

資料

## 過熟の指標となるトマトの蛍光強度比 －収穫熟度に依らない指標の一検討－

小長谷 圭 志 (産業イノベーション学科)  
Dimas Firmanda Al Riza (ブラビジャヤ大学)  
Ken Abamba Omwange (京都大学)  
高橋 憲 子 (農学研究科)  
倉本 誠 (学術支援センター)  
小川 雄一・鈴木 哲仁・近藤 直 (京都大学)

Fluorescence intensity ratio of tomato as an index of overripeness: An index regardless of maturity at harvest

Keiji KONAGAYA (Department of Industrial Innovation) ,  
Dimas Firmanda AL RIZA (Universitas Brawijaya) ,  
Ken Abamba OMWANGE (Kyoto University) ,  
Noriko TAKAHASHI (Graduate School of Agriculture) ,  
Makoto KURAMOTO (Advanced Research Support Center) ,  
Yuichi OGAWA, Tetsuhito SUZUKI, Naoshi KONDO (Kyoto University)

キーワード：トマト、蛍光、過熟、収穫熟度、指標

Keywords: tomato, fluorescence, overripe, maturity at harvest, index

【原稿受付：2021年2月1日 受理・採録決定：2021年2月16日】

### 要旨

トマトが流通中に過熟に至るとそれらは市場価値の低下を招く。品質管理の観点では簡易な判定が望ましいが、外観による判定は容易ではない。一方、著者らは、近紫外光励起 (365 nm) の蛍光強度比 (緑色 / 青色) が過熟の良い指標となることを報告した。これまで、樹上で完熟したトマトにおいて蛍光強度比が適用できることが明らかになっているが、実際には完熟手前で収穫し追熟させることが多い。そこで本稿では、トマトの蛍光強度比 (365 nm 励起の緑色 / 青色発光比) が完熟前に収穫した場合にも過熟の指標となるか否かを調べ、収穫熟度に依らないことを述べたものである。

### 1. 背景および目的

トマトの過熟を防ぐには過熟手前でそれを知らせてくれる指標が必要である。トマトの過熟を知る術として、軟化・黒色化・蒂の萎れなどの外観変化に着目する方法は良く知られているが、流通時に並べられた多くのトマトの中から過熟のトマトを検出するのは容易ではない。これは、過熟において可視光吸収色素であるリコピン含量があまり変化しないことにより説明できる (Konagaya et al., 2019)。一方で、紫外光を吸収する物質群は過熟期でもわずかに変化することが知られており (Toor and Savage, 2006)、紫外光励起の可

視蛍光を収穫熟度に依らずに観察できれば、消費者に過熟トマトの消費を促すことができる。また、傷んだトマトを現場で早期に発見することは品質管理の改善にもつながる。既に樹上で完熟したトマトを収穫した場合に 365 nm で励起される蛍光強度比 (緑色 / 青色発光比) が過熟の指標になることは見出されているが (Konagaya et al., 2019)、完熟手前で収穫し追熟させた場合については不明であった。

本論文では過熟の指標となるトマトの蛍光強度比 (365 nm 励起の緑色 / 青色発光比) が完熟前に収穫した場合にも使えるかどうかを検討するため、収穫熟

度範囲緑熟～完熟期について過熟の指標を検討した。

## 2. 試料および方法

### 2.1. 試料

2018年11月26日、2019年1月15日、2019年6月12日に愛媛大学植物工場研究センター（樽見キャンパス）で収穫したトマト計21個（品種：桃太郎）を使用した。収穫時の熟度を判断するため、赤道部3箇所の色を色彩計CR-200（コニカミノルタ製）で測定し、色相が40.4～115°の範囲であることを確認した。質量は51.8～193.9 g、赤道直径は45～79 mmの範囲であった。色彩計測後、試料は暗条件下で京都大学に10～15℃で輸送し、翌日より実験に供した。貯蔵0日目が収穫日に相当する。試料は腐敗までの13日間、インキュベーター（アズワン製）中にて25℃、湿度85±5%の条件で貯蔵された。

### 2.2. 蛍光画像の撮影

過熟の過程で蛍光画像は光源とカメラを用いて撮影された。励起光にはUV-LED（CCS製）を用い、カメラにはデジタルカメラEOS Kiss X7（Canon製）を用いた。カメラレンズの前面にはロングパスフィルターを隙間なく取り付け付けた。サンプル高さにおける光強度は0.7 mW/cm<sup>2</sup>であった。サンプル～光源間、サンプル～撮像素子間の距離は、それぞれ190 mmおよび370 mmであった。なお、カラー写真の照明には、ハロゲンランプ（4,700 K）を用いた。画像の解析にはトマト果実のROI（region of interest, 関心領域）をソフトウェアMATLAB R2018a（MathWorks Inc.）を用いて設定し、ROIにおけるRGB値の平均について解析した。

