

ハイパースペクトルカメラによる高次元分光画像を用いた  
 青果物の非破壊糖酸比推定の精度検証：みかんを対象として  
 Accuracy Evaluation of Non-Destructive Sugar/Acid Ratio Estimation in Fruits Using  
 High-Dimensional Hyperspectral Imaging: A Case Study on Mandarin Oranges

桑原 拓大<sup>†</sup> 栗原 陽介<sup>†</sup>  
 Takuhiro Kuwahara Yosuke Kurihara

## 1. はじめに

青果物の味は消費者の購買意思決定において主要な要因の一つであり、その風味や鮮度の重要な評価指標として糖酸比が用いられている。

従来、糖度や酸度の計測では化学的分析が主流であり、試薬や専用機器を使用した計測が行われている。しかし、これらは青果物の破壊を伴い、試料として使用された青果物は商品価値を失う。そこで流通過程での継続的な品質管理を実現するために、近年では、青果物の非破壊計測が可能である近赤外分光分析が注目されている[1]。また、カラー画像を用いて pH 推定を行う研究では、可視光領域と青果物の内部特性の関係が示唆されている[2]。筆者らはこれまで、青果物の高次元分光画像における吸光スペクトルから糖度を推定する手法を提案してきた[3]。

本研究では対象とする青果物のみかんとし、ハイパースペクトルカメラによる高次元分光画像から、糖酸比を非破壊で推定する手法を提案する。吸光スペクトルに対して照度のばらつきを補正するために標準正規変換を適用し、2次曲線への決定係数を特徴量とする。得られた特徴量に対し、ガウス過程回帰を適用することで、糖酸比を推定する。

## 2. 提案手法

### 2.1 糖度・酸度の影響を受ける波長帯域の選択

青果物の糖度・酸度推定において、近赤外領域の吸光スペクトルの特定の波長帯では糖や酸の含有量によって、吸光特性が変化する。また、可視光領域の吸光スペクトルは青果物の成熟度と対応しており、青果物の外果皮に含まれる色素量を介して青果物の糖度・酸度の推定を行うことができる。これらの近赤外領域、可視光領域における吸光スペクトルの変化は、糖度を酸度で除して求められる糖酸比の推定に関しても有効であると考えられる。

ハイパースペクトルで計測したみかんの吸光スペクトルを  $S(\lambda)$  とし、青果物の糖度、酸度に関連する成分  $i = (1, 2, \dots, N_c)$  の影響を受ける波長の範囲を  $\Lambda_i = [\lambda_{i,low} - \lambda_{i,high}]$  とする。  $N_c$  は成分数、  $\lambda_{i,low}$ ,  $\lambda_{i,high}$  は波長分解能  $\Delta\lambda$  で離散化された波長帯域とする。

ここでは高次元分光画像に含まれる波長帯域の中から推定に有効な波長帯域を近赤外領域と可視光領域のそれぞれから選択するため  $N_c = 2$  とする。

### 2.2 吸光スペクトルの2次曲線へのフィッティング

糖度や酸度が高い試料では、糖度や酸度に関する成分や成熟度による色素成分の増加によって  $\Lambda_i$  中の特定波長で吸光スペクトル  $S(\lambda)$  の値が大きくなる。すると、相対的に  $\Lambda_i$  に含まれる繊維成分などの糖度、酸度と無関係の他成分の吸光スペクトルとの差が大きくなる。このため、吸光スペクトル包絡  $S(\Lambda_i)$  を 2 次曲線で近似したときの決定係数  $R_i$  は小さくなる。一方で、糖度や酸度が低い試料では、糖度、酸度に関する成分による吸光スペクトル  $S(\lambda)$  の値の変化が抑えられることによって、よりなだらかな吸光スペクトル包絡となるため、2 次曲線でフィッティングしたときの決定係数  $R_i$  は大きくなる。以上のことから、本提案手法では糖酸比を推定する際の特徴量として 2 次曲線の決定係数  $R_i$  を用いる。

糖酸比の推定は、決定係数  $R_i$  を説明変数、糖酸度計により計測した糖酸比を目的変数とし、ガウス過程回帰を用いて行う。

## 3. 検証実験

本実験では、みかんを対象に提案手法の妥当性を検証する。ハイパースペクトルカメラは Resonon 社の Pika XC2 を使用する。撮影された非破壊のみかんの高次元分光画像において、縦横  $30 \times 30$  pixel で切り出した外果皮の画像と切り出した外果皮の内側に位置するみかんの房の果汁を絞り、糖酸度計 (ATAGO 製, PAL-BX[ASID F5]) を使用して計測した糖度および酸度を 1 データセットとし、合計で 30 データセット取得する。

使用したハイパースペクトルカメラの波長範囲は  $398.67 - 1016.78$  nm (波長分解能:  $\Delta\lambda = 1.34$  nm) である。画像データは前処理として波長毎に全画素の平均値をとり、光源の強度のばらつきを補正するため標準化する。

各波長帯域  $\Lambda_i$  は遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて、それぞれ最適な範囲を決定する。この時、可視光と近赤外光の境界を  $780$  nm とした。

本実験における推定では、実験 1: 糖度を推定する実験、実験 2: 酸度を推定する実験、実験 3: 糖酸比を推定する実験をそれぞれ行い、糖酸比だけでなく糖度と酸度についても個別で推定することによって近赤外領域と可視光領域からの糖度、酸度推定が本提案手法においても有効であるか検証する。精度評価は、leave-one-dataset-out 交差検証を用い、推定値と実測値にたいし、RMSE、相関係数を算出する。

<sup>†</sup> 青山学院大学 理工学研究科 理工学専攻  
 マネジメントテクノロジーコース

Aoyama Gakuin University Graduate School of Science and  
 Engineering Science and Engineering Major Management  
 Technology Course

## 4. 結果および考察

### 4.1 実験 1・実験 2 の結果および考察

図 1 に実験 1 での推定糖度と実測糖度の散布図を示す。GA によって選択された波長範囲は、可視光領域が  $\Lambda_1 = [493.72 - 533.49 \text{ nm}]$ 、近赤外領域が  $\Lambda_2 = [978.60 - 1016.78 \text{ nm}]$  となった。RMSE は 0.612, 相関係数は 0.870 となった。相関係数から非常に高い精度で推定できたことがわかる。可視光領域は青緑色の波長帯域が選択されている。

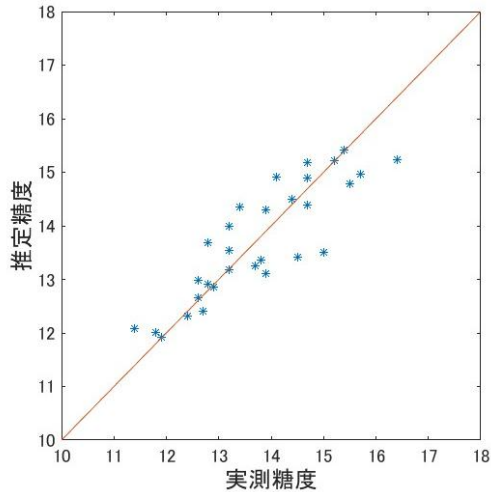


図 1 実験 1：糖度推定の散布図

図 2 に実験 2 での推定酸度と実測酸度の散布図を示す。GA によって選択された波長範囲は、可視光領域が  $\Lambda_1 = [422.38 - 439.53 \text{ nm}]$ 、近赤外領域が  $\Lambda_2 = [989.50 - 1016.78 \text{ nm}]$  となった。RMSE は 0.125, 相関係数は 0.682 であり、糖度の推定よりも推定精度は低くなった。可視光領域は藍色の波長帯域が選択された。

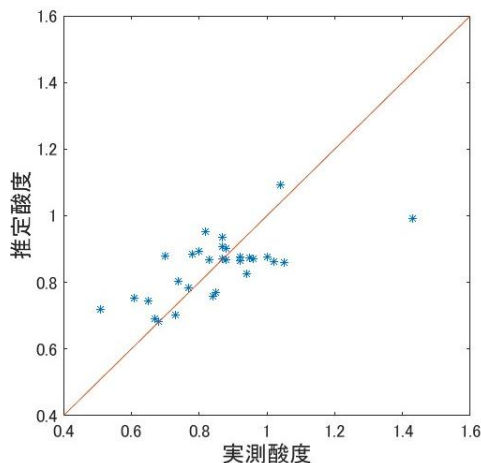


図 2 実験 2：酸度推定の散布図

糖度推定と比較して酸度推定の結果が悪化した理由としては外れ値（酸度：1.43%）の影響が考えられる。また、選択された可視光領域の波長帯を見るとどちらも青～緑色が選択されている。これは、未熟なみかんに多くみられるクロロフィルの含有量が糖度、酸度を個別に推定する際に有用である可能性を示している。

### 4.2 実験 3 の結果および考察

図 3 に実験 3 での推定糖酸比と実測糖酸比の散布図を示す。GA によって選択された波長範囲は、可視光領域が  $\Lambda_1 = [660.06 - 702.10 \text{ nm}]$ 、近赤外領域が  $\Lambda_2 = [895.70 - 1009.96 \text{ nm}]$  となった。RMSE は 2.23, 相関係数は 0.845 となった。相関係数から非常に高い精度で推定できていることがわかる。可視光領域は赤色の波長帯が選択された。

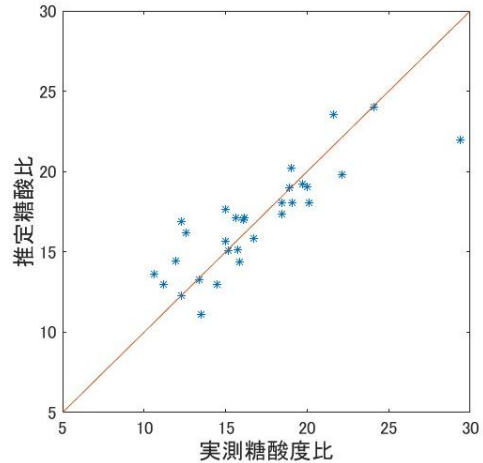


図 3 実験 3：糖酸比推定の散布図

また、実験 1, 実験 2 で推定された糖度と酸度を用いて糖酸比を計算すると、RMSE は 2.69, 相関係数は 0.793 となり、直接、糖酸比を推定したときのほうが推定精度は高くなった。この結果は糖度と酸度の非線形的な関係が原因であると考えられる。糖酸比推定に赤色の波長帯が選択された理由については、みかんに含まれるカロテノイドが関係しており、カロテノイドの含有量とみかんの糖酸比に相関関係があったと考えられる。

## 5. むすび

糖度、酸度、糖酸比推定の結果、相関係数はそれぞれ 0.870, 0.682, 0.845 となり、高い精度で推定できたといえる。このことから、高次元分光画像に含まれる近赤外領域と可視光領域の波長帯域から特定の波長帯域を選択し、その帯域の吸光スペクトル包絡  $S(\Lambda_i)$  を 2 次曲線で近似して、糖酸比を推定することは可能であると考えられる。

今後の展望としては、データ数を増やし、モデルの精度を高めることが考えられる。また、糖酸比に関する成分が特定波長帯域に与える影響が正規分布に従うと仮定し、近似する関数をガウス関数やローレンツ関数に変更するなどして推定精度の向上を目指す。

### 参考文献

- [1] 松浦英之, 堀内正美, 山崎俊弘, 黒柳栄一, 大石剛士, 石上清, “近赤外分光分析法による果実糖度の非破壊計測”, 静岡県農業試験場研究報告, 1991.
- [2] Sajad Sabzi, Hossein Javadikia, Juan Ignacio Arribas, “A three-variety automatic and non-intrusive computer vision system for the estimation of orange fruit pH value”, Measurement, Vol.152, Article.107298, 2020.
- [3] 齋藤香帆, 栗原陽介, “高次元分光画像における吸光スペクトルの非線形的構造を考慮した果物の糖度推定手法の提案”, IIP2025 情報・知能・精密機械部門 (IIP 部門), 2025.