層の応用性が期待される天然色素の一つである^{1) 4)}。

このように、科学的な分析法の発達によって農産物の色（色素）と機能性との関係が急速に明らかになっている。つまり、高度化・多様化する食の消費者ニーズに応えるためにも、農産物のもつ機能性色素は重要な品質評価項目に位置づけられる⁵⁾。

しかしながら、一般にアントシアニン色素の濃度定量には、ギ酸、酢酸などの抽出溶媒を用いて分光光度計や液体クロマトグラフィーで測定する化学的な手法が採用されている⁶⁾。今後、簡便かつ迅速な評価技術の開発を考慮した場合には、このような化学的手法による計測ではなく物理的な計測が望ましい⁷⁾。

そこで、本章では有色サツマイモ（紫イモ）を供試サンプルとして、可視光領域でのハイパースペクトルイメージングを用いてアントシアニン色素分布の評価を行った⁸⁾。

第2節 サツマイモとアントシアニン色素

サツマイモ (*Ipomoea batatas* Poir) の品種は世界で 3000 種以上あるといわれている。日本では、江戸時代以降に外国から導入された品種と、それらの変異種で、各地で選抜されて定着した品種が、在来品種として栽培されている。特に、関東と九州においては重要な畑作物である。主な用途は、青果用、デンプン原料用、飼料用と極めて用途が広いが、前述したようにサツマイモにおいても、機能性（色素）や加工食品性を高め、時代の要望に応じた新しい品種の育種に研究が注がれている。塊根肉部にアントシアニン色素を含有しているサツマイモの品種は、次の品種がある¹⁾。

【備瀬】来歴不明。沖縄県読谷村で最も多く栽培されている品種である。表皮は白いが塊根肉部は紫色をしている。

【宮農 36 号】宮古農事試験場で育種された品種である。表皮，塊根肉部とも紫色をしている。俗に「読谷紅イモ」という。

【山川紫】来歴不明。主に鹿児島県内で栽培されている品種である。表皮，塊根肉部とも紫色をしている。山川紫は，糖分が少なく食味は良くないため青果用としては不向きであるが，肉色が鮮やかな紫色なので食用色素，ペースト，フレークに加工され，アイスクリームやイモアメなどに利用される。

【豊むらさき】表皮，塊根肉部とも紫色をしているが，糖度が少なく食味は良くないため，食用としては不向きで，色素用として使われる程度である。

【種子島紫】鹿児島県で栽培されている。表皮は白色で，塊根肉部は紫色である。

【ハワイ種】D.E.Yen が収集したエンコレクションのなかにある品種で，Y-617 と Y-637 はニュージーランドからの導入品種である。表皮は白色で，塊根肉部が紫色をしており，切り口の輪郭に特徴がある。食味はよいが利用されていない。

【ナカムラサキ】1960 年代に栽培された品種で，塊根肉部が紫色をしている。ヨギムラサキとともに紅イモの仲間であるといわれている。

【アヤムラサキ】九州農業試験場と色素メーカー（三栄源エフ・エフ・アイ）の共同研究で育成された，世界初色素専用品種である。アヤムラサキは，「九州 109 号」と「サツマヒカリ」の交配から生まれ，1995 年に品種登録された。表皮は暗赤紫色，塊根肉部は濃紫色である。前述した山川紫は，アントシアニン含有は高いが，低収という欠点があるが，アヤムラサキのアントシアニン含有は山川紫の数倍に達し，収量性も優れ，色素用，加工用として用いられている。

【ムラサキマサリ】前述したアヤムラサキは，収量性など農業的形質の優れた高アントシアニンの育成品種であるが，その形状は条溝が深いため，収穫や加工適性に難がある。そこで，これらの欠点を補うために育種されたのがムラサキマサリである。ムラサキマサリは，高アントシアニンの「アヤムラサキ」と多収，高デンプンの「シロユタカ」の交配から生まれた⁹⁾。

第3節 実験装置および方法

1. 供試サツマイモ

供試したサツマイモは、図 5-1 に示す、宮崎県都城市の九州沖縄農研センターで栽培された‘アヤマラサキ’ (図 5-2 (a)) および‘ムラサキマサリ’ (図 5-2 (b)) の 2 品種である。サツマイモは、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~3 L のアヤマラサキ 11 個 (No.1~No.11, 平均重量 245g, 平均長径 154mm, 平均直径 45mm), ムラサキマサリ 6 個 (No.1~No.6, 平均重量 306g, 平均長径 129mm, 平均直径 58mm) を供試した。供試サツマイモの性状を表 5-1 に示す。



図 5-1 サツマイモの栽培畑 (宮崎県都城市九州沖縄農研センター)

Fig.5-1. A cultivation field of a sweet potato

(National Agricultural Research Center for Kyushu Okinawa Region) .

供試番号	等級	階級	長さ
4	243	162	41
5	166	156	38
(a) アヤムラサキ			
11	177		
(b) ムラサキマサリ			
171	148	38	A
103	148	38	A
158	130	68	A
240	128	22	A
6	195	115	42

図5-2 供試サツマイモ

Fig.5-2. Sweet potato samples.

(*) 等級級：宮崎県JA 園芸ブランド標準規格(かんしゅ)標準規格を準拠

表 5-1 供試サツマイモの性状

Table. 5-1. Size profile of sweet potato samples.

供試番号	重量 (g)	長さ (mm)	直径 (mm)	等級 ^(※)	階級 ^(※)	長丸
アヤムラサキ						
1	524	172	63	B	3L	長
2	316	164	58	A	2L	長
3	296	190	42	A	L	長
4	243	162	41	A	L	長
5	166	156	38	A	M	長
6	194	167	38	A	M	長
7	202	118	42	A	M	長
8	240	105	56	A	L	丸
9	181	151	41	A	M	長
10	154	146	38	A	M	長
11	177	166	36	A	M	長
ムラサキマサリ						
1	373	148	58	A	2L	長
2	303	152	53	A	2L	長
3	358	130	68	A	2L	丸
4	364	102	71	A	2L	丸
5	240	128	53	A	L	長
6	195	115	42	A	M	長

(※) 等階級：宮崎県 JA 園芸ブランド標準規格(かんしょ標準規格参照)¹⁰⁾

2. 試験片の作成

検量線作成および評価のための試験片は、図 5-3(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 (φ35mm) でくり抜き、均一な試験片を得るために図 5-3 (b) のように長径方向の切片として、5mm 厚の円板状試験片 (5g) 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。さらに、B-B 断面においては個体間のアントシアニン色素分布の評価に用いた。

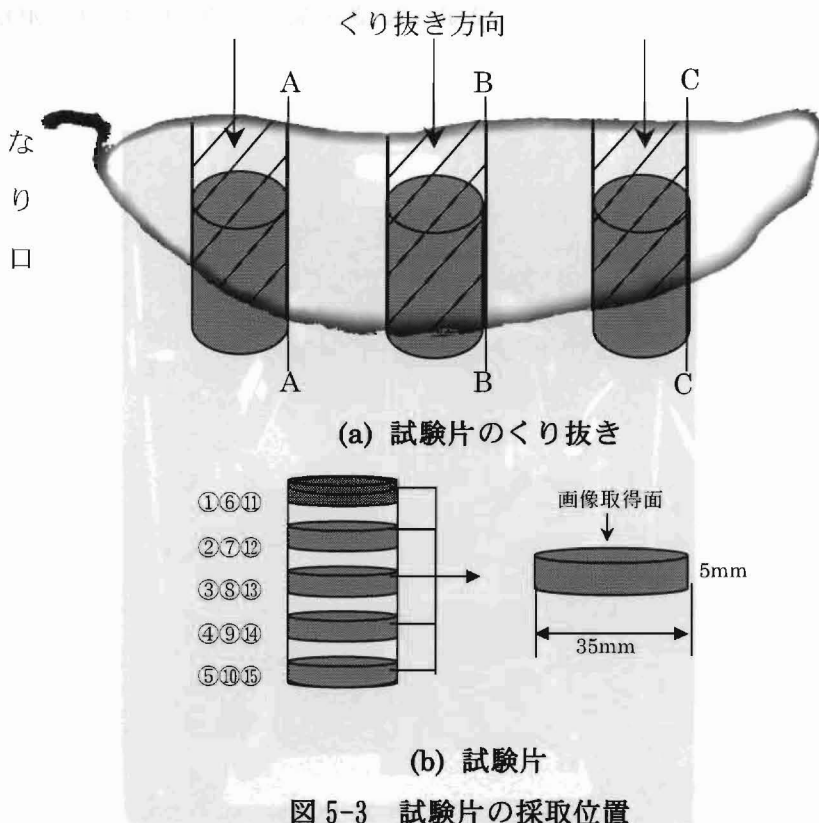


Fig.5-3. Measurement points of sweet potato for spectral imaging and extracted material.

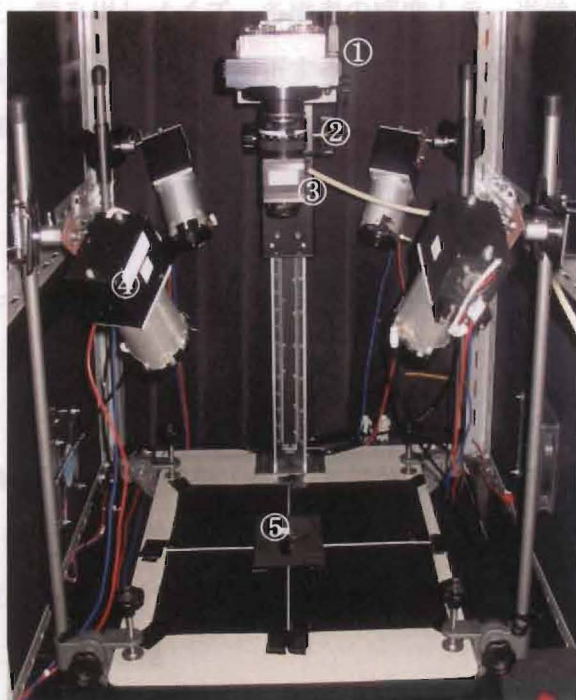
3. ハイパースペクトルイメージ撮影装置

図 5-4 はハイパースペクトルイメージ撮影装置を示す。前述したように本装置は、可視光領域 (400-720nm) 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

ブ、50W、ビーム角 38°、色温度 3,200K、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 350mm)の 4ヶ所とした。ハレーションを除去するために、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¹¹⁾。照度は試料位置で 4,000~4,500lux 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の影響を除くために¹²⁾、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℃に保った。室内温度は 20℃に設定した。

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



- ① 冷却 CCD カメラ
- ② レンズ
- ③ 液晶可変フィルター
- ④ DL ライト
- ⑤ 対象物

図 5-4 ハイパースペクトルイメージ撮影装置

Fig.5-4. Hyperspectral imaging set-up.

4.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 450~600nm の範囲において 1nm 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℃、シャッタースピードを 1.3 秒、絞りを F=8 とした。

2) 画像補正

取得した分光画像の処理は、自作プログラム (Matlab Ver6.5.1) 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 650nm の画像をもとにスレッシュ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、(5-1)式により画像補正を行い、各画素を 14bit 階調の輝度値で表現した¹³⁾。

$$I_{norm(x,y)} = \frac{I_{sample(x,y)} - I_{dark(x,y)}}{I_{reference(x,y)} - I_{dark(x,y)}} \cdot m \quad (5-1)$$

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

(5-1) 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¹⁴⁾。

$$A_{(x,y)} = \log(I_{s(x,y)} / I_{(x,y)}) = \log(1 / I_{norm(x,y)}) \quad (5-2)$$

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。

(5-2) 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、450～600nm の波長域（1nm 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。

5. 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（490～530nm）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^{15) 16)}。

紫イモでは、抽出液が5%酢酸の場合524nm、0.5%硫酸の場合518nm¹⁷⁾、醸造酢の場合525nm¹⁾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100ml¹⁸⁾を用いて、画像撮影直後の試験片（5g）を浸漬（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490～530nm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。

6. 検量線の作成および評価

検量線の作成は、試験片表面（ $\phi 35\text{mm}$ ）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(5-3)式で求めた¹⁴⁾。

$$SEC = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 / (n - p - 1)} \quad (5-3)$$

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、(5-4)式でその精度 SEP を評価した¹⁴⁾。

$$SEP = \sqrt{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d}_i)^2 / (n-1)} \quad (5-4)$$

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}_i は d_i の平均値、 n は評価用試料の数である。

第4節 結果および考察

1. アントシアニン色素の吸収波長

図 5-5 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、505nm、508nm および 525nm の波長において、ムラサキマサリでは、503nm、508nm および 526nm 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 $\lambda_a=525\text{nm}$ 、ムラサキマサリで $\lambda_a=526\text{nm}$ と決定した。表 5-2 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。

表 5-2 抽出液の吸光度測定値

Table. 5-2. Basic data of absorbance by extracted liquid of anthocyanin pigment.

品種	アヤマラサキ		ムラサキマサリ	
	検量線 作成用	検量線 評価用	検量線 作成用	検量線 評価用
試験片の数	110	55	60	30
平均吸光度	2.117	2.136	2.044	2.036
最小吸光度	1.970	1.949	1.982	1.966
最大吸光度	2.489	2.430	2.180	2.082
標準偏差	0.142	0.134	0.038	0.028

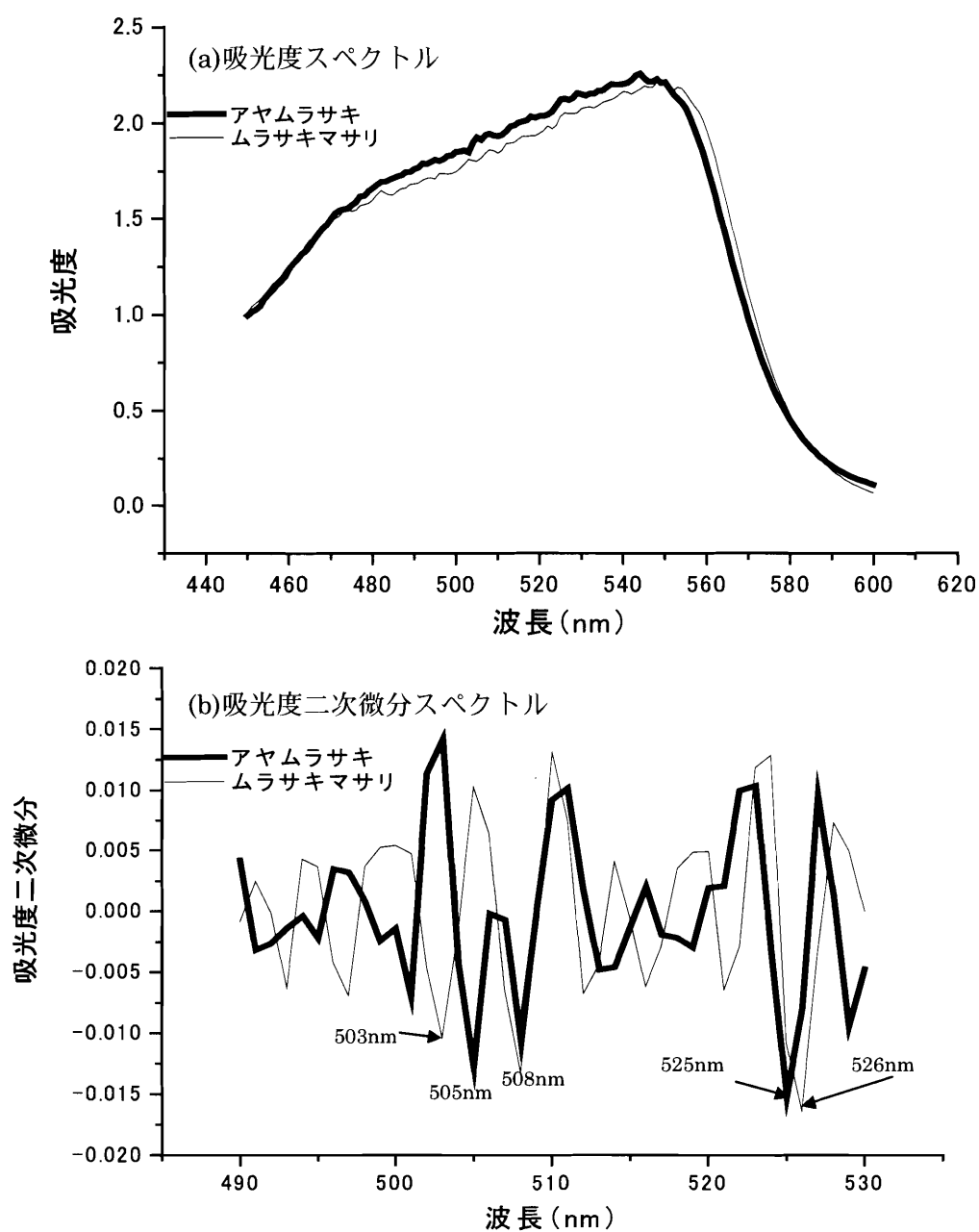


図 5-5 抽出液の吸光度スペクトルおよび吸光度二次微分スペクトルの解析結果

Fig.5-5. Absorbance and 2nd derivative absorbance spectra of extracted material.

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 490~530nm 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 5-6 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 507nm, 513nm および 523nm で強い吸収が見られた。これらの吸収波長と図 5-5 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 507nm, 513nm および 523nm は、抽出液の 505nm, 508nm および 525nm に由来する吸収波長と言える。一方、ムラサキマサリでは、507nm, 513nm および 523nm は、抽出液の 503nm, 508nm および 526nm 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 2~5nm 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。

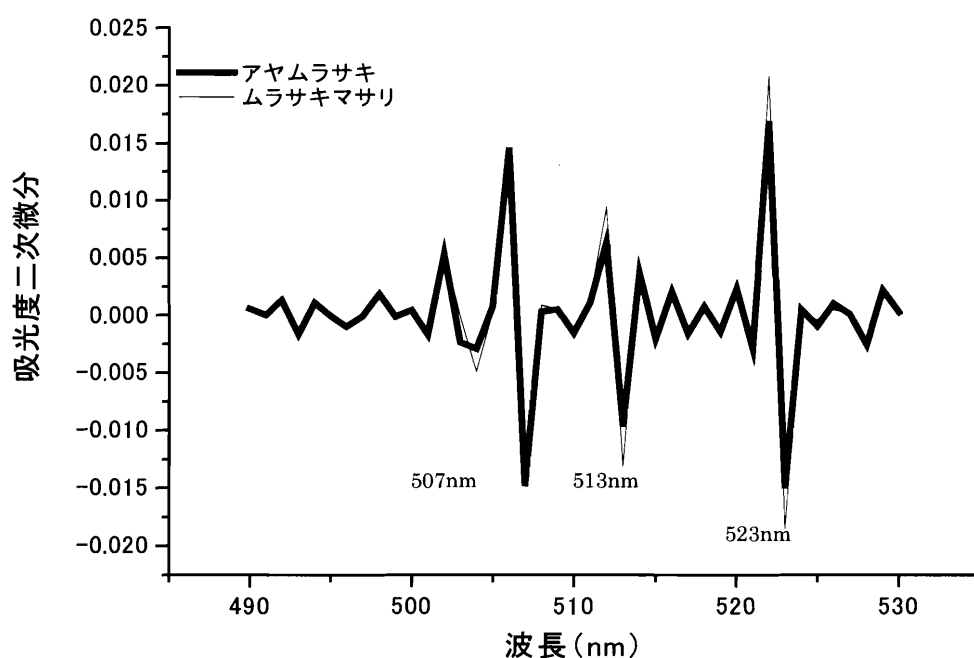


図 5-6 分光画像による吸光度二次微分スペクトルの解析結果

Fig.5-6. Second derivative spectra from spectral imaging.

3. 検量線の作成と評価

表 5-3 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 525nm, ムラサキマサリで 526nm) に由来する分光画像の 523nm 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 5-6 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

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

ムラサキマサリの場合

$$\begin{aligned} \text{予測値(吸光度)} = & 2.003 - 19.968 d^2 A(\lambda_{523}) + 44.942 d^2 A(\lambda_{451}) \\ & + 121.242 d^2 A(\lambda_{479}) - 161.761 d^2 A(\lambda_{501}) + 159.84 d^2 A(\lambda_{500}) \end{aligned} \quad (5-6)$$

ここで, $d^2 A()$ は () 内の波長(nm)における平均吸光度二次微分値である。

表 5-3 検量線の作成および評価結果

Table 5-3. Result of parameters of calibration and prediction by wavelength

選択波長 $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5$	検量線作成		検量線評価		
	R	SEC	R	Bias	SEP
アヤマラサキ					
523	0.655	0.086	0.590	0.00	0.110
523,593	0.818	0.066	0.890	0.02	0.064
523,593,564	0.900	0.051	0.890	0.01	0.061
523,593,564,539	0.914	0.047	0.906	0.01	0.056
523,593,564,539,516	0.921	0.045	0.921	0.01	0.052
ムラサキマサリ					
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

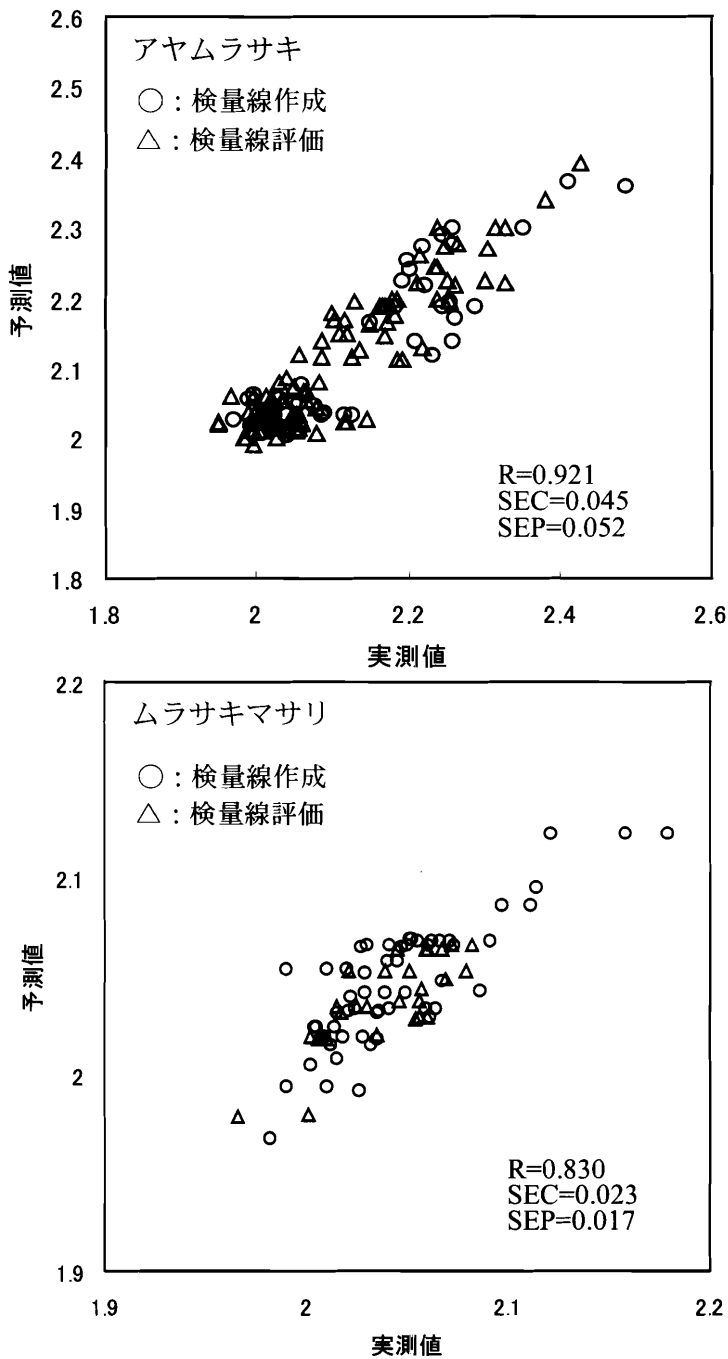


図 5-7 5 波長検量線による予測値と実測値の関係(アヤムラサキ, ムラサキマサリ)

Fig.5-7. Relationship between measured and predicted anthocyanin pigment absorbance by five wavelength (AYAMURASAKI, MURASAKIMASARI).

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 5-3 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 (5-5) 式、ムラサキマサリでは (5-6) 式の検量線を適用してアントシアニン色素（吸光度）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 5-8 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 5-9 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ですが、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¹⁹⁾。

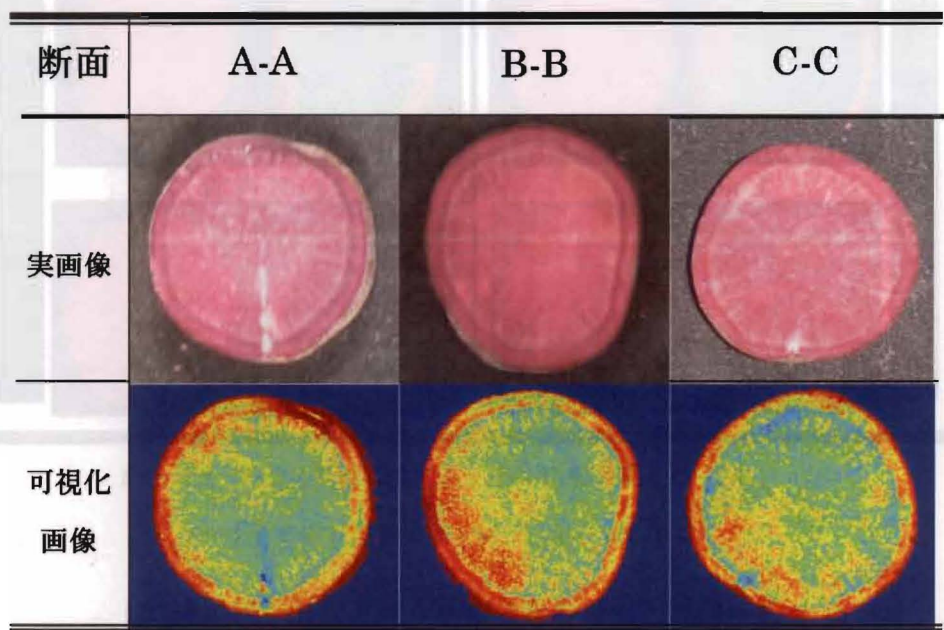
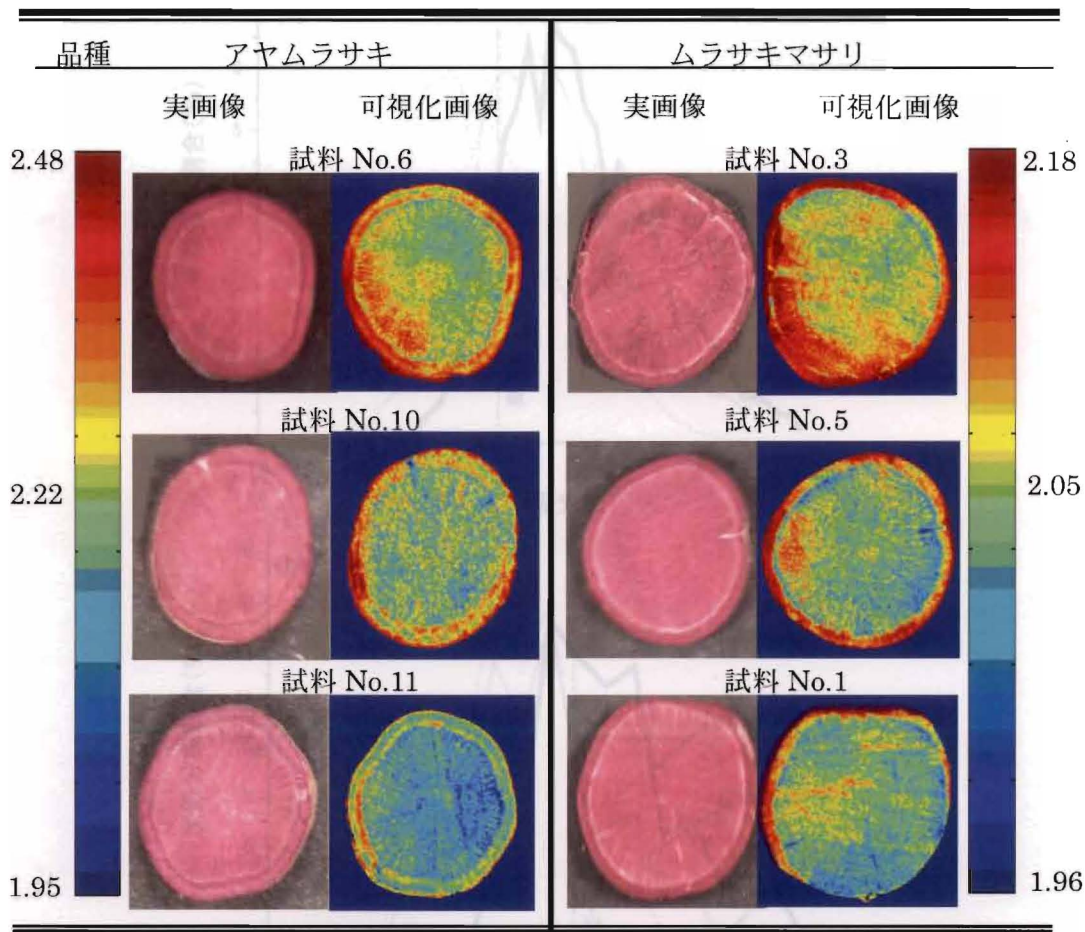


図 5-8 3 断面の可視化画像の例 (アヤマラサキ, No.6)

Fig.5-8. Anthocyanin pigment distribution map from three sections (AYAMURASAKI, No.6).

2) アントシアニン色素の度数分布

図 5-9 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。



※ カラーバーの数値はアヤマラサキで(吸光度 1.95~2.48),
ムラサキマサリで(吸光度 1.96~2.18)を表す。

図 5-9 アントシアニン色素分布の可視化画像の例

Fig.5-9. Anthocyanin pigment distribution map of samples.

Fig.5-10 Percentage of anthocyanin pigment absorbance

図 5-10 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。

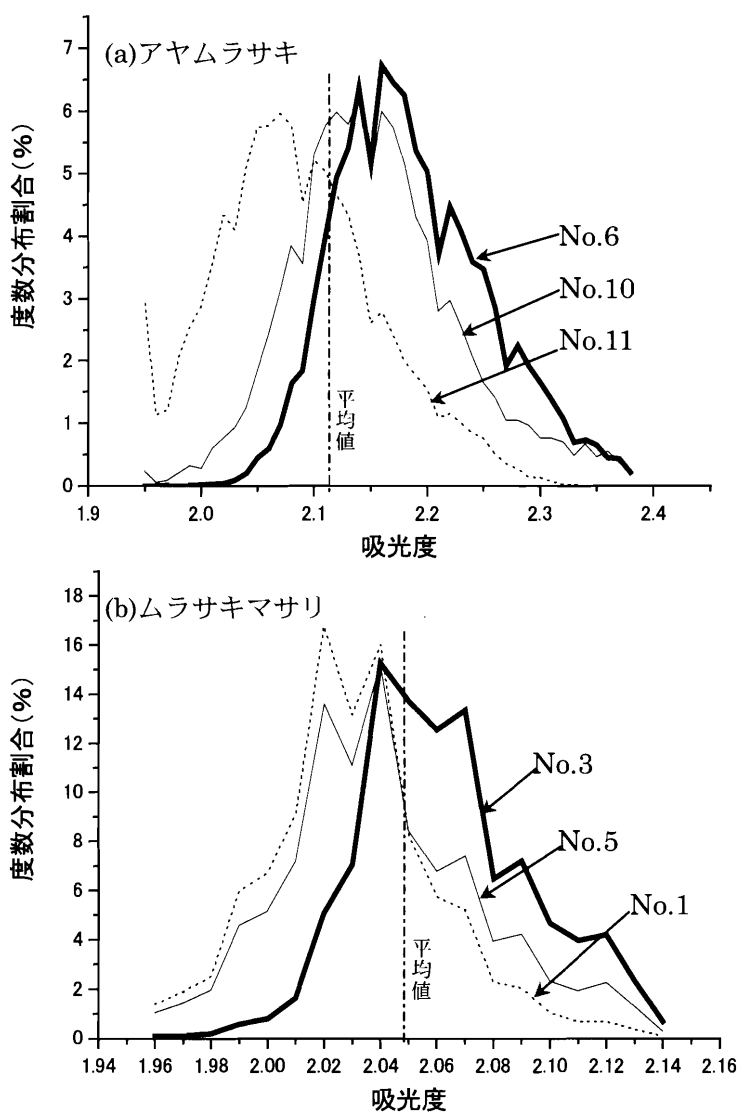


図 5-10 アントシアニン色素 (吸光度) の度数分布

Fig.5-10 Percentage of anthocyanin pigment absorbance.

3) アントシアニン色素の個体間評価

表 5-2 の平均吸光度を評価基準値として、図 5-10 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%未満を B(良)評価とする。その結果、表 5-4 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、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。

表 5-4 アントシアニン色素の品質評価

Table. 5-4. Anthocyanin pigment quality estimation.

試料 No	アントシアニン色素含有割合(%)		評価
	平均吸光度未満	平均吸光度以上	
アヤムラサキ			
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
ムラサキマサリ			
1	82	18	B
2	67	33	B
3	45	55	A
4	47	53	A
5	70	30	B
6	76	24	B

平均吸光度：アヤムラサキ 2.117, ムラサキマサリ 2.044

第5節 摘要

ハイパースペクトルイメージングを用いて、サツマイモ（アヤムラサキ、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) 分光画像は、高感度冷却 CCD カメラと液晶可変フィルターを用いて 450~600nm の可視光領域を 1nm 間隔で取得した。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490～530nm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) アヤムラサキの場合、分光画像の523nmと抽出液の525nmにおける吸光度に強い相関が認められた。523nm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) ムラサキマサリの場合、分光画像の523nmと抽出液の526nmにおける吸光度に強い相関が認められた。523nm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。

引用文献

- 1) 大庭理一郎・五十嵐喜治・津久井亜紀夫：アントシアニン-食品の色と健康-，健帛社，40-45，68-78，93，2000
- 2) 現代農業（坂本尚）：色・機能性・組み合わせて魅力の加工食品づくり，農山漁村文化協会，口絵，2002
- 3) サツマイモ Mini 白書：http://www.jrt.gr.jp/smini/sm_index.html
- 4) 大澤俊彦：色素・ポリフェノールと食品機能「長寿食のサイエンス」，木村修一編，サイエンスフォーラム，464-474，2000
- 5) 永田雅輝：農産物の品質判定・評価について，農業機械学会九州支部誌，51，59-64，2002
- 6) 植物色素研究会（足立泰二・吉玉国次郎），植物色素研究法，大阪公立大学共同出版会，扶桑社，3-19，2004

- 7) 河野俊夫・北野雅治・松岡孝尚：黒米からのアントシアニン色素抽出特性，植物環境工学，17 (2)，84-89，2005
- 8) 永田雅輝・小林太一・ジャズパ タラダ・豊田寛・後藤有美子：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 - ，植物環境工学，18 (1)，2006
- 9) ムラサキマサリ：<http://ss.knaes.affrc.go.jp/press/20011009/murasaki.html>
- 10) 宮崎県経済連：宮崎県 JA 園芸ブランド標準規格表，宮崎県園芸ブランド検査協会，2000
- 11) 近藤直，門田充司，野口伸：マシンビジョンシステム，農業ロボット (I) -基礎と理論-，コロナ社，11-80，2004
- 12) 本間念規，澤山一博他：近赤外分光によるトマトの糖度計測技術の開発，北海道工業試験場報告，302，9-14，2003
- 13) 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，149-152，1996
- 14) 岩本睦夫，河野澄夫，魚住純：近赤外分光法入門，幸書房，12-37，2002
- 15) 植松徳雄：イチゴ栽培の理論と実際，誠文堂新光社，167，174，1998
- 16) 木村進・中村敏郎・加藤博通：食品の変化の化学，光琳，69，1995
- 17) 吉永優・中谷誠・山崎昭夫・山川理：ギ酸を用いたカンショからのアントシアニン色素抽出と抽出残渣の利用，九州農業研究，第60号，38，1998
- 18) 吉永優・石黒浩二：カンショにおけるアントシアニン含量および色素成分の評価法九州農業研究，第62号，15，2000
- 19) Yoshimoto, M., Okuno, S., Kumagai, T., Yoshinaga, M., Yamakawa, O : Distribution of Antmutagenic Colored Sweetpotatoes. Reprinted from JARQ, 33(3), 143-148, 1999

第6章 イチゴのアントシアニン色素分布の評価

第1節 緒言

前章では、サツマイモ（紫イモ）断面のアントシアニン色素分布の可視化および評価を行った結果、ハイパースペクトルイメージングの有用性が認められた。本章では、熟度（着色度 1～10 分）の異なるイチゴを供試サンプルとして、可視光領域（450-600nm）のハイパースペクトルイメージングを用いて非破壊的に果皮表層から、アントシアニン色素分布の可視化およびその評価について検討した¹⁾。

第2節 イチゴとアントシアニン色素

イチゴ (*Fragaria X ananassa* Duchesne) は、明治初期ごろ種々の品種が導入され、本格的に栽培、改良が始まった。国内の主要品種は、主に九州で栽培され果実が大きく柔らかい「とよのか」、「女峰」、「ダナー」、極大粒の「アイベリー」、「あまおう」、栃木県での栽培が多い「とちおとめ」などが有名である。その他にも酸味の少ない「章姫」や「紅ほっぺ」などがある。現在では、ハウス栽培が主流となり、秋から翌年の初夏まで栽培されている。イチゴは、特有の甘い香りと赤い実が特徴であり、生で食べるだけでなく、ジャム、イチゴ酒、お菓子の材料などの加工品に用いられている。

イチゴ果実の色素はアントシアニンであり、緑色果や白色果には含まれず、催色期から急激に増加する。ようするに果実の成熟に伴ってアントシアニンが蓄積される。すなわち、イチゴの赤い色はアントシアニン色素である²⁾、と言い換えることもできる。アントシアニンは、色素本体のアントシアニンと糖が結合した色素配糖体であり、アントシアニン、糖、それぞれ異なった種類の組み合わせにより、多くの種類がある。イチゴ果実に存在するアントシアニンは約 3 種類あり、すべて非アシル化アントシアニンである。主要アントシアニンは、カリステフィン (Pg 3-glc) で約 91%の構成比率を示しており、他は Cy 3-glc, Pg 3-gal であり、ほとんど単一に近い。イチゴ果実の色は、アントシアニンの含量や比率によって決まると言われている。なお、アントシアニンは果実内に一様に分布するわけではなく、品種によって分布は異なる。例えば、図 6-1 に示すように、果肉よりも果皮に多く含まれる「章姫」などの品種もあれば、果肉の含量も果皮の含量もあまり差がな

い「あまおう」などの品種もある^{3) 4)}.

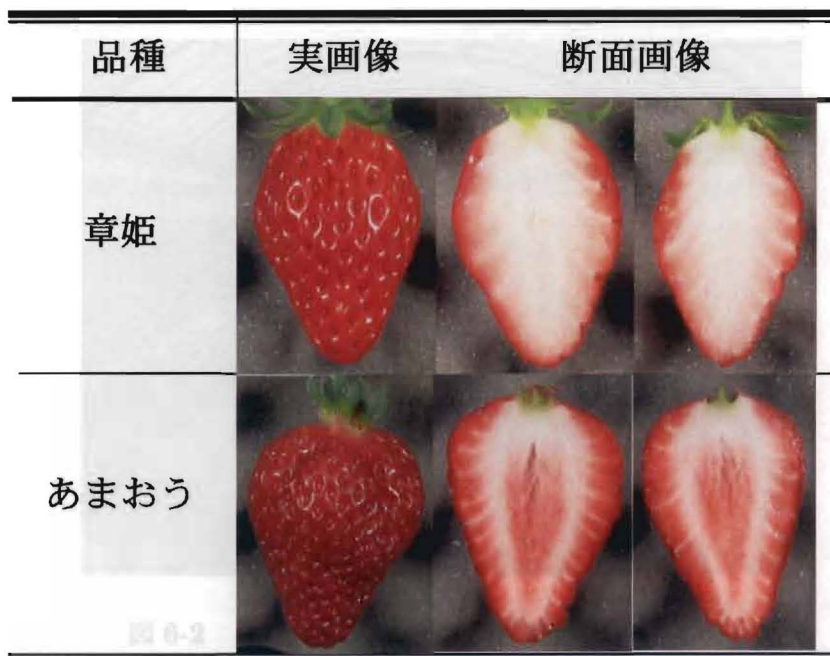


Fig.6-2. A strawberry of home cultivation (hibana, miyazaki-shi).

図 6-1 アントシアニン色素分布

Fig.6-1. Anthocyanin pigment distribution.

第3節 実験装置および方法

1. 供試イチゴ

供試したイチゴは、図 6-2 に示す、宮崎県宮崎市木花地区でハウス栽培された、品種‘章姫’である。試料は平成 17 年 1 月下旬から 4 月上旬にかけて生産農家のハウスから朝方に採取したイチゴ（計 120 個）を供試した。試料の性状は、図 6-3、表 6-1 に示す、着色度合が 1～2 分、3～6 分、7～10 分、階級は L, 2L, 3L（半径 15～20mm）、等級は A ランクである。この着色度、階級および等級の判別は、試料採取時に生産農家をお願いした。イチゴは太陽光の当たっている面の日表面と当たらない面の日裏面とに色付き（着色度）の違いがあることから⁴⁾、この両面における着色度、すなわち、アントシアニン色素の抽出および分光画像を取得することにした。

表 6-1 供試イチゴの性状

Table 6-1. Size profile of Strawberry samples.



図 6-2 ハウス栽培イチゴ (宮崎県宮崎市木花)

Fig.6-2. A strawberry of house cultivation (kibana, miyazaki-shi).



0分 3~4分 5~6分 7~8分 10分

図 6-3 供試イチゴ (品種：章姫)

Fig.6-3. Strawberry samples ('Akihime').

表 6-1 供試イチゴの性状

Table. 6-1. Size profile of Strawberry samples.

着色度	1~2分	3~6分	7~10分
重量(g)	12.83~25.32	12.56~28.91	15.03~36.17
長さ(mm)	44.00~65.50	32.20~64.90	47.05~69.20
直径(mm)	27.60~37.60	27.30~28.56	28.90~41.80

(最大値) ~ (最小値)

2. ハイパースペクトルイメージ撮影装置および画像の取得と処理

撮影装置の器具、照明などは前章と同じとした。装置内の温度環境も同様に 22℃ に設定した。この時、試料の温度は 22±0.5℃ の範囲であった。

ハイパースペクトルイメージングによる画像取得は、イチゴを安定して撮影できるように、図 6-4 に示す、くぼみのある試料架台を作成し、それに試料を置き、液晶可変フィルター(CRI 製、VS-V153-10-HC-20)を用いて 1nm 間隔で 450~600nm の範囲において、日表面および日裏面の分光画像(画像サイズ 512×726 画素)を 1 試料につき 302 枚(片面 151 枚)取得した。これらの分光画像は冷却 CCD カメラ(Apogee 製、AP2E, 14bit 階調)の画像処理ソフトウェア(Max-Im)を用いてパソコンに取込んだ。この時の撮影条件は、冷却 CCD カメラの冷却温度-15℃、シャッタースピード 1.3 秒、絞り F=8 とした。なお、画像処理は前章と同じように取得した原画像の背景およびノイズの除去、感度および照射ムラの画像補正を行い、吸光度画像の作成を行った。

3. アントシアニン色素の化学的抽出

本実験では、アントシアニン色素の抽出には 50%酢酸溶液を用いた^{4) 5)}。本実験に供試したイチゴ‘章姫’は、図 6-1 に示したように、表皮面の近くに色素が一様に沈着し、表面の着色度合からアントシアニン色素の分布評価がしやすい品種であった。そこで、色素抽出用試料は画像取得面と一致する日表面と日裏面とに果肉を分割して、その重量の 3 倍の重さの溶液に一晩(20 時間以上)浸漬した。その抽出液の透過光強度をスペクトロメーター(Avantes 製、Avaspec-2048)を用いて 490~530nm の範囲において測定し、吸光度変換を行い、最も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、その吸光度を色素の相対濃度の実測値とした。

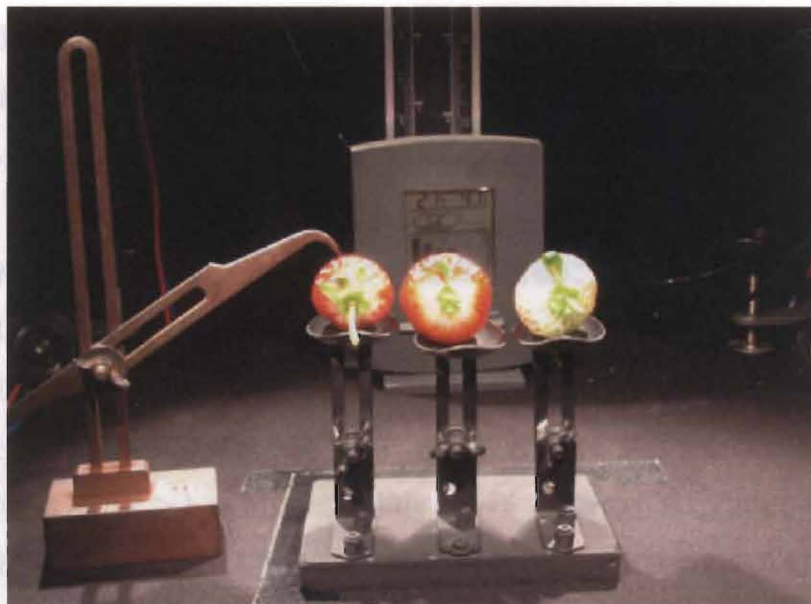


図 6-4 試料架台

Fig.6-4. A sample footstool.

4.検量線の作成および評価

検量線を作成するにあたって、試料ごとの日表面および日裏面の二面から得た分光画像の各波長における平均吸光度二次微分値を説明変数、アントシアニン色素抽出液における (λ_a) の吸光度を目的変数とした。これらの値を用いて重回帰分析し、アントシアニン色素含有を表す予測値（吸光度）を求める検量線を作成した。検量線の評価は、前章と同じ方法で行った。

5.アントシアニン色素分布の可視化および評価

1)可視化画像の作成

アントシアニン色素の分布を評価するために可視化画像を作成した。そのために着色度1~2分、3~6分、7~10分の試料の分光画像を取得し、前章と同様の画像処理を行い、画素ごとに検量線を適用してアントシアニン色素の相対濃度（吸光度）を求め、その差異をMatlab Ver6. 5.1を用いてカラーマッピング（擬似カラー）した。

2) アントシアニン色素の個体間評価

目視や実画像からでは確認しにくい個体間のアントシアニン色素の含有割合やその分布を評価するために、収穫適期（着色度7~10分）の試料を用いて、日表面および日裏面のアントシアニン色素分布の可視化画像を作成した。次に、それをもとに吸光度を0.1単位

に分け、個体ごとの度数分布を作成し、それを比較することでアントシアニン色素の分布割合の個体間評価を行った。評価の方法は、A（優）および B（良）の二段階判定とし、抽出液の平均吸光度（着色度 7～10 分の日表面と日裏面の平均値）を評価基準値と定めて、分布波形から平均吸光度以上の面積割合が 50%以上であれば A、50%未満であれば B とした。

6.画像取得時の撮影距離がアントシアニン色素の予測値に及ぼす影響

本実験では、撮影距離（試料の最高部位からカメラまでの距離）は常に一定（650mm）とした。しかし、イチゴではその最高部位と側面の高低差が最大で 20mm あったことから、被写界深度を出来る限り深く（絞り値 $F=8$ ）することで画像がボケないように調整した。そこで、この高低差がアントシアニン予測精度に及ぼす影響の有無についても検討してみた。測定は着色度 3～6 分および 7～10 分の試料を用いて、果皮表層部から縦 15×横 15×厚 5（mm）の試験片を作成し、撮影距離を 650mm から 5mm 間隔で 670mm までの 5 段階における分光画像を取得し、それらを 4 項の検量線に適用してアントシアニン色素（吸光度）の予測値を求めて、影響の有無を調べた。

第4節 結果および考察

1.アントシアニン色素の波長解析

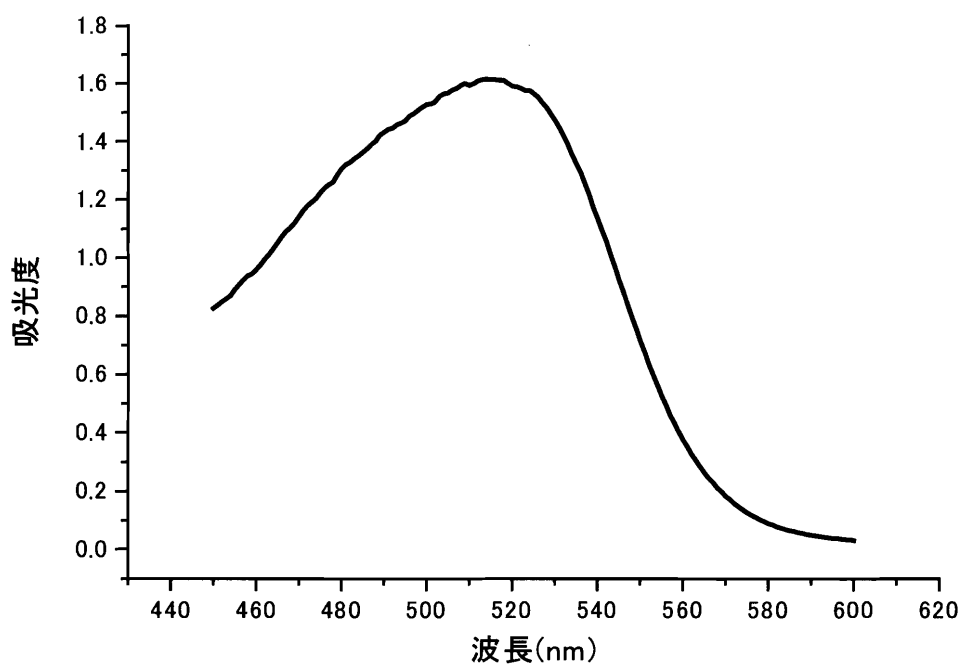
1) 抽出液の吸光度および吸光度二次微分スペクトル

化学的抽出法によるアントシアニン色素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は図 6-5 に示すように、504nm, 509nm, 512nm, 518nm および 524nm において強い吸収が見られた。本実験での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 $\lambda_a = 504\text{nm}$ と決定した。表 6-2 は検量線作成用および検量線評価用に用いた試料の着色度ごとの日表面と日裏面の吸光度を示した。これより、着色が進むにつれて吸光度は高くなり、また、日表面が日裏面より吸光度は高く、その差は着色度 1～2 分で 0.024, 3～6 分で 0.136, 7～10 分で 0.171 となり、着色が進むにつれ広がっていることが判った。

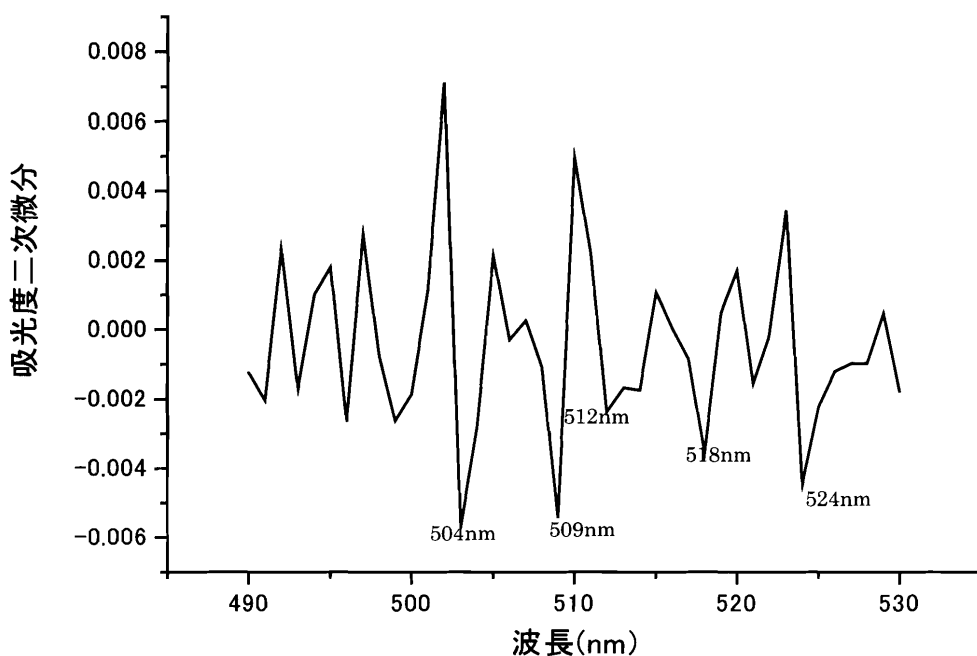
表 6-2 抽出液の吸光度測定値

Table. 6-2. Basic data of absorbance by extracted liquid of anthocyanin pigment.

	検量線作成試料 (80 試料)					
	1~2分		3~6分		7~10分	
	日表面	日裏面	日表面	日裏面	日表面	日裏面
平均	0.062	0.038	0.477	0.341	1.466	1.295
最大	0.127	0.088	1.166	0.785	1.908	1.835
最小	0.018	0.016	0.207	0.112	0.698	0.560
標準偏差	0.024	0.018	0.252	0.214	0.314	0.388
	検量線評価試料 (40 試料)					
平均	0.039	0.022	0.485	0.395	1.489	1.253
最大	0.104	0.054	1.347	1.148	1.846	1.854
最小	0.021	0.014	0.133	0.110	0.825	1.014
標準偏差	0.019	0.018	0.312	0.302	0.272	0.303



(a) 吸光度スペクトル



(b) 吸光度二次微分スペクトル

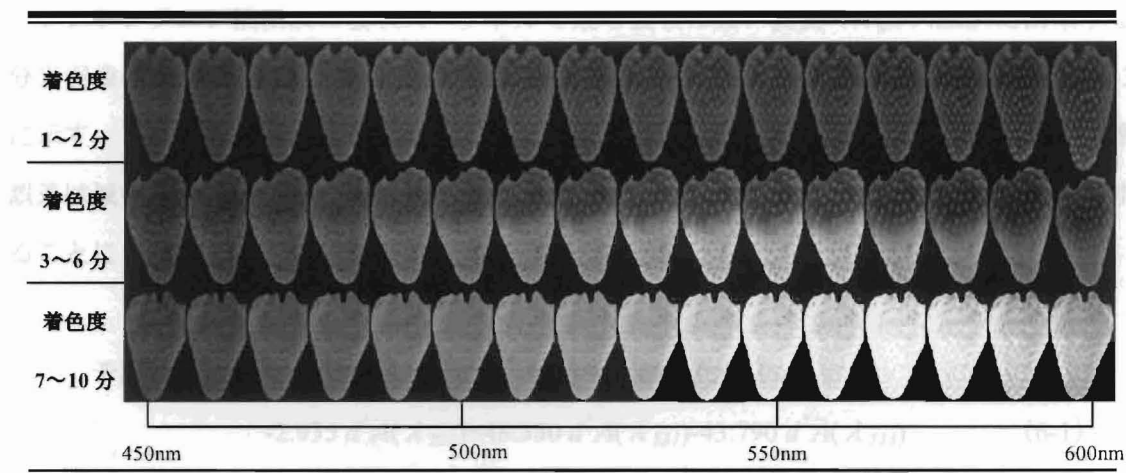
図 6-5 抽出液の吸光度スペクトルおよび吸光度二次微分スペクトルの解析

Fig.6-5. Absorbance and 2nd derivative absorbance spectra of extracted material.

2) 分光画像の吸光度二次微分スペクトル

図 6-6 はハイパースペクトルイメージングで撮影した 450~600nm における分光画像の一例を示す。ここでは 10nm ごとの分光画像（吸光度）を着色度別に示した。これらの分光画像から果実面の吸収（濃度）が明確に判断できる。この分光画像を用いてアントシアニン色素の吸収波長である 490~530nm の波長域において、着色度ごとの分光画像による吸光度二次微分スペクトルを図 6-7 に示した。いずれの着色度においても 508nm, 512nm および 514nm の波長で強い吸収が見られた。

これらの吸収波長を図 6-5 における抽出液の吸収波長と比較したところ、分光画像による 508nm, 512nm および 514nm は、抽出液の 504nm, 509nm および 512nm に類似する吸収波長であることより、ハイパースペクトルイメージングによるアントシアニン色素評価の適用性が確認できた。なお、分光画像からの吸収波長と抽出液からの吸収波長に 2~4nm 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。



※10nm ごとの分光画像（吸光度）を配列

図 6-6 分光画像の一例

Fig.6-6. An example of spectral imaging.

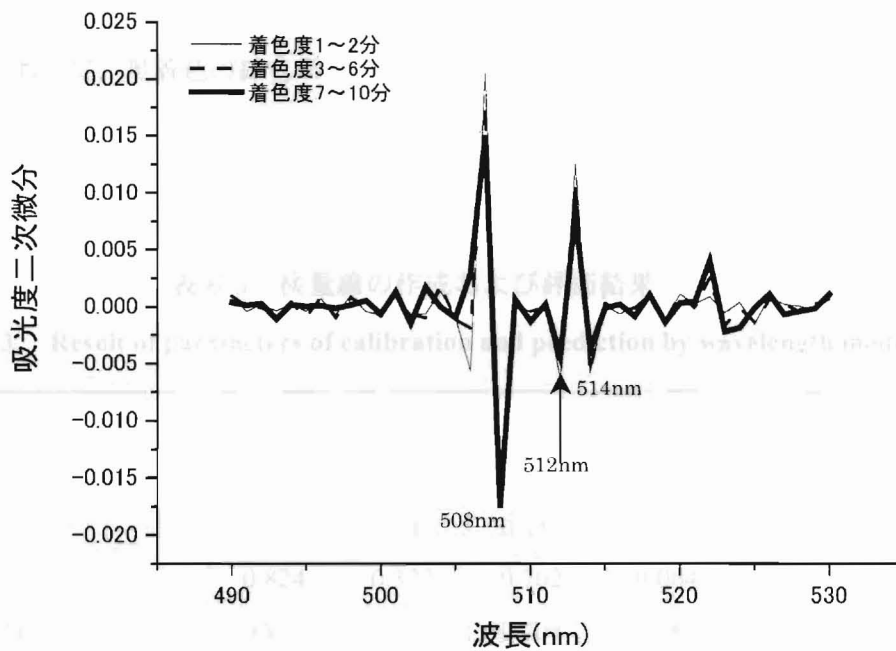


図 6-7 分光画像による吸光度二次微分スペクトルの解析

Fig.6-7. Second derivative spectra from spectral imaging.

2. 検量線の作成と評価

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 :504nm) に由来する分光画像の 508nm を第 1 波長として, 5 波長までの検量線の作成結果と評価結果を表 6-3 に示す. これより, 選択波長が増加すると, 重相関係数は高くなり, 検量線評価時の標準誤差は減少した. よって, 本研究では 5 波長 ($\lambda_{508} \lambda_{506} \lambda_{507} \lambda_{531} \lambda_{533}$) の検量線を採用することにした. その時の検量線は, 次式の通りである.

$$\begin{aligned} \text{予測値 (A}_p\text{)} = & -0.313 - 33.699 d^2A(\lambda_{508}) + 22.694 d^2A(\lambda_{506}) \\ & - 2.935 d^2A(\lambda_{507}) + 48.350 d^2A(\lambda_{531}) - 43.790 d^2A(\lambda_{533}) \end{aligned} \quad (6-1)$$

ここで, $d^2A(\lambda)$ は λ の各波長(nm)における平均吸光度二次微分値である. この場合の予測値 (A_p) は $R=0.932$, $SEC=0.165$, $SEP=0.213$ となり, 良好な評価精度が得られた. この時の予測値 (A_p) と実測値 (A_m) の関係を図 6-8 に示した. これより, アントシアニン色素含有が著しく低い場合, すなわち, 無着色の果実は予測値 (A_p) が負となり検量線に適合しなかった. このことは, イチゴのアントシアニン色素は催色期から急激に増加するもので, 無着色の緑色果や白色果には含まれないと言われていることと一致するものである⁴⁾.

表 6-3 検量線の作成および評価結果

Table. 6-3. Result of parameters of calibration and prediction by wavelength models.

選択波長 $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5$	検量線作成		検量線評価		
	R	SEC	R	Bias	SEP
508	0.285	0.545	0.318	-0.030	0.553
508,506,	0.824	0.322	0.702	0.064	0.417
508,506,507	0.831	0.316	0.708	0.084	0.414
508,506,507,531	0.900	0.248	0.870	0.035	0.288
508,506,507,531,533	0.957	0.165	0.932	0.032	0.213

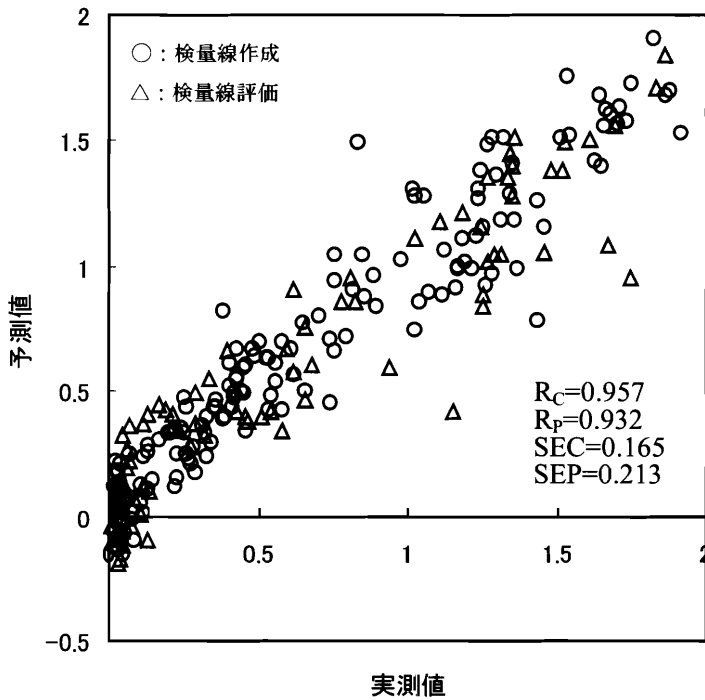


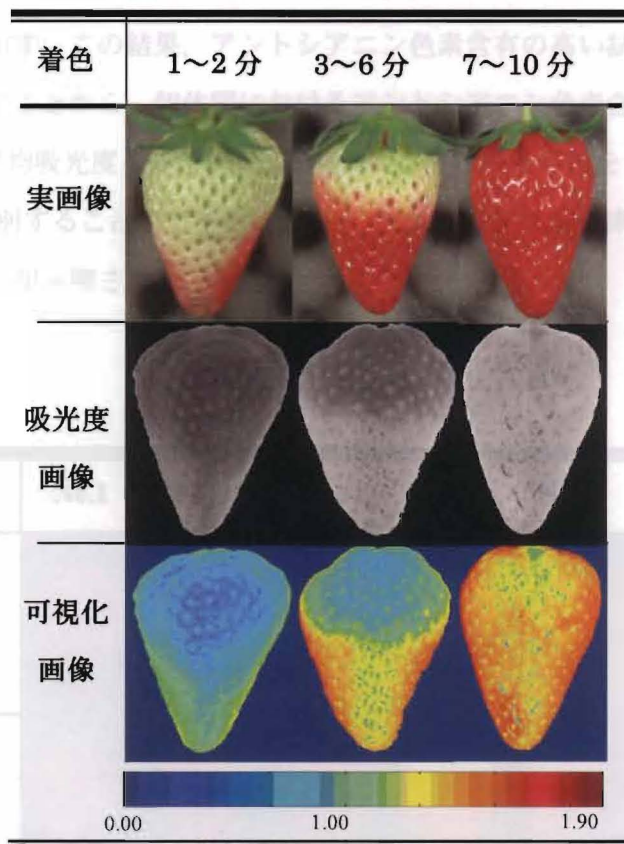
図 6-8 5 波長検量線による予測値と実測値の関係

Fig.6-8. Relationship between measured and predicted anthocyanin pigment absorbance (five wavelength) .

3. アントシアニン色素分布の可視化および評価

1) 可視化画像の作成

図 6-9 は、(6-1) 式を用いて作成した可視化画像 (A_p は 0.0~1.9 で表示) の一例を示すが、実画像および吸光度画像も併記した。これより、着色が 1~2 分, 3~6 分, 7~10 分と進むにつれて、果頂部から果梗部へとアントシアニン色素が蓄積していることが明確に判断できる⁴⁾。このことは、アントシアニン色素の蓄積状態を詳細にとらえることができるもので、色素評価の手段として有効であることが示唆された。



※カラーバーの数値は $A_p(0.0\sim 1.9)$ を表す

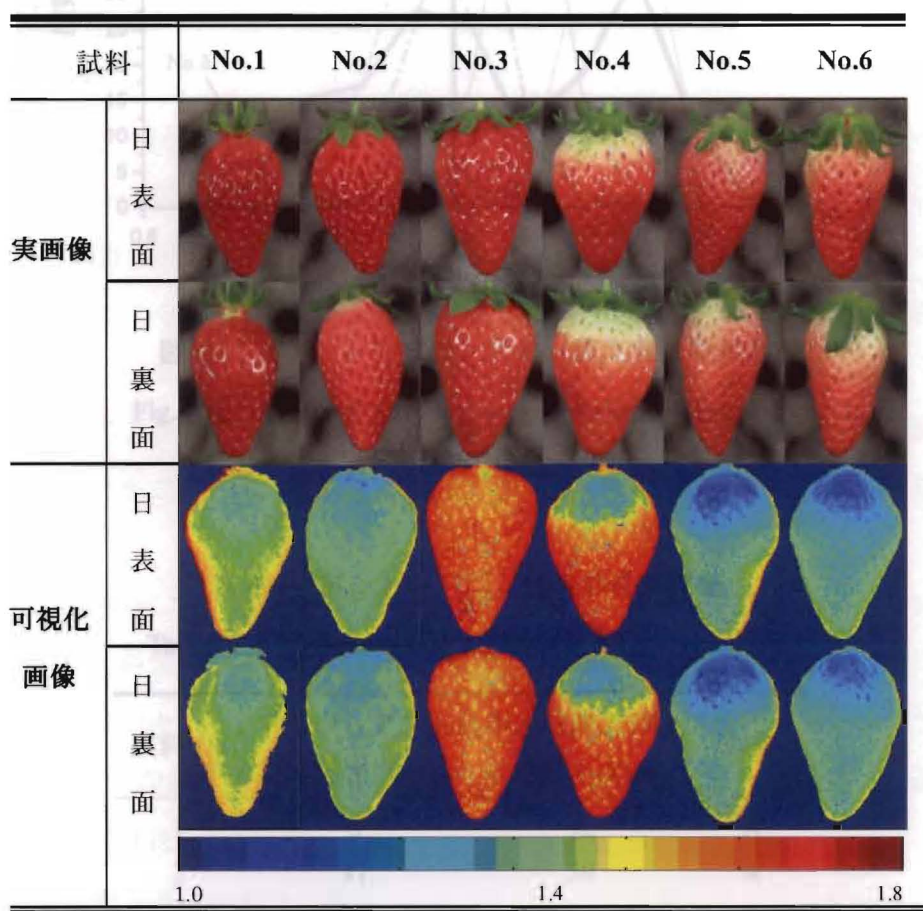
図 6-9 可視化画像の例

Fig.6-9. Anthocyanin pigment distribution map.

2) アントシアニン色素の個体間評価

図 6-10 は、10 分着色 (No.1~No.3) および 7~8 分着色 (No.4~No.6) の実画像に対する可視化画像 (強調するため A_p は 1.0~1.8 で表示) の結果の一例を示す. 実画像で示すように 10 分着色 (No.1~No.3) の果実間では、目視的に若干の濃淡差が見られるものの、ほぼ同じ赤色を示しているが、可視化画像の結果は No.3 においてアントシアニン色素の含有が多く見られた. 7~8 分着色 (No.4~No.6) の果実間でも同様に、実画像で示すように同一の赤色に見えるが、可視化画像の結果は No.4 においてアントシアニン色素の含有が多く見られた. このことは、果実の着色中にアントシアニン色素を含む波長 (検量線の 5 波長) が多く存在することを意味するものである. このように、目視では確認しにくいアントシアニン色素の多少および分布ムラを、ハイパースペクトルイメージングを用いることで、精細に表現することができた.

図 6-11 は、図 6-10 の可視化画像をもとに作成した個体ごとのアントシアニン色素の分布割合（度数分布）を示す。この結果、アントシアニン色素含有の高い試料は、低い試料より右側でピークを示すことから、個体間におけるアントシアニン色素含有の評価の判断は容易である。次に、平均吸光度 1.381 を評価基準値にして二段階評価をした結果は、表 6-4 のように A と B に区別することができることから、アントシアニン色素の含有を果実ごとに相対評価できることが示唆された。



※ カラーバーの数値は $A_p(1.0\sim 1.8)$ を表す

図 6-10 アントシアニン色素分布の可視化画像の例（7～10 分着色）

Fig.6-10. Anthocyanin pigment distribution map of samples (70%-Fully ripeness).

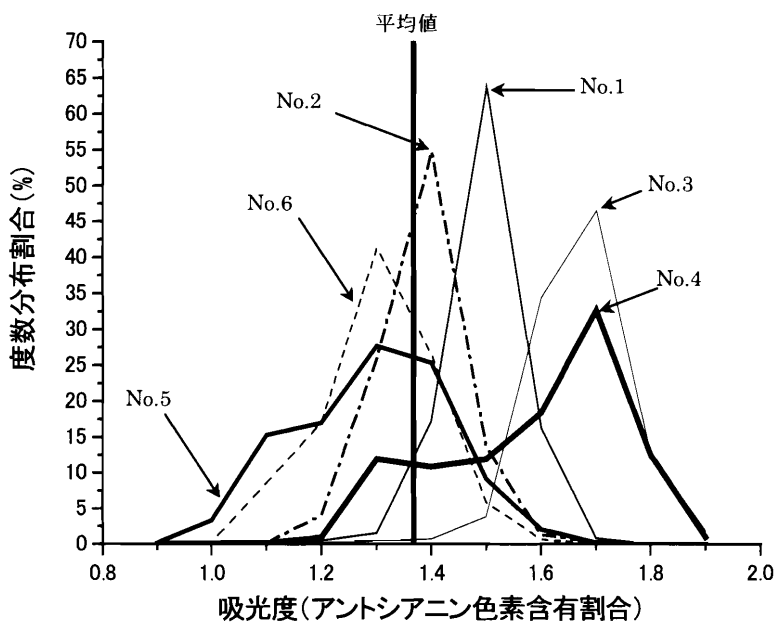


図 6-11 アントシアニン色素（吸光度）の度数分布

Fig.6-11. Percentage of anthocyanin pigment (absorbance).

表 6-4 アントシアニン色素の品質評価

Table. 6-4. Anthocyanin pigment quality estimation.

試料 No	アントシアニン色素含有割合(%)		評価
	平均吸光度未満	平均吸光度以上	
1	8	92	A
2	41	59	A
3	4	96	A
4	15	85	A
5	63	37	B
6	67	33	B

4. 画像取得時の撮影距離がアントシアニン色素の予測値に及ぼす影響

カメラ高さ 650mm から 670mm までの撮影距離の影響によるアントシアニン色素の予測値（5 波長） A_p は、着色度 3~6 分で 0.86~0.89, 着色度 7~10 分で 1.10~1.14 の範囲にあり、 A_p の差は 0.03~0.04 と極めて小さかった。今回のイチゴのような果実では、撮影距離の影響は無視できた。

第5節 摘要

(1) 品質評価・検査システムの開発研究の一環として、ハイパースペクトルイメージングによるイチゴのアントシアニン色素の評価を行った。

(2) 分光画像は、高感度冷却 CCD カメラと可変液晶可変フィルターを用いて 450-600nm の可視光領域を 1nm 間隔で取得した。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の作成を行った。

(3) アントシアニン色素は、抽出液（50%酢酸に 20 時間以上浸漬）の吸光度二次微分スペクトルから 490~530nm の範囲で最も吸収の強い波長を選んだ。

(4) 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目的変数、化学的抽出法で最も吸光度の強い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。

(5) 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。

(6) 分光画像の 508nm と抽出液の 504nm における吸光度には強い関係が認められた。508nm 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 $R=0.932$, 標準誤差 $SEP=0.213$ 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、ハイパースペクトルイメージングの有用性を確認した。

(8) 撮影距離による影響は、設定値から 20mm 程度の差ではアントシアニン含有の予測精度になんら支障はなかった。

引用文献

- 1) 小林太一・永田雅輝・後藤有美子・豊田寛・ジャズパ タラダ：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2報 イチゴのアントシアニン色素分布の可視化 - ，植物環境工学，18 (1)，2006
- 2) 池上正子：新鮮おいしい野菜と果物をみつける本，永岡書店，148-149，2003
- 3) 大庭理一郎・五十嵐喜治・津久井亜紀夫：アントシアニン-食品の色と健康-，健帛社，40-45，68-78，93，2000
- 4) 植松徳雄：イチゴ栽培の理論と実際，誠文堂新光社，167，174，1998
- 5) 植物色素研究会（足立泰二・吉玉国次郎），植物色素研究法 植物色素研究会編，大阪公立大学共同出版会，扶桑社，3-19，2004

第7章 イチゴの糖度予測の試み

第1節 緒言

第5章および第6章では、目的とする品質成分のアントシアニン色素の吸収帯が490～530nm 近傍の可視光領域に存在するため、450～600nm の範囲における分光画像データを用いて、アントシアニン色素の分布状態評価を行った。また、筆者らは本手法を用いた可視光領域（450～650nm）でイチゴの糖度予測を行った結果¹⁾、一定の成果を得ている。しかし、青果物の糖の吸収帯は近赤外領域の存在することが河野^{2) 3)}、McGlone⁴⁾らによって報告されている。そこで、本章では近赤外領域（650～1000nm）の分光画像データを用いた回帰分析で糖の吸収帯を特定し、検量線の開発を行った⁵⁾。

第2節 実験装置および方法

1. 供試イチゴ

供試したイチゴ (*Fragaria X ananassa* Duchesne) は、宮崎県宮崎市木花地区で栽培された品種‘章姫’である。試料は、平成17年1月下旬～4月上旬にかけて生産農家のハウスから朝方に採取（合計270個）した。着色度合は、1～2分、3～6分、7～10分、階級はL、2L、3L、等級はAランクである。この着色度、階級および等級の選別は、試料採取時に生産農家をお願いした。表7-1は、供試イチゴの性状を示す。

表7-1 供試イチゴの性状

Table. 7-1. Size profile of Strawberry samples.

着色度	1～2分	3～6分	7～10分
個数	90	90	90
重量(g)	13.00～29.70	14.35～29.42	16.13～33.81
長さ(mm)	49.80～65.60	49.20～67.00	49.20～72.40
直径(mm)	26.10～38.20	25.20～37.20	29.65～39.00

(最小値) ～ (最大値)

2.ハイパースペクトルイメージ撮影装置および画像の取得とその処理

図 7-1 に近赤外領域用のハイパースペクトルイメージング撮影装置を示す。本装置の主な構成は、前述した可視光用の撮影装置と同じであるが、光源部および分光部を近赤外領域に感度を有するものとした。光源部には、ハロゲンランプ (EKE 21V 150W, USHIO) を光源とする光ファイバー照明装置 (PL950 DC, DOLAN-JENNER) を用いた。分光部には 650-1100nm の波長レンジを有する近赤外域用液晶可変フィルター (CRI 製, VS-NIR-20-10) を用いて被写体上方 650mm に設置した。この時、被写体最高部位とフィルター先端は常に同じ高さとした。撮影装置内の温度環境は、スポットエアコンを用いて 20℃ に設定した。

撮影条件は、CCD カメラの冷却温度を -15℃ に設定し、シャッタースピードを 0.4 秒、絞りを $F=8$ とし、画像処理ソフトウェア Max-Im を用いて、イチゴ表面を 5nm 間隔で 650-1000nm の範囲において、試料ごと 71 枚の画像をパソコンへ取り込んだ。なお、画像処理は第 5 章と同じであり、試料ごとの吸光度画像から平均吸光度二次微分値を求めた。

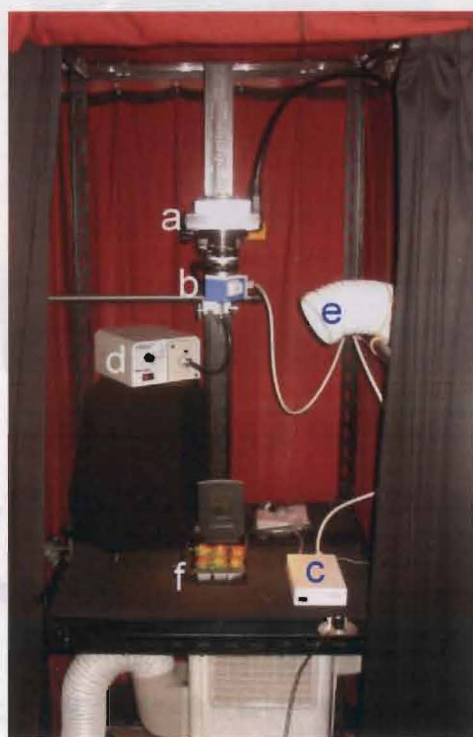


図 7-1 ハイパースペクトルイメージング撮影装置 (近赤外領域用)

Fig.7-1. Hyper-spectral imaging setup consisted of (a) Apogee AP2EE camera, (b) CRI NIR Varspec LCTF, (c) Varspec Controller Box, (d) Dolan-Jenner Fiber-Lite PL950, (e) Cooler and (f) Sample stage.

3.糖度測定

第3節 結果および考察

糖度は図 7-2 に示す、液体の屈折率から測定するデジタルブリックス計（京都電子工業製，RA-410）を用いて測定した。糖度測定の部位は、画像取得面と一致する果実表層（厚さ 3~4mm）とし、中央部分を取り除いた切片とした。その切片から果汁を絞って BriX 値を求めた。



図 7-2 ブリックス計 (RA-410)

Fig.7-2. Brix measurement device (RA-410).

4.イチゴ糖度の吸収帯と検量線の作成および評価

イチゴ糖度の吸収帯は、分光画像の各波長における吸光度二次微分と糖度 (Brix 値) の相関スペクトルから求めた。糖度予測の検量線は、糖度の吸収帯を第 1 波長として、重回帰分析により作成した。ここで、二次微分値を用いたのは、試料表面の物理的な違いによるスペクトルのズレの補正や、重なりあった吸収ピークの分離などの効果が期待されるためである。なお、検量線の作成は、1~10 分着色、1~2 分着色、3~6 分着色および 7~10 分着色の 4 区分とした。検量線の評価は、第 5 章と同じ方法で行った。

第3節 結果および考察

1. 供試イチゴの糖度

供試したイチゴの Brix 値を, 着色度別, 検量線の作成用および評価用別に表 7-2 に示す. 着色度別に糖度を比較してみると, 平均的ベースで 1~2 分着色において作成用が 7.73%, 評価用が 7.61%, 3~6 分着色において作成用が 7.84%, 評価用が 8.01%, 7~10 分着色において作成用が 8.53%, 評価用が 8.81% となり, 着色度が増すに従って Brix 値は大きくなり, 成熟が進むと糖が蓄積され甘くなるという一般的に言われている結果と一致した⁶⁾. 着色区分ごとの糖度分布は, 1~2 分の作成用および 7~10 分の評価用において, やや大きかったものの, それほど顕著な傾向は見られなかった. なお, 全体の糖度の分布範囲は 5.60~10.39% であった.

表 7-2 供試イチゴの糖度範囲

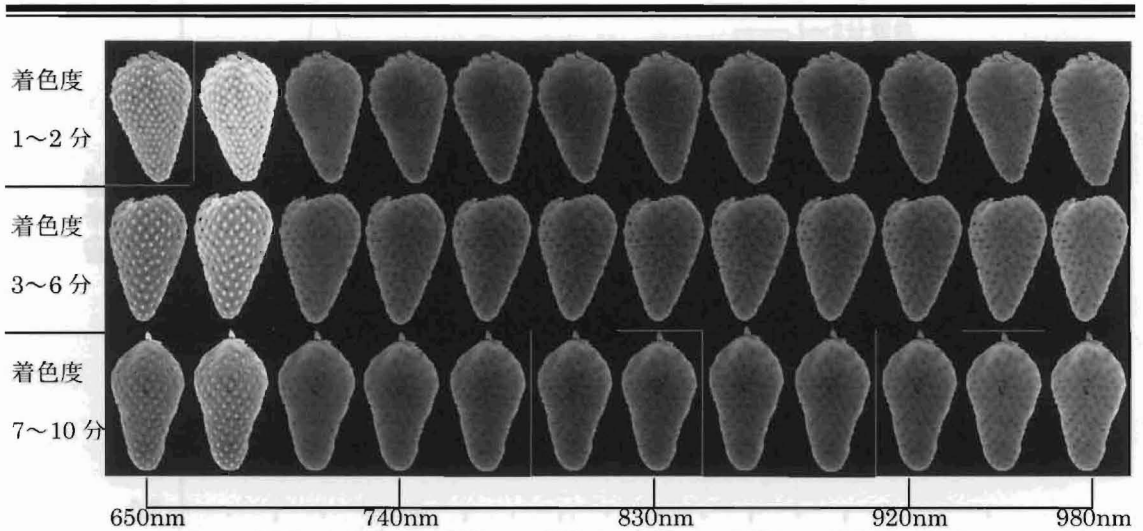
Table. 7-2. Sugar content of Strawberry.

着色度	検量線	個数	糖度範囲 (%)	平均 (%)	標準偏差
1~2 分	作成用	60	5.60~9.29	7.73	0.90
	評価用	30	6.69~9.02	7.61	0.62
3~6 分	作成用	60	6.71~9.45	7.84	0.66
	評価用	30	6.55~9.27	8.01	0.62
7~10 分	作成用	60	6.83~9.72	8.53	0.63
	評価用	30	6.43~10.39	8.81	0.83

2. 分光画像の近赤外吸光度スペクトルおよび吸光度二次微分スペクトル

図 7-3 は, ハイパースペクトルイメージングで撮影した 650~1000nm における分光画像の一例を示す. ここでは 650 nm, 680 nm, 710 nm, 740 nm, 770 nm, 800 nm, 830 nm, 860 nm, 890 nm, 920 nm, 950 nm および 980nm の分光画像を着色度別に示した. これらの分光画像は吸光度画像へと補正したものであり, 光の吸収が大きいほど白く写しだされている. 各着色度において, 680nm および 980nm の分光画像は白く写しだされた. これは, クロロフィルおよび水に由来される吸収帯であると推察される. 680nm の分光画像を着色度別に比較すると, 1~2 分着色が最も白く, 次に 3~6 分着色, 7~10 分着色の順となって

いる。これは、一般的に言われている、果実の成熟に伴ってクロロフィルが減少しているものであり、分光画像（吸光度画像）からも詳細に示すことが確認された。



650,680,710,740,770,800,830,860,890,920,950,980nm の分光画像（吸光度）を配列

図 7-3 分光画像の一例

Fig.7-3. An example of NIR spectral imaging.

これらの分光画像を用いて、着色度ごとに作成した吸光度スペクトルを図 7-4 に示す。この結果、前述したように、675nm および 980nm で強い吸収が観察された。各着色度における 675nm の吸光度の差も、同様の結果であった。また、730~950nm の波長域においては、吸光度の顕著な差は見られなかった。図 7-3 における分光画像と比較しても、同波長域では一様の濃淡を示している。以上のことから、ハイパースペクトルイメージングで撮影した分光画像は、明確に吸光度スペクトルへ変換されていることが確認できた。

この吸光度スペクトルは試料ごとにベースラインが上下にシフトしていた。また、本実験の目的である糖の吸収帯も判断しにくい。そこで、このような上下方向のシフトの軽減、微小ピークを明確にすることを目的に、二次微分処理を行った。その二次微分スペクトルを図 7-5 に示す。二次微分処理によって、吸光度スペクトルの上向きピークは、逆に下向きのピークとなって示される⁷⁾。その結果、吸光度スペクトルでは吸収帯が確認できなかった波長においても、吸光度二次微分スペクトルでは下向きのピークが確認でき、微小な吸収を明確にすることができた。ここで、糖度の吸収帯とされる 910nm 近傍において吸収が確認された。

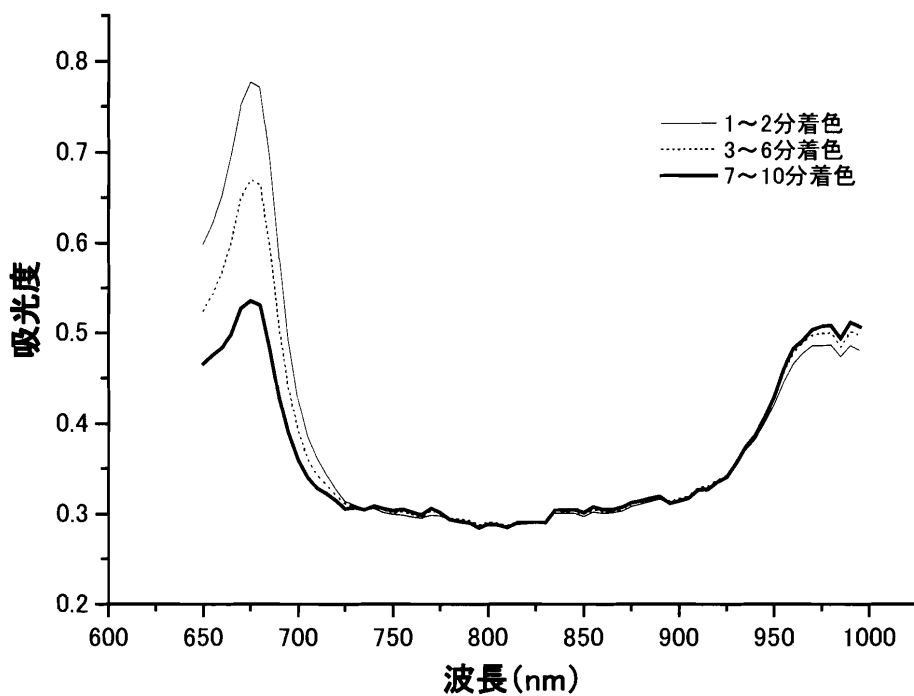


図 7-4 吸光度スペクトル

Fig.7-4. Absorbance spectra.

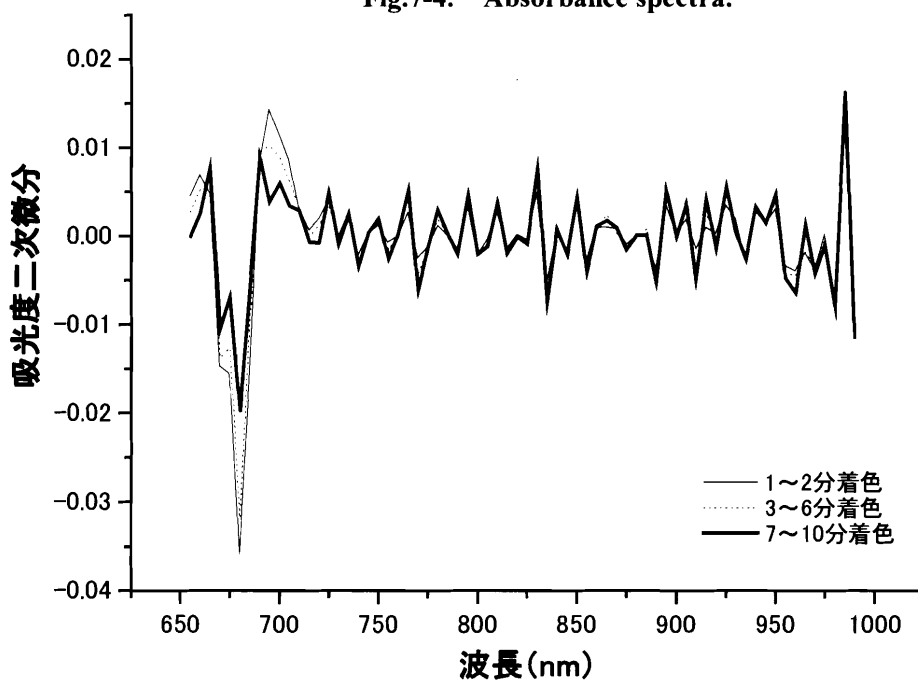


図 7-5 吸光度二次微分スペクトル

Fig.7-5. 2nd derivative absorbance spectra.

3.検量線の作成および評価

1) 1~10分着色における検量線

1~10分着色の試料を用いて、糖に由来される波長を用いた検量線を作成するため、各波長の吸光度二次微分値と糖度の相関係数を求めた。その結果を図7-6に示す。ここでは二次微分値を用いているため、糖度の吸収は負のピークとなっている。これより、最も負の相関係数が高くなったのは695nmであった。これはクロロフィルに由来する吸収波長と推察される。また、糖の吸収波長と推察される910nmで負の相関が認められた。

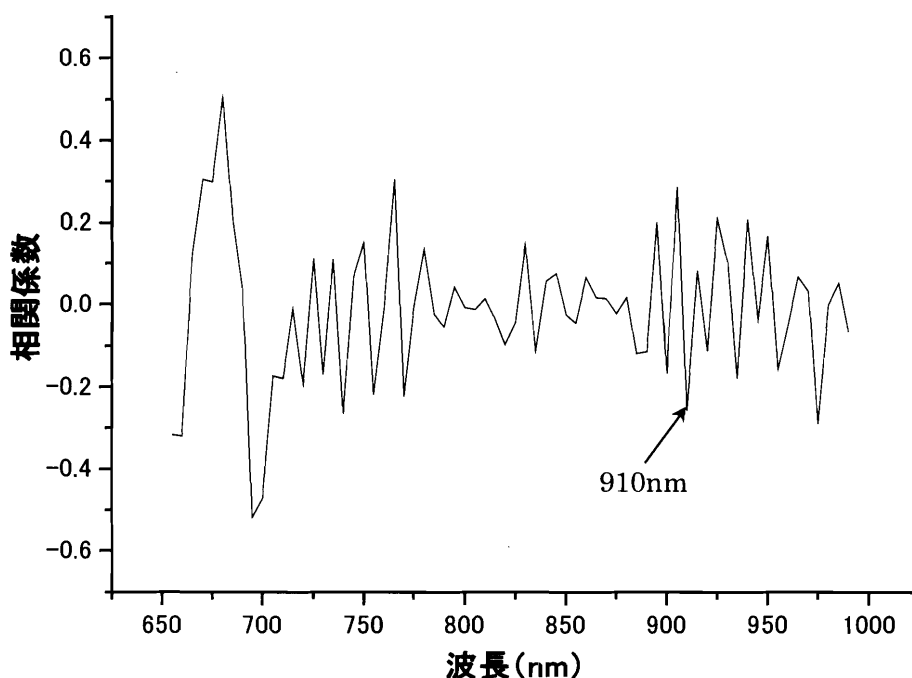


図 7-6 イチゴの Brix 値と二次微分吸光度値の相関係数 (1~10分着色)

Fig.7-6. Correlation coefficient of the 2nd derivative absorbance value with Brix strawberry (10%-Fully Ripeness).

そこで、糖の吸収波長と推察される 910nm を第一波長として 5 波長までの検量線の作成および評価を行った。その結果を、表 7-4 に示す。これより、選択波長が増加すると、重相関係数は高くなり、検量線評価時の標準誤差は減少した。よって 910nm, 695nm, 680nm, 885nm および 690nm の 5 波長を用いた重回帰式を、1~10分着色におけるイチゴの糖度測定用の検量線として採用した。以下に検量線の式を示した。

$$\begin{aligned} \text{予測値} = & 9.501 - 25.176 d^2A(\lambda_{910}) - 52.066 d^2\bar{A}(\lambda_{695}) \\ & + 25.879 d^2\bar{A}(\lambda_{680}) - 52.305 d^2\bar{A}(\lambda_{885}) - 29.814 d^2\bar{A}(\lambda_{690}) \end{aligned} \quad (7-1)$$

ここで、 $d^2A()$ は()内の波長(nm)における平均吸光度二次微分値である。

この場合の予測値は R=0.690, SEC=0.628, SEP=0.614 となった。この時の予測値と実測値の関係を図 7-7 に示した。今回の測定精度は、これまでに報告されているモモやリンゴなどの糖度予測精度と比較すると、実用上十分な精度とは言えない。

そこで本研究では、試料を 1~2 分, 3~6 分および 7~10 分と 3 段階の着色度区分に分けて、検量線の作成を行った。

表 7-3 検量線の作成および評価結果 (1~10 分着色)

Table. 7-3. Result of parameters of calibration and prediction by wavelength models (10%-Fully Ripeness).

選択波長 $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5$	検量線作成		検量線評価		
	R	SEC	R	Bias	SEP
910	0.257	0.767	0.300	0.165	0.810
910,695	0.523	0.678	0.592	0.068	0.687
910,695,680	0.586	0.649	0.685	0.048	0.626
910,695,680,885	0.609	0.637	0.689	0.047	0.621
910,695,680,885,690	0.626	0.628	0.690	0.008	0.614

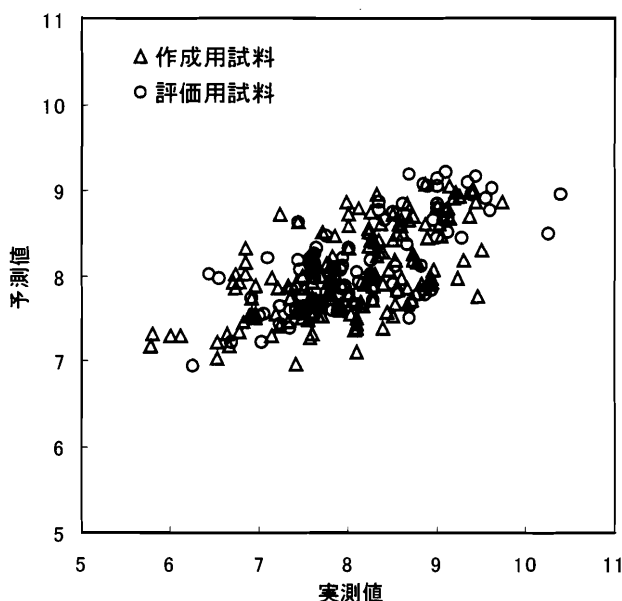


図 7-7 5 波長検量線による予測値と実測値の関係 (1~10 分着色)

Fig.7-7. Plot of measured and predicted sugar content (% Brix) using the calibration set (10%-Fully Ripeness).

2) 1~2分着色における検量線

1~2分着色の試料を用いて、糖に由来される波長を用いた検量線を作成するため、各波長の吸光度二次微分値と糖度の相関係数を求めた。その結果を図7-8に示す。これより、最も負の相関係数が高くなったのは700nmであった。これはクロロフィルに由来する吸収波長と推察される。また、糖の吸収波長と推察される910nmで負の相関が認められた。

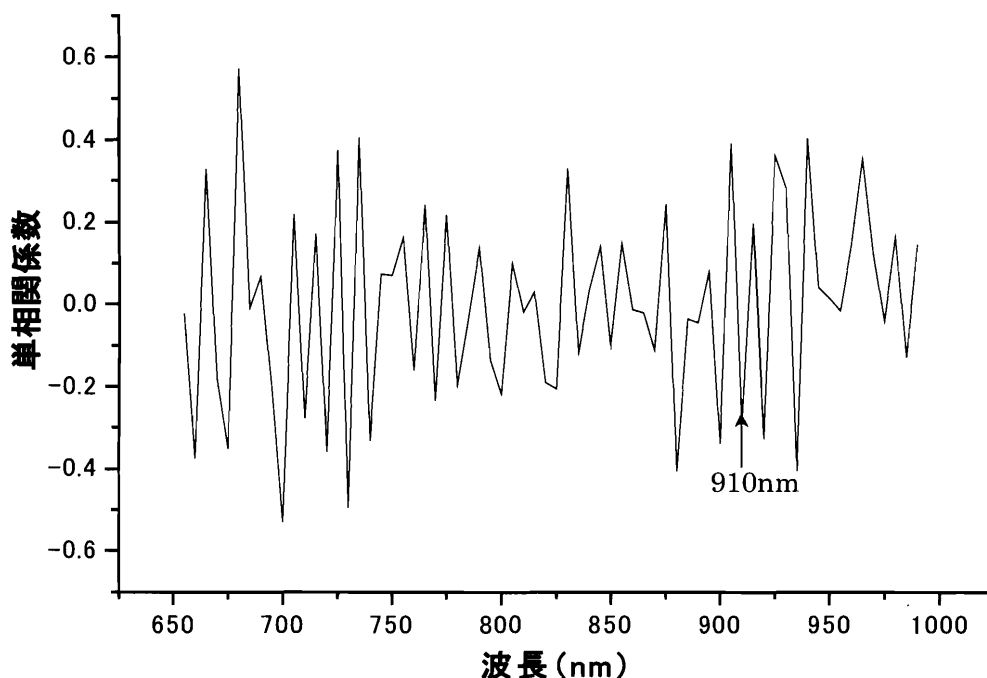


図7-8 イチゴのBrix値と二次微分吸光度値の相関係数(1~2分着色)

Fig.7-8. Correlation coefficient of the 2nd derivative absorbance value with Brix strawberry (10-20% Ripeness).

そこで、糖の吸収波長と推察される910nmを第一波長として5波長までの検量線の作成および評価を行った。その結果を、表7-4に示す。1~5波長までの検量線を見ると、選択された波長数が増えるほど、重相関係数(R)は大きくなり、検量線作成時における標準誤差(SEC)は減少した。しかし、検量線評価時における標準誤差(SEP)は4波長の検量線で最も小さくなり、5波長ではこれより大きくなった。つまり、5波長の検量線は、検量線作成用試料のみに適合し、それ以外の未知試料(ここでは評価用試料)には適合せず、過剰適合となったことを示した。すなわち、5波長の検量線ではオーバーフィッティングの現象が観察された。よって910nm, 680nm, 745nm および 830nmの4波長の重回帰式を、1~2分着色におけるイチゴの糖度測定用の検量線として採用した。以下に検量線の式を示

した。

$$\begin{aligned} \text{予測値} = & 9.989 - 10.802 d^2\bar{A}(\lambda_{910}) + 77.871 d^2\bar{A}(\lambda_{680}) \\ & + 285.570 d^2\bar{A}(\lambda_{745}) + 83.514 d^2\bar{A}(\lambda_{830}) \end{aligned} \quad (7-2)$$

ここで、 $d^2\bar{A}()$ は()内の波長(nm)における平均吸光度二次微分値である。

この場合の予測値は R=0.778, SEC=0.476, SEP=0.432 となり、比較的良好な評価精度が得られた。この時の予測値と実測値の関係を図 7-9 に示した。

表 7-4 検量線の作成および評価結果 (1~2 分着色)

Table. 7-4. Result of parameters of calibration and prediction by wavelength models (10-20% Ripeness).

選択波長 $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5$	検量線作成		検量線評価		
	R	SEC	R	Bias	SEP
910	0.345	0.766	0.431	0.075	0.585
910,680	0.719	0.572	0.601	-0.021	0.549
910,680,745	0.774	0.526	0.646	-0.070	0.515
910,680,745,830	0.823	0.476	0.778	-0.128	0.432
910,680,745,830,970	0.873	0.412	0.803	-0.22	0.453

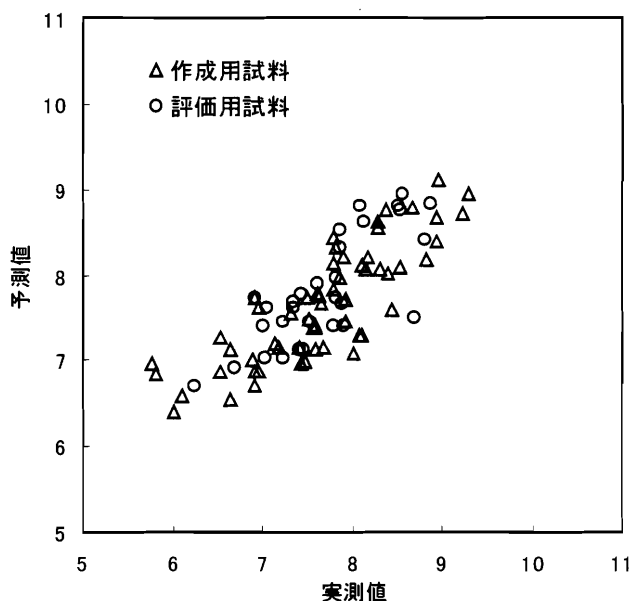


図 7-9 4 波長検量線による予測値と実測値の関係 (1~2 分着色)

Fig.7-9. Plot of measured and predicted sugar content (% Brix) using the calibration set (10-20% Ripeness).

3) 3~6分着色における検量線

3~6分着色の試料を用いて、糖に由来される波長を用いた検量線を作成するため、各波長の吸光度二次微分値と糖度の相関係数を求めた。その結果を図7-10に示す。これより、糖の吸収波長と推察される900nmで最も大きな負の相関が認められた。

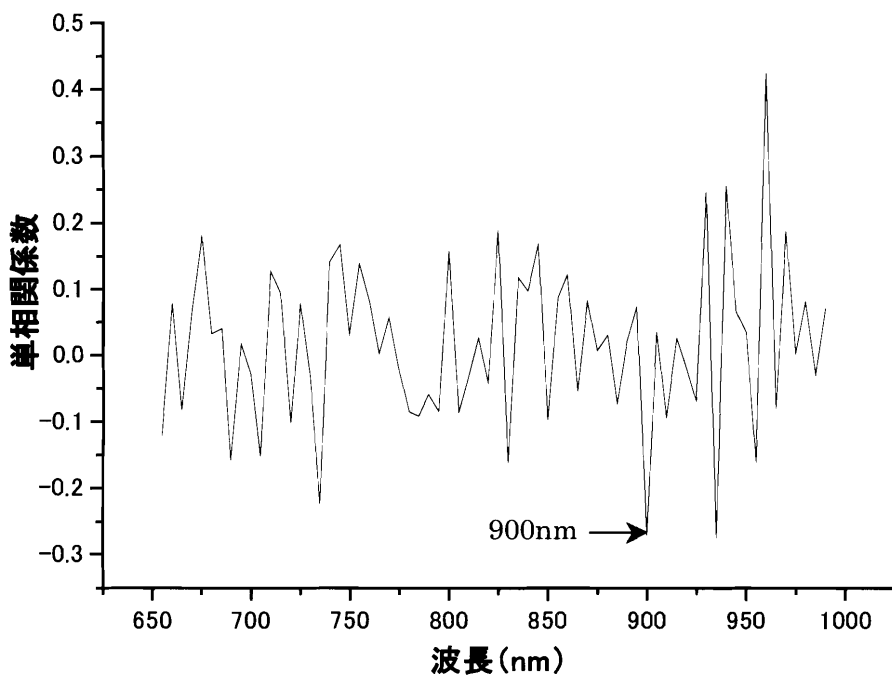


図7-10 イチゴの Brix 値と二次微分吸光度値の相関係数 (3~6分着色)

Fig.7-10. Correlation coefficient of the 2nd derivative absorbance value with Brix strawberry (30-60% Ripeness).

そこで、糖の吸収波長と推察される900nmを第一波長として5波長までの検量線の作成および評価を行った。その結果を、表7-5に示す。これより、作成用試料では選択波長が増加すると、重相関係数は高くなり、標準誤差 (SEC) は減少した。評価用試料では、重相関係数は4波長の検量線において最も高くなり、標準誤差 (SEP) は小さな値を示した。つまり、5波長の検量線は、検量線作成用試料のみに適合し、それ以外の未知試料 (ここでは評価用試料) には適合せず、過剰適合となったことを示した。すなわち、5波長の検量線ではオーバーフィッティングの現象が観察された。よって900nm, 960nm, 855nmおよび935nmの4波長の重回帰式を、3~6分着色におけるイチゴの糖度測定用の検量線として採用した。以下に検量線の式を示した。

$$\begin{aligned} \text{予測値} = & 9.691 - 3.339 d^2\bar{A}(\lambda_{900}) + 506.697 d^2\bar{A}(\lambda_{960}) \\ & - 118.924 d^2\bar{A}(\lambda_{855}) - 26.071 d^2\bar{A}(\lambda_{935}) \end{aligned} \quad (7-3)$$

ここで、 $d^2\bar{A}()$ は()内の波長(nm)における平均吸光度二次微分値である。

この場合の予測値はR=0.796, SEC=0.397, SEP=0.377となった。この時の予測値と実測値の関係を図7-11に示した。

表7-5 検量線の作成および評価結果 (3~6分着色)

Table. 7-5. Result of parameters of calibration and prediction by wavelength models (30-60% Ripeness).

選択波長 $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5$	検量線作成		検量線評価		
	R	SEC	R	Bias	SEP
900	0.367	0.616	0.083	0.150	0.637
900,960	0.655	0.504	0.661	0.104	0.490
900,960,855	0.740	0.453	0.714	0.091	0.441
900,960,855,935	0.811	0.397	0.796	0.092	0.377
900,960,855,935,730	0.841	0.371	0.781	0.037	0.396

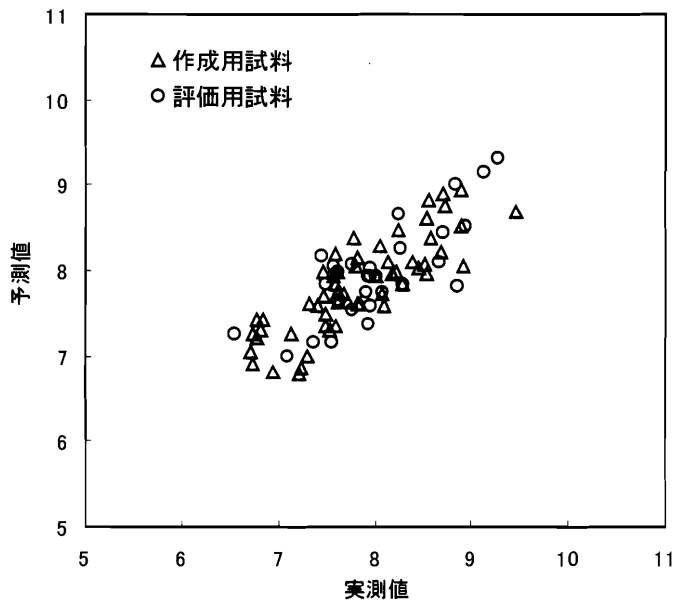


図7-11 4波長検量線による予測値と実測値の関係 (3~6分着色)

Fig.7-11. Plot of measured and predicted sugar content (% Brix) using the calibration set (30-60% Ripeness).

4) 7~10分着色における検量線

7~10分着色の試料を用いて、糖に由来される波長を用いた検量線を作成するため、各波長の吸光度二次微分値と糖度の相関係数を求めた。その結果を図7-12に示す。これより、糖の吸収波長と推察される915nmで最も大きな負の相関が認められた。

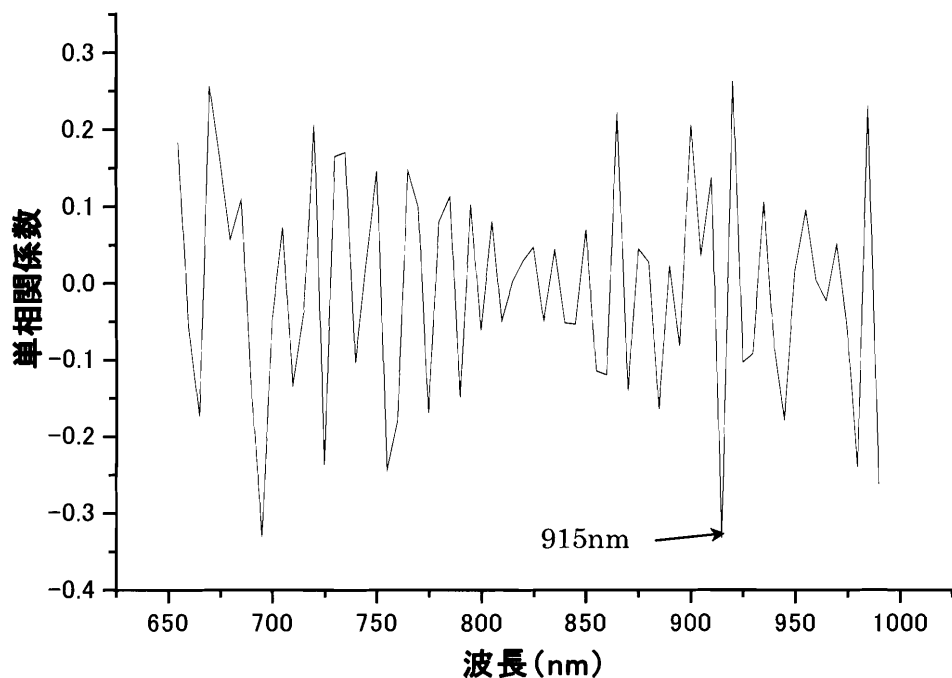


図7-12 イチゴの Brix 値と二次微分吸光度値の相関係数 (7~10分着色)

Fig.7-12. Correlation coefficient of the 2nd derivative absorbance value with Brix strawberry (70%-Fully Ripeness).

そこで、糖の吸収波長と推察される915nmを第一波長として5波長までの検量線の作成および評価を行った。その結果を、表7-6に示す。これより、選択波長が増加すると、重相関係数は高くなり、検量線評価時の標準誤差は減少した。よって915nm, 765nm, 870nm, 695nmおよび860nmの5波長の重回帰式を、7~10分着色におけるイチゴの糖度測定用の検量線として採用した。以下に検量線の式を示した。

$$\begin{aligned} \text{予測値} = & 9.402 - 82.838 d^2\bar{A}(\lambda_{915}) + 88.848 d^2\bar{A}(\lambda_{765}) \\ & - 158.916 d^2\bar{A}(\lambda_{870}) - 122.984 d^2\bar{A}(\lambda_{695}) - 332.882 d^2\bar{A}(\lambda_{860}) \end{aligned} \quad (7-4)$$

ここで、 $d^2\bar{A}()$ は()内の波長(nm)における平均吸光度二次微分値である。

この場合の予測値はR=0.870, SEC=0.288, SEP=0.430となった。この時の予測値と実測値の関係を図7-13に示した。

表 7-6 検量線の作成および評価結果 (7~10 分着色)

Table. 7-6. Result of parameters of calibration and prediction by wavelength models (70%-Fully Ripeness).

選択波長 $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5$	検量線作成		検量線評価		
	R	SEC	R	Bias	SEP
915	0.548	0.533	0.320	0.322	0.797
915,765	0.623	0.502	0.484	0.293	0.731
915,765,870	0.711	0.457	0.637	0.356	0.645
915,765,870,695,	0.811	0.383	0.712	0.259	0.586
915,765,870,695,860	0.900	0.288	0.870	-0.037	0.430

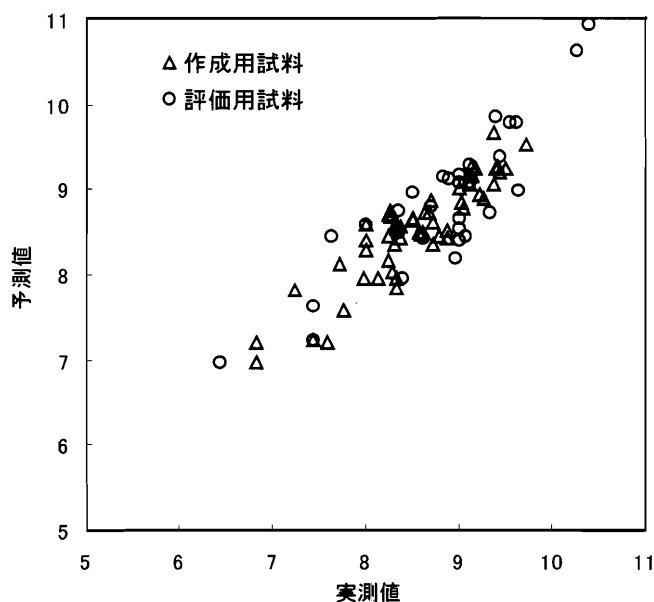


図 7-13 5 波長検量線による予測値と実測値の関係 (7~10 分着色)

Fig.7-13. Plot of measured and predicted sugar content (% Brix) using the calibration set (70%-Fully Ripeness).

第4節 摘要

(1) 品質評価・検査システムの開発研究の一環として、近赤外領域（650～1000nm）のハイパースペクトルイメージングを用いた回帰分析でイチゴ糖度の吸収帯を明らかにして、検量線の開発を行った。

(2) 分光画像は、高感度冷却 CCD カメラと近赤外用液晶可変フィルターを用いて、650～1000nm の近赤外領域を 5nm 間隔で行った。取得した画像の処理は、各波長における分光画像を画素ごとに輝度値から吸光度値に変換し、さらに平均吸光度二次微分値を求めてスペクトルの作成を行った。

(3) 糖の吸収帯は、各波長の吸光度二次微分値と糖度（Brix 値）の相関スペクトルを作成して求めた。

(4) 糖度予測の検量線は、糖度の吸収帯を第1波長として、重回帰分析により作成した。なお、検量線の作成は、1～10分着色、1～2分着色、3～6分着色および7～10分着色の4区分とした。

(5) 1～10分着色の区分の場合、糖の吸収帯は910nmで確認されるので、910nmを第一波長に検量線を作成した。5波長での予測値と実測値との間には、重相関係数 $R=0.690$ 、標準誤差 $SEP=0.614$ であった。

(6) 1～2分着色の区分の場合、糖の吸収帯は910nmで確認されるので、910nmを第一波長に検量線を作成した。4波長での予測値と実測値との間には、重相関係数 $R=0.778$ 、標準誤差 $SEP=0.432$ であった。

(7) 3～6分着色の区分の場合、糖の吸収帯は900nmで確認されるので、900nmを第一波長に検量線を作成した。4波長での予測値と実測値との間には、重相関係数 $R=0.796$ 、標準誤差 $SEP=0.377$ であった。

(8) 7～10分着色の区分の場合、糖の吸収帯は915nmで確認されるので、915nmを第一波長に検量線を作成した。5波長での予測値と実測値との間には、重相関係数 $R=0.870$ 、標準誤差 $SEP=0.430$ であった。

(9) 以上のように、着色度別に作成した糖度の吸収帯を第一波長とした検量線を用いると精度は上がることが明らかになった。

以上の結果、各着色度における検量線を画素ごとに適用し、その差異を擬似可視化することで、イチゴの糖度分布状態の把握が可能になるものと思われる。

引用文献

- 1) M. NAGATA, J. TALLADA, T. KOBAYASHI, Y. GEJIMA : Predicting Maturity Quality Parameters of Strawberries Using Hyperspectral Imaging. Proceedings of ASAE, Paper No.043033., 2004
- 2) S. Kawano, T. Fujiwara, and M. Iwamoto : Nondestructive Determination of Sugar Content in Satsuma Mandarin using Near Infrared (NIR) Transmittance, J. Japan. Soc. Hort. Sci. 62(2), 465-570, 1993
- 3) 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, 211-218, 1999
- 4) McGlone, V.A., R.B. Jordan, and P.J. Martinsen. : Vis/NIR estimation at harvest of pre- and post-storage quality indices for 'Royal Gala' apple. *Postharvest Biology and Tech.* 25 : 135-144, 2002
- 5) M. NAGATA, J. TALLADA, T. KOBAYASHI, H. TOYODA., NIR Hyperspectral Imaging for Measurement of Internal Quality in Strawberries, Proceedings of ASAE, Paper No.053131., 2005
- 6) 植松徳雄 : イチゴ栽培の理論と実際, 誠文堂新光社, 174, 1998
- 7) 藤原孝之・本庄達之助 : 近赤外分光分析法によるイチゴ糖度の非破壊測定, 農産物流通技術研究会報, 14 (10), 66-68, 1992

第8章 総括

近年、食に対する消費者の健康・安全指向の強い高まりから、農産物の品質評価・検査は、これまで以上に厳密さが求められるようになった。これに伴って、計測精度の技術的向上が重要な課題となっている。このような背景から本論文では、農産物の品質特性抽出にスペクトル情報と画像情報とを融合したハイパースペクトルイメージング法を適用して、その有用性を解明したものである。特に、健康食の観点から、可視光領域の分光画像を用いてサツマイモ(紫イモ)およびイチゴのアントシアニン色素分布の評価について試みた。また、近赤外分光画像を用いてイチゴの糖度予測について試みた。以下に得られた結果を総括する。

1. 青果物の品質評価に関する液晶可変フィルターを用いた分光画像による試み

可視光領域の液晶可変フィルターを用いて撮影された分光画像情報から、農産物の色(機能性との関連)、損傷部位の特徴抽出について検討を行った。そこで、ハロゲンランプ光源下でピーマン・バナナおよびニンジンの青果物と配色カードを用いて、450nm, 500nm, 550nm, 600nm および 650nm の分光画像を取得し、同時にスペクトロフォトメーターを用いて 450~650nm の反射スペクトルを求め比較検討を行った。その結果、被写体から反射される光のスペクトルに類似した濃淡画像を得ることができた。すなわち、被写体の色の波長域内で撮影された分光画像は、被写体から反射される強度が強いため、フィルターへの入射光が多くなり白く写しだされる事がわかった。損傷部位の特徴抽出は、ニンジン表面に観察される3種類の損傷部位を、500nm, 520nm, 540nm, 560nm, 580nm, 600nm, 620nm および 640nm の8波長の分光画像を用いて2値化処理で行った。その結果、ニンジンの表面色と損傷部位の色の違い、反射強度の差などから特徴抽出は可能であることがわかった。

以上の結果より、特徴ある波長域の選定を行うことによって、目的とする農産物の品質評価・検査が可能であることが示唆された。

2. 紫イモのアントシアニン色素分布の評価

消費者の健康志向の高まりから、機能性に関する品質評価項目の計測は重要となっている。そこで、サツマイモ(紫イモ)の機能性色素であるアントシアニン色素の分布状態に

ついてハイパースペクトルイメージングを用いて検討した。対象物の着色度とアントシアニン色素の関係は 490~530nm における吸光度値をもって相対的に示されていることから、この近傍における色素画像（分光画像）を取得し機能性の評価を試みた。

分光画像は、高感度冷却 CCD カメラと液晶可変フィルターからなるハイパースペクトルカメラを用いて、450~600nm の範囲を 1nm 間隔で連続的に取得した。分光画像は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スペクトルの作成を行い、化学抽出法（50%酢酸に 24 時間浸漬）で得た吸光度二次微分スペクトルと比較し、アントシアニン色素値となる波長の選択を行った。この波長を含む検量線を作成し、アントシアニン色素予測式とした。このアントシアニン予測式を画素ごとに適用し、その値をカラーマッ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。その結果、以下のことが明らかになった。

- ① 品種‘アヤマラサキ’では、分光画像の 523nm と抽出液の 525nm における吸光度に強い関係が認められた。523nm 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 $SEP=0.052$ であった。
- ② 品種‘ムラサキマサリ’では、分光画像の 523nm と抽出液の 526nm における吸光度に強い関係が認められた。523nm を第一波長として 5 波長で検量線を作成した結果、 $R=0.830$ 、 $SEP=0.017$ であり、予測精度は良好であった。
- ③ 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。

3.イチゴのアントシアニン色素分布の評価

イチゴにおいては、果皮表層に蓄積するアントシアニン色素分布状態を、非破壊的に評価した。主な実験装置、方法および解析は、上述した紫イモと同じとした。その結果、以下のことが明らかになった。

- ① 分光画像の 508nm と抽出液の 504nm における吸光度に強い関係が認められた。508nm 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 $R=0.932$ 、標準誤差 $SEP=0.213$ であり、予測精度は良好であった。
- ② 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。

- ③ 撮影距離による影響は、設定値から 20mm 程度の差ではアントシアニン含有の予測精度にはなんら支障なかった。

4.イチゴの糖度予測の試み

筆者らは、可視光領域 (450~650nm) でのハイパースペクトルイメージングを用いて、イチゴの糖度予測を行った結果、一定の成果を得た。しかしながら、青果物の糖度の吸収帯は近赤外領域に存在することが、様々な近赤外分光法を用いた研究結果で報告されている。そこで、近赤外領域の分光画像データを用いた回帰分析で糖度の吸収帯を明らかにして、検量線の開発を行った。

分光画像は、高感度冷却 CCD カメラと近赤外用液晶可変フィルターからなるハイパースペクトルカメラを用いて、650~1000nm の範囲を 5nm 間隔で連続的に取得した。取得した分光画像は、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スペクトルの作成を行った。化学分析値は、デジタルブリックス計を用いて Brix 値求めた。糖度の吸収帯は、各波長の吸光度二次微分と糖度 (Brix 値) の相関スペクトルから求めた。糖度予測の検量線は、糖度の吸収帯を第 1 波長として、重回帰分析により作成した。なお、検量線の作成は、1~10 分着色、1~2 分着色、3~6 分着色および 7~10 分着色の 4 区分とした。その結果、以下のことが明らかになった。

- ① 1~10 分着色の区分の場合、糖の吸収帯は 910nm で確認されので、910nm を第一波長に検量線を作成した。5 波長での予測値と実測値との間には、重相関係数 $R=0.690$ 、標準誤差 $SEP=0.614$ であった。
- ② 1~2 分着色の区分の場合、糖の吸収帯は 910nm で確認されので、910nm を第一波長に検量線を作成した。4 波長での予測値と実測値との間には、重相関係数 $R=.0778$ 、標準誤差 $SEP=0.432$ であった。
- ③ 3~6 分着色の区分の場合、糖の吸収帯は 900nm で確認されので、900nm を第一波長に検量線を作成した。4 波長での予測値と実測値との間には、重相関係数 $R=0.796$ 、標準誤差 $SEP=0.377$ であった。
- ④ 7~10 分着色の区分の場合、糖の吸収帯は 915nm で確認されので、915nm を第一波長に検量線を作成した。5 波長での予測値と実測値との間には、重相関係数 $R=0.870$ 、標準誤差 $SEP=0.430$ であった。

以上のように、糖度の吸収帯を第一波長とした検量線の作成を行った結果、1～10分着色の試料を用いるより、1～2分、3～6分、7～10分と着色度別に検量線を作成した方が精度は上がることがわかった。また、各着色度における検量線を画素ごとに適用し、その差異を擬似可視化することで、イチゴの糖度分布状態の把握が可能になるものと思われる。

以上のことから、ハイパースペクトルイメージング法は、青果物の成分分布状態の計測を簡便かつ迅速に予測可能であることが示唆された。今後は、青果物の品種や栽培方法の違いによる成分分布の違いなど栽培管理にフィードバックする基礎的研究や、残留農薬の分布状態を把握する実用的研究など、生産者から消費者まで信頼性が得られる農産物の流通システム化への応用が期待される。

謝 辞

本研究の遂行にあたっては、宮崎大学農学部教授永田雅輝博士には主指導教官としての立場から、平成10年、同大学農学部農業生産機械学研究室に入室以来、今日まで、本研究のテーマの選定、研究計画、実験方法等から学位論文の取りまとめに至る全プロセスにおいて、終始ご懇篤なる指導と公私にわたるご厚情をいただきました。謹んで心から感謝の意を表します。

また、副指導教官である、宮崎大学農学部助教授津野和宣博士、佐賀大学農学部教授（現：佐賀大学副学長）小島孝之博士（平成15年4月～平成16年3月）、鹿児島大学農学部教授宮部芳照博士（平成16年4月～平成18年3月）、および審査委員として本論文を御校閲していただきました佐賀大学農学部教授内田進博士、琉球大学農学部教授秋永孝義博士には厳正かつ貴重な御意見と御指導を賜りました。心より感謝の意を表します。

本実験の供試材料であるサツマイモ（紫イモ）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ました。また、イチゴは宮崎県宮崎市木花地区のハウスイチゴ栽培農家持原善伸氏の協力を得ました。ここに記して深く感謝申し上げます。

研究を進めるに際し、宮崎大学農学部槐島芳徳助教授、同日吉健二助手には有益なるご助言と激励を頂きました。ここに感謝の意を表します。また、博士課程入学以来、宮崎大学農学部稲垣仁根助教授、中園健文助教授には、他の専門分野でありながらも、公私にわたり多大な励ましを頂きました。心より感謝いたします。

さらに、本研究でのデータの収集、資料の整理では、本講座のジャスパー タラダさん（博士課程）、M.アムリさん（修士課程）、戸次里枝さん（現神崎高級工機）、永富昇子さん（現（株）サタケ）、後藤有美子さん、豊田寛君、中辻寿文君および同専攻生の皆様の熱心なご協力を頂きました。ここに深くお礼申し上げます。

なお、本研究は、主指導教官である永田雅輝博士が採択された、平成15～17年度文部科学省科学研究費（課題番号15380175、16658098）によって遂行いたしました。ここに、関係者各位に感謝申し上げます。

最後に私事ではありますが、同大学およびその他の友人、そして最後まで深い理解を示し全面的に協力してくれた、両親および兄弟に心から感謝します。

2006年3月 小林太一