イメージング分光によるウンシュウミカン果実の 腐敗検出装置の開発[†]

中畠輝子[§], 吉川公規^{*}

静岡県農業水産部みかん園芸室

^{*} 静岡県柑橘試験場

Development of a Device for Detection of Fruit Rot in Satsuma Mandarins Using Imaging Spectroscopy (Discrimination System for Rot in Satsuma Mandarins Using Spectral Imaging — Part 1)

Teruko Nakajima[§] and Kiminori Yoshikawa^{*}

Fruit, Vegetable & Flower Promotion Office, Department of Agriculture & Fisheries
Shizuoka Prefecture, 9-6 Otemachi, Aoi-ku, Shizuoka 420-8601

^{*} Shizuoka Prefectural Citrus Experiment Station, 2-12-2 Komagoe, Shimizu-ku, Shizuoka 424-0905

In the early stage of fruit rot in satsuma mandarins, there is little change in the appearance of the fruit compared with that of normal fruit, so that it is difficult for an inspector to detect the fruit rot even if using an RGB color camera. Therefore, in order to detect fruit rot, we developed a device that is easily able to measure a spectral image from visible to near infrared. Using the device, the average absorbance of a normal part or a rotted part was calculated from the spectral image, and multiple linear regression (MLR) was performed. From the result of MLR, three wavelengths were selected as variables for the calibration model and used to create an image of each sample by applying the reflectance of the three wavelengths. It was found that the rotted parts of 27 out of 36 samples could be detected using these images.

(Received Sep. 2, 2005 ; Accepted Aug. 18, 2006)

柑橘類の収穫後に見られる腐敗の多くは、主に緑カビや青カビといった糸状菌に由来しており、貯蔵期間に何らかの原因で果皮に生じた微細な傷口から感染して起る¹⁾。この初期の腐敗は、果皮が水浸状に軟化するものの果皮色にほとんど変化がみられないため、選果施設で多く用いられている RGB 方式のカメラでは検出が難しく、現場ではこれら腐敗果の除去は、目視による人力選果に頼らざるを得ないのが現状である。

青果物の選果システムに関する研究は、RGB カラーカメラを用いた画像判定による着色度や傷の選別技術が広く実用化している²⁾。また、柑橘類の様々な傷果での光反射特性³⁾やウンシュウミカンでは蛍光スペクトルによる表皮の油胞破壊による損傷果の識別⁴⁾が報告されているが、対象とするような柑橘類の腐敗果検出に関する報告はほとん

どない。

一方、近年リモートセンシングにおいて用いられ始めているハイパースペクトルカメラは、連続スペクトルによる分光画像を得ることが出来、森林樹冠のモニタリング⁵⁾や農業分野における植物の生体画像計測などの研究に用いられている⁶⁾。

そこで本報告では、RGB 方式の画像に比べ再現性の高い分光画像を用いた画像解析に着目し、従来の点分光に比べ、高速でのエリア分光に適している線分光が可能なイメージング分光器⁷⁾を用い、果実全周囲における可視から近赤外領域までの連続した分光画像を測定できる装置を作成し、この分光画像に重回帰分析の手法を組み合わせることで、ウンシュウミカンの腐敗部分を識別できる装置の開発を試みた。

実 験 方 法

1. 測定装置

測定装置 (図 1) は、イメージング分光器 (Specium 社

[†] 分光画像を用いたウンシュウミカンの腐敗果判定法 (第 1 報)

〒420-8601 静岡市葵区追手町 9-6

^{*} 〒424-0905 静岡市清水区駒越西 2-12-2

[§] 連絡先 (Corresponding author), teruko1_nakajima@pref.shizuoka.lg.jp

図 1 測定装置

製 InspectorV10) と CCD カメラ (TEXAS INSTRUMENTS 社製 MC-781P 480×640 pixel), 光源 (100 w ハロゲンランプ オプテル社製ハロゲンライトソース OHX-100A), 回転ステージコントローラ (KTEC 社製), データ処理装置 (KTEC 社製) からなり, 分光器の波長分解能は 7 nm (実験用設定条件時), 分光方式はプリズム-グレーティング-プリズム (PGP) 方式, データ分解能は 10 ビットである。

分光器はスリットを通った直線状の光を平面に展開して分光する線分光型であり, 線領域の位置情報 (空間軸 480 画素) と分光情報 (波長範囲 400~960 nm) を同時に測定できる。この線分光データの取り込みとステージの回転角度を制御し, 果実を回転させながら連続測定することで果実全周囲のスペクトルデータを測定する。