## 3. 結果

図1aに収穫熟度の異なる（完熟、催色、緑熟期）トマトの成熟の様子を示す。上段に示した完熟収穫トマトでは貯蔵1日目から過熟が始まっており、部分的な黒色化や軟化が生じていた。一方で、催色期や緑熟期で収穫したトマトは過熟がやや遅れ、それぞれ貯蔵3日目、5日目から始まっていた。ただし、過熟の初期における黒色化や軟化の程度は図1aの上段に示した完熟収穫トマトのそれと同様であった。つまり、我が国において多く行われる完熟前収穫とそれに続く追熟過程においても、完熟収穫と同様の過熟を経ることが確認された。

一方、過熟の程度が進むと、外観だけでその度合いを判断するのは難しく別の指標が必要となる。その候補として、図1bにaと同じ果実の蛍光画像（365 nm励起）を示した。まず、図1b上段に示した完熟収穫

の蛍光は、7日目以降に青色から青白色へと変化しており、著者のこれまでの報告と一致した（Konagaya et al., 2019）。図1b中段に示した催色期収穫の蛍光は、より遅れて9日目以降に青色から青白色に変化した。これは過熟の変化が貯蔵3日目から遅れて始まったためと考えられる。最後に、緑熟期で収穫したトマトの蛍光については、青色から青白色への変化が観察されなかったが、これは図1aに示したように外観から推察される完熟日が5日目と遅れていることに由来し、貯蔵9日間の間に過熟に至らなかったためだと考えられる。

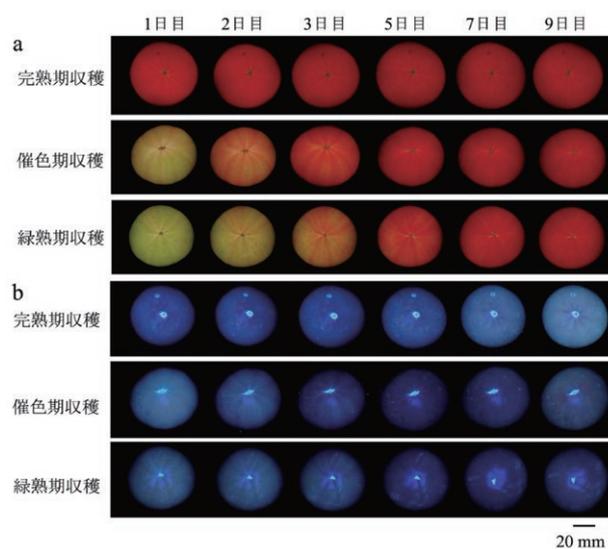


図1 トマトのカラー画像(a)と蛍光画像(b)の収穫後経日変化

次に、収穫熟度に依らずに過熟の程度を定量するのに、蛍光強度比（365 nm励起の緑色/青色発光比）が利用できるかどうかを調査した。これは、蛍光強度の絶対値が光源強度、サンプル・光源・カメラの配置、カメラの感度に依存するため、同じ光源強度、同じ配置、同じカメラで撮影した二つの波長帯域の比を用いることで、より安定した評価を行うためである。すでに、トマトの過熟において蛍光ピーク強度で規格化した365 nm励起のスペクトルは図2aのように長波長側に広がることがわかっており、絶対値測定が困難な蛍光強度の比率を用いることであるサンプルに対して安定的な値を取得できる。さらに、この蛍光強度比は画像撮影においてRGBチャンネルの感度曲線と対応させることができる（図2b）。トマトが過熟する際、その蛍光は青色付近にピークを有し緑色～赤色にかけての波長成分が増加するため、Bチャンネル値で規格化したGチャンネル値に対応し、蛍光画像のG/B比が過熟の指標になると考えた。

図3に21個の果実の365 nm励起におけるG/B比

について完熟時間以降の変化を示す。ここで完熟時間は、色相の時間変化データに対して式(1)で示したロジスティック関数をフィッティングし(Hertog et al., 2004; Schouten et al., 2007; Tijskens and Evelo, 1994)、平衡値を基準としたある時点の色相が初期値の1/1000になった時間として定義した。

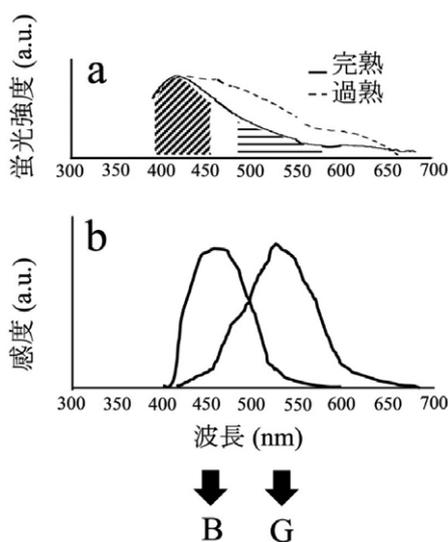


図2 蛍光指標の概念図(トマトの蛍光スペクトル(a)とカメラの感度スペクトル(b)との対応関係)

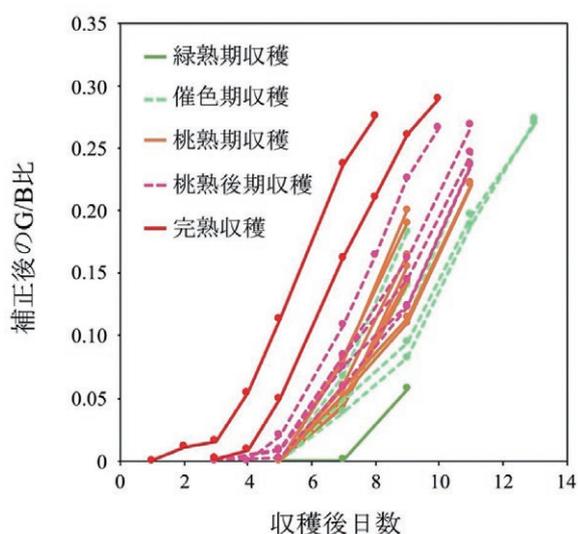


図3 過熟過程における蛍光指標(365 nm 励起、緑色/青色発光比であるG/B比)の変化  
ただし、G/B比は果実毎に経日変化の最小値を差し引く補正をしている

ここで、 $H(t)$  はある貯蔵日数における色相(単位は $^{\circ}$ )、 $H_0$  は貯蔵0日目(収穫日)における色相である。 $H_{+\infty}$  は正の無限時間における色相であり、平衡値に相当する。 $H_{-\infty}$  は負の無限時間における色相となるが、

これは予備実験で求めた未熟な緑色果実の色相平均値 $116^{\circ}$ を用いている。 $k$  は速度定数(単位は $d^{-1}$ )である。フィッティング処理はソフトウェア MATLAB R2018a(MathWorks Inc.)の信頼領域 Reflective 法最小二乗アルゴリズムを用い、その結果すべての果実において reduced- $\chi^2$  は10未満となったことからモデル関数の妥当性を確認した。

上記の結果、図3に示すように、完熟時間以降にはどの果実においてもG/B比の上昇が見られた。G/B上昇開始日時は収穫熟度が手前であるほど遅れ、それは完熟日時が遅れたのと同様であった。フィッティングで得られた完熟日時は1.2~7.5日目の約6日間の範囲で変動し、G/B上昇開始日時の変動範囲も1~7日と6日間であったことから、完熟開始日時の違いはG/B上昇開始時間の違いに概ね対応していると考えられた。また、G/B上昇曲線の全体的な形についても、収穫熟度に依らずに果実間で類似した。一方で、立ち上がりまでの停滞時間や立ち上がりの傾きなどはわずかに異なり、これらの違いは緑熟期~桃熟後期で収穫したトマトでは成熟中に光合成産物が転流しているのに対して、完熟期で収穫したトマトではシンクとの物質交換はなく果実内部での代謝のみが反映されているためだと考えられる。G/B比は成熟様式の違いや収穫熟度の違いがあるにしても、G/B上昇曲線の概形や完熟日時からG/B上昇開始日時までの遅れは同じ温度条件の貯蔵による過熟を一貫して反映しており、365 nm 励起の蛍光画像から得られたG/Bが収穫熟度に依らない過熟の指標になることが確認された。

#### 4. 摘要

本論文では、過熟の指標となるトマトの蛍光強度比(365 nm 励起の緑色/青色発光比)が完熟前に収穫した場合にも適用できるか否かを調べた。その結果、完熟前に収穫し室内で追熟させた場合にも樹上成熟と同様に緑色/青色の蛍光強度比の増加が過熟の良い指標となること、そしてそれは収穫熟度に依らないことを確認することができた。

## 謝辞

本研究は、公益財団法人 園芸振興松島財団の助成を受けて実施された。ここに謝意を表する。

## 参考文献

- Hertog, M.L.A.T.M., Lammertyn, J., Desmet, M., Scheerlinck, N., Nicolai, B.M., 2004. The impact of biological variation on postharvest behaviour of tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology* 34, 271-284.
- Konagaya, K., Al Riza, D.F., Nie, S., Yoneda, M., Hirata, T., Takahashi, