

資料

アボカド追熟非破壊判定手法の開発

—追熟と正反射率の関係—

西山 綺竜¹⁾・小長谷 圭志^{1,2)*}・高橋 学¹⁾・山本 智規¹⁾

Kiryu NISHIYAMA¹⁾, Keiji KONAGAYA^{1,2)}, Manabu TAKAHASHI¹⁾, Tomonori YAMAMOTO¹⁾

Development of non-destructive methods for assessing avocado ripening

Abstract

Avocados are difficult to determine their ripeness because other qualities such as color, hardness, and fat content do not necessarily correspond to the ripening stages. However, as they ripen, wax increases, causing a non-destructive change in their appearance. Therefore, we focused on the fact that the colorless thin film on the surface increases the specular reflection component of light. We aimed to develop a method for non-destructively determining avocado ripeness using surface reflectance. We verified the relationship with ripeness using image analysis and quality measurement. As a result, we found a relationship between avocado ripeness and the specular reflection component, demonstrating the feasibility of using this method to non-destructively estimate avocado ripeness.

Key words: avocado, non-destructive image, ripening stage, specular reflectance, waxes

1. 緒言

アボカドは輸入・国産問わず、追熟に伴う色変化が小さく、販売適期・調理加工適期の判断が難しい。国際的には、追熟の判定基準の一つとして乾物率が使われているが (Drennan, 2001), 乾物率の大小を非破壊的に評価する市販の計測機器は存在しない。

先行研究において、乾物率やアボカド油量が熟度の指標になること (Salameh et al., 2022), 乾物率と油量が相関すること (Lee et al., 1983), アボカドの油量が表面のワックスの質量と相関すること (Erickson and Porter, 1966), ワックス量が増えると光の反射量が増えること (Ward and Nussinovitch, 1996) が別々に報告されており、ワックスの増加を非破壊的に捉えることで乾物率が基準とされるアボカドの追熟度を判定できる可能性

がある。本研究では表面反射によるアボカド追熟度の非破壊判定法の構築を目的とした。

2. 材料および方法

2.1. 供試品種と追熟処理

アボカドの品種は国内で主要なペーコンとした。2023年10月19日に県内の農園で、8年生の樹より未熟な40果実を収穫した。サンプルは様々な大きさに分布するよう選定した。重量は96.4~217.7gで、長径は62.3~91.2mm、短径は50.6~69.3mmであった。また一連の実験の間、果実は10°Cで保管した。

入手した果実のうち20果実は入手翌日から実験を開始し、もう20果実はインキュベータを用いて20°Cで20日間追熟をさせてから実験を行った。

2.2. 乾物率の測定

乾物率の測定は、カリフォルニア・アボカド協会の方法に準拠した (Morris and O'Brien, 1980)。乾燥時間については、時間を増加させても質量が変化しないことは確認して決定した。

サンプルの果実それぞれから約20g切り出したものを準備し、アルミホイルにのせ20時間105°Cの乾燥機

2025年6月10日受領

2025年10月15日受理

*愛媛大学大学院農学研究科 農産物センシング工学教育分野 (責任著者)

¹⁾ 愛媛大学社会共創学部

²⁾ 愛媛大学大学院農学研究科

に入れた。その後、乾燥物を元の湿潤質量の百分率として計算し、乾物率を求めた。統計的解析は t 検定を用いた。

2.3. 光シミュレーション

すでに述べた先行研究の知見 (Erickson and Porter, 1966; Lee et al., 1983) から、乾物率とワックスの面積あたりの質量に以下の式 (1) が近似的に成り立つ。

$$\text{アボカドの乾物率} \propto \text{ワックスの面積あたり質量} \quad (1)$$

表面反射の強さは正反射率で定量できる。正反射率は式 (2) のフレネルの式で求められる。n は表面から赤色光波長 (600~700 μm) 程度の厚みの領域の平均的屈折率であり、アボカドではワックスの屈折率が相当する。n は主成分や厚みが変わらずに密度のみが変わる場合には、n は面積あたりの質量 w と式 (3) の関係性を示す。w' は面積あたりの質量 w に係数を乗じて無次元化している。ワックス主成分である脂肪酸分子の屈折率 n は 1.3~1.5 程度であり、面積あたり質量 w と正反射率は正の相関となる。式 (1) ~ (3) より、実験目的で述べたように、アボカドが追熟する際の乾物率や面積あたりのワックス質量の増加によって正反射率の増加が見込める。

$$\text{正反射率} = \frac{(1-n)^2}{(1+n)^2} \quad (2)$$

$$n = \sqrt{(1+2w')/(1-2w')} \quad (3)$$

2.4. 正反射率の測定と解析

シミュレーションの式 (2) および式 (3) の計算から反射率変化がおよそ 1~3% ほどであることが予想されたため、消光比が 1:100 以上の偏光フィルタを使用した。偏光フィルタを回転させ、反射が最大の画像と最小の画像を引き算することで正反射のみの画像を得た。正反射率を算出するためにホワイトバランスは標準白色板で取った。リング照明の反射領域について (Sun et al., 2025), 光っている最大領域 (直径 45 mm) から光っていない最大領域 (直径 15 mm) を引いた部分に関心領域とし、その領域の RGB 平均ピクセル強度を得た。値は 255 で規格化し、0~1 の間で表した。LED 光源強さ (G 領域で低い) やアボカドの表面吸収の影響 (B 領域で強い) を鑑みて R 反射率を示す。統計的解析は t 検定を用いた。

3. 結果と考察

アボカドの乾物率の測定結果を図 1 に示す。未熟状態では 20% 程であったのに対し、追熟状態では 2% ほど

大きく、追熟状態の下位四分位数は未熟状態の上位四分位数を上回った。また 2 群間の t 検定で有意であった ($p < 0.05$)。次に、正反射率を図 2 に示す。未熟状態では 15% 程であったのに対し、追熟状態では 30% 程度であり 2 倍程増加した。また乾物率同様に値の分布は異なっており、有意差も得られた ($p < 0.05$)。

一方、正反射率はシミュレーションの式 (2) の計算で見積もられる反射率よりも 1 桁大きかった (図 2)。今回の実験で用いた偏光フィルタは消光比 1:100 であることから、入射光で 1%、また反射光で 1% とすると $(1.01 \times 1.01 - 1.00 = 0.02 = 2\%)$ 程度の誤差が説明できる。したがって、シミュレーションとの違いの一部は、拡散成分のうちで偏光方向が入射光のそれと等しい成分強度に由来すると考えられる。

その可能性としてワックスの関与が考えられる。そこで、ワックス質量の実験を追加で実施した。ワックスの面積あたり質量はアラビアゴムで剥離し測定しており、文献 (Middleton et al., 2024) の付録を基にワックス厚みを数 μm と仮定した場合の変化は 2 倍程度と変化率は実験と良く一致したため、式 (3) の大小は成立したと考えられる。今後は、式 (2) に光の拡散成分の寄与を含めることで偏光フィルタを通過したアボカドの反射率を説明できると期待できる。

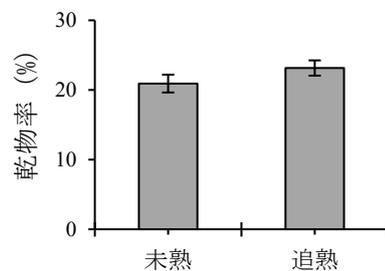


Fig. 1 成熟度の異なるアボカドの乾物率
エラーバーは標準偏差を示す。未熟 (n=20), 追熟 (n=20) である。

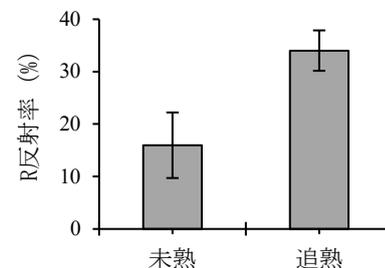


Fig. 2 成熟度の異なるアボカドの正反射率
エラーバーは標準偏差を示す。未熟 (n=20), 追熟 (n=20) である。

謝辞

アボカド果実の提供について、松山市農業指導センターおよび地域農業者の多大な協力を得た。厚く御礼申し上げます。

引用文献

- Drennan, T. (2001) Mexico avocado modification to the requirements and specifications for movement of avocados 2001, USDA Foreign Agricultural Service GAIN Report MX1118: 1–3.
- Erickson, L.C., Porter, G.G. (1966) Correlations between cuticle wax and oil in avocados, In: California Avocado Society Yearbook. California Avocado Society. Ventura, California. pp 121–127.
- Lee, S.K., Young, R.E., Schiffman, P.M., Coggins, C.W. (1983) Maturity studies of avocado fruit based on picking dates and dry weight, *Journal of the American Society for Horticultural Science* 108: 390–394.
- Middleton, R., Tunstad, S.A., Knapp, A., Winters, S., McCallum, S., Whitney, H. (2024) Self-assembled, disordered structural color from fruit wax bloom, *Science Advances* 10: eadk4219.
- Morris, R., O'Brien, K. (1980) Testing avocados for maturity. In: California Avocado Society 1980 Yearbook. California Avocado Society. Ventura, California. pp 67–70.
- Salameh, M., Nacouzi, D., Lahoud, G., Riachy, I., El Kayal, W. (2022) Evaluation of postharvest maturity indices of commercial avocado varieties grown at various elevations along Lebanon's coast, *Frontiers in Plant Science* 13: 895964.
- Sun, C.-C., Chen, P.-Y., Wu, C.-S., Yang, T.-H., Yu, Y.-W., Ma, S.-H. (2025) Improvement of imaging quality with a donut-shaped LED fill light for smartphone flashlight, *Optics Express* 33: 4510.
- Ward, G., Nussinovitch, A. (1996) Gloss properties and surface morphology relationships of fruits, *Journal of Food Science* 61: 973–977.