2. 供試材料

静岡柑橘試西遠分場 (静岡県三ヶ日町) で収穫し, 温度 5℃, 湿度約 80% の条件下で約 2 ケ月間貯蔵したウンシュウミカン “青島温州” 36 個を用いた。70% エタノールで果実表面を拭いた後, 果皮に先端の尖った細い金属棒で傷を付け, 別に用意した果実に生じた水浸状の腐敗 (糸状菌由来) を接種した後, 温度 15℃, 湿度 95% 以上の条件下に置いた。水浸状の腐敗が発生し, その直径が 1~3 cm に達した果実から順次測定に供した。

3. 分光画像の測定

測定は室温 20℃, 暗室下において行い, まず暗電流の測定, 標準白板で基準画像を測定した後に, 品温を 20℃ に調整した供試果実を用いて行った。

分光画像測定の手順は, 果実を回転ステージに載せ, まず補助取り込みとして全周囲画像を測定, 図 2 に示す様に RGB 表示に置き換えたプレビュー画像を得る。このプレビュー画面から予め印を付けておいた腐敗部分と健全部分の境界付近を矩形選択し, 本取り込みを行う。本取り込みは腐敗部識別用のモデル作成を目的としたため, 全周囲画像を取り込むのではなく腐敗部との境界付近のみとし, 1 画素につき 3 回測定した平均値をスペクトルデータとした。データ解析に用いた波長範囲は 550 nm~960 nm, 波長間隔は 2 nm で行った。

図 2 ウンシュウミカン腐敗果の全周囲分光画像 (RGB プレビュー表示・中央黒円内が腐敗部分)

吸光度の算出は, リファレンス I_0 を標準白板の分光反射強度-暗電流, サンプル I を矩形選択部分の平均分光反射強度-暗電流とした時の分光反射率 $r=I/I_0$ の常用対数 $\log(1/r)$ とした⁸⁾。

4. スペクトル解析とイメージング処理

1 果実につき 1 画像ずつ取り込んだ分光画像の中から, 腐敗部 6 カ所, 健全部 6 カ所を矩形選択し, 各矩形部分の平均吸光スペクトルを 1 サンプルデータとした。スペクトルデータを説明変数に, 目的変数である実測値を腐敗=1, 健全=0 と定めて重回帰分析を行った。変数増加法にて第 3 波長まで採用した各波長の出力値 (分光反射率) を RGB 画像における色度値として画像化した疑似カラー画像 (以後イメージングとする。) を作成し, 腐敗部分の識別の可否を確認した。なお, 原スペクトルに前後 4 nm の平滑化処理を行い, 前処理として MSC (Multiplicative scatter correction) と 2 次微分を検討し, 重回帰分析での波長選択は一部を除き全てコンピューターによる自動選択とした。2 次微分と重回帰分析は NSAS (FossNIRSystems 社製) を, 平滑化と MSC 処理は Unscrambler Ver8.0 (CAMO 社製) を, その他データ処理と画像合成は Spectrum Analyzer (KETC 社製) の各ソフトを用いた。

実験結果および考察

1. 分光画像と部位別近赤外吸光スペクトル

イメージング分光器によって得られる分光画像は, 1 回の撮像では一条の線状領域の分光画像であり, 水平軸が波長, 垂直軸が位置情報である⁹⁾。

本試験においては, 果実を回転ステージに置き, 回転させながら連続撮像することで果実全周囲を 1 枚の画像として見ることが出来た。ステージの回転ピッチを 1 度に設定し, 360 回の測定で 1 回転する。このため, 本試験で測定した果実全周囲画像 (図 2) は, 横軸は回転角度, 縦軸は CCD カメラの有効画素数に起因した 360×480 画素の分光画像である。この条件で測定した場合, 直径 6 cm の果実では 1 画素分に相当する果実表面の大きさは, 概ね縦 0.25

mm×横 0.5 mm であった。

部位別に見た分光画像の平均分光反射強度は、果実毎に比較すると腐敗部よりも健全部の方が高い傾向が見られ、全体に 700 nm 付近にピークがみられた (図 3)。また、同一果実における吸光スペクトルは、MSC 処理では 650 nm～860 nm の間で健全部の方が僅かに高く、570 nm～620 nm では僅かに低かった。2 次微分処理では 660 nm～720 nm と 880 nm～930 nm で健全部の方が僅かに低く 550 nm～590 nm で僅かに高かった (図 4)。

図 3 ウンシュウミカン腐敗果の分光画像から算出した腐敗部分と健全部分の分光反射強度

図 4 ウンシュウミカン腐敗果の分光画像から算出した腐敗部と健全部の吸光スペクトル (MSC 処理) と 2 次微分スペクトル

2. 重回帰分析によるスペクトル解析

本試験では、腐敗部と健全部を仕分ける検量式を重回帰分析で作成し、変数増加法によって採用した 3 波長をイメージング作成に用いた。スペクトルの前処理別にみた解析結果 (表 1) から、最も検量式の精度が高かったのは、2 次微分処理を行った場合で、重相関係数 $r=0.92$ 、検量線作成時の標準誤差 (SEC) は ± 0.19 、無作為抽出したサンプルによる検量線評価時の標準誤差 (SEP) は ± 0.11 となり、この時採用された波長は第 1 波長からそれぞれ 580 nm、688 nm、728 nm であった。MSC 処理を行ったスペクトルでの検量式の精度 $r=0.84$ 、 $SEP=\pm 0.14$ であり、採用波長は 806 nm、682 nm、732 nm であったが、2 次微分の結果から、単相関係数 (図 6) で正のピークを示した 580 nm も重要な波長と思われたため、580 nm を第一波長とし再び検量線を作成した。第 2 波長以降を自動選択した場合の検量線の精度は $r=0.85$ 、 $SEP=\pm 0.12$ と精度向上が見られたが、僅かに 2 次微分の方が精度が高かった。2 次微分処理を行った場合の検量式における推定値と実測値の関係は、推定値 0.5 を境界値とした場合、概ね腐敗部と健全部とに分別することが出来た (図 5)。このことから、この検量式に採用した 3 波長を用いることで腐敗部と健全部の識別が可能であると考えられた。図 6 はスペクトルの前処理別に各波長毎の吸光度と実測値との単相関係数をプロットしたものであり、2 次微分では 580、744、834 nm で高い負の相

表 1 スペクトルの前処理別重回帰分析結果

前処理法 ²⁾	採用波長			$r^y)$	SEC ^{x)}	SEP ^{w)}
	λ_1	λ_2	λ_3			
MSC	806	682	732	0.84	0.28	0.14
MSC	580 ^{Mv)}	942	564	0.85	0.26	0.12
2D	580	688	728	0.92	0.19	0.11

²⁾ MSC (Multiplicative scatter correction), 2D (second derivative).

^{y)} 重相関係数.

^{x)} 検量線作成時の標準誤差. ^{w)} 検量線評価時の標準誤差.

^{v)} 第 1 波長に 580 nm を指定してマニュアル選択し、以降は自動選択.

関を示し、688, 806 nm で高い正の相関が見られた。MSC 処理では 580 nm 付近に正の相関が、710 nm と 800 nm 付近に負の相関が見られたが、全体にブロードなピークを示しており、検量線の選択波長においては、僅かな違いによって採用されているものと考えられた。

2 次微分で選択された波長はいずれも可視領域であった。2 次微分スペクトルを用いた場合の正の相関を示した 688 nm はクロロフィル吸収帯に近接しており³⁾⁴⁾、クロロフィル含量が腐敗部において減少する傾向にあるのではないかと考えられた。また、580 nm はキサントフィル色素に関連する波長¹⁰⁾に近接しておりカロテノイド系の色素含量に関係している波長と考えられた。しかし、これら腐敗部位での色素成分に関わる波長の変化については、単に含量の変化と捉えるよりは、腐敗によって果皮が水浸状になることによる、光散乱状態の変化によって生じる反射率の変化と捉えることも出来、この点についてはさらに検討する必要がある。

3. イメージングによる腐敗部識別

重回帰分析で採用した 3 波長を用いスペクトルの前処理

図 5 2 次微分スペクトルを用いた重回帰分析結果

別にイメージングを作成した (図 7)。この結果、果実毎の分光画像 36 サンプルの内、明確に腐敗部分を識別できたものは、MSC で 19, 2 次微分で 20, やや不明瞭なものは MSC で 6, 2 次微分で 7 であった。識別できなかったものは MSC で 11, 2 次微分で 9 サンプルであり (表 2), どの処理方法においても概ね 3 割程度のサンプルが識別できなかった。イメージングにおける腐敗部識別においては、2 次微分処理が僅かに識別できたサンプルが多く、本手法においては 2 次微分スペクトルを用いるのが有効ではないかと考えられた。

現在、選果場で用いられている RGB 方式のカラーカメラは、R (赤) G (緑) B (青) の 3 色を混合しその割合を変えることにより様々な色を表現している¹¹⁾。小宮らによ

表 2 重回帰分析結果より採用した波長で作成したイメージングによる腐敗部判定

Sample No.	スペクトルの前処理 MSC	2D	Sample No.	スペクトルの前処理 MSC	2D
1	×	×	19	○	○
2	×	×	20	×	×
3	×	×	21	○	○
4	◎	◎	22	◎	◎
5	◎	◎	23	○	○
6	◎	◎	24	◎	◎
7	◎	◎	25	○	○
8	◎	×	26	○	◎
9	◎	◎	27	◎	◎
10	×	×	28	×	◎
11	◎	◎	29	◎	◎
12	◎	◎	30	×	○
13	◎	◎	31	◎	◎
14	◎	◎	32	×	×
15	×	×	33	◎	◎
16	×	×	34	◎	◎
17	◎	◎	35	◎	◎
18	×	○	36	×	○

2) ◎明確に識別できる, ○やや不明瞭だが識別できる, ×識別できない。

図 6 スペクトルの前処理別にみた単相関係数

図 7 重回帰分析結果より採用した 3 波長の分光反射率から作成した疑似カラー画像と RGB 画像による腐敗部識別 (抜粋)

** 腐敗判定, ◎, 明確に識別できる; ○, やや不明瞭だが識別できる; ×, 識別困難; * 疑似カラー画像,
*** 腐敗部と健全部の境界線.

れば¹²⁾ RGB の等色関数はブロードな形であるため対象物の分光特性の違いが RGB 値には反映されにくい場合が生じ、対象物の僅かな色の違いを識別する際に正確な再現性が得られない問題点を指摘している。

本試験で作成したイメージングは、550～960 nm の間に 206 の分光画像が存在する原スペクトルデータに MSC や 2 次微分の前処理を行った後、重回帰分析によって採用された第 1 から第 3 までの波長を用いて作成したものであり、ウンシュウミカンの腐敗部と健全部の識別に特化したことで、従来の RGB 画像では見分けられなかった腐敗部識別の可能性が示された。しかし、全く識別が出来なかったサンプルもあり、このことは本試験で用いた 3 変数 (3 波長) による重回帰式では説明し切れていない要因があることを示唆しており、腐敗部識別の精度を向上させるには、多変量解析の結果を直接画像に反映させる手法なども検討していく必要があると思われる。

今後、実用化に向けては品種、産地等の様々な条件によって生じる果実の個体差に幅広く適応させるため、検量式に用いる果実のサンプリング方法や腐敗果判定のシステム化なども検討していく必要がある。

要 約

ウンシュウミカンに生じる初期の腐敗は、正常な部分と果皮色にほとんど変化がないため見落とされやすく、選果施設などで導入されている RGB カラーカメラでも検出が難しい。そこで、腐敗部分を検出するために、イメージング分光器によって可視から近赤外領域までの連続した分光画像を簡易に測定できる装置を作成した。この装置を用いて得られた分光画像から、腐敗部分と健全部分の平均吸光スペクトルを算出し、重回帰分析を行った。3 波長まで採用し、第 1 から第 3 波長までの分光反射率の値を RGB に置き換えて疑似カラー画像を作成したところ、2 次微分し

たスペクトルを用いた場合の精度が高く、36 サンプルの内
27 サンプルの腐敗部を識別することが出来た。

文 献

- 1) 家城洋之, 果実腐敗病の現状と課題, 果実日本, **55** (9), 30-33 (2000).
- 2) 相良泰之, 光センシングによる青果物選別システムの開発動向, 食科工, **43**, 215-224 (1996).
- 3) J.J. Gaffey, Reflectance Properties of Citrus Fruits, TRANSACTIONS of the ASAE, **16** (2), 310-314 (1973).
- 4) 魚住 純, 河野澄夫, 岩元睦夫, 西成勝好, 色むらのある食品の品質評価のための可視分光分析装置の試作, 日食工誌, **34**, 163-170 (1987).
- 5) 小熊宏之, 土田 聡, 藤沼康実: 森林モニタリング用ハイパースペクトルカメラシステムの開発, 日本リモートセンシング学会誌, **22**, 588-597 (2002).
- 6) 大政謙次, リモートセンシングの新展開—環境モニタリングから新しい生産技術へ—, 日本生物環境調節学会講演要旨集, p. 1-8, 盛岡 (2003).
- 7) 守屋 進, イメージング分光器「Inspector」=基本特性とその応用=, 光アライアンス, **10** (11), 4-9 (1999).
- 8) 尾崎幸洋, 近赤外分光の基礎, 「近赤外分光法」, 初版, 尾崎幸洋, 河田 聡編, (学会出版センター, 東京) pp. 18-21 (1996).
- 9) 守屋 進, イメージング分光器による画像色彩測定技術, 光アライアンス, **13** (6), 14-17 (2002).
- 10) 中路達郎, 武田知己, 向井 譲, 小池孝良, 小熊宏之, 藤沼康実, カラマツ針葉の光合成活性と分光反射指標の関係, 日本林学会誌, **85**, 205-213 (2003).
- 11) 上西勝三, 目と工学と色, 「画像工学の基礎」, 初版 (日本理工出版会, 東京), pp. 22-26 (2002).
- 12) 小宮康宏, 西塚弘美, 日比 靖, 画像の微妙な色の違いを分類する“色分類カメラシステム”の開発, 画像ラボ, **9** (5), 37-40 (1996).

(平成 17 年 9 月 2 日受付, 平成 18 年 8 月 18 日受理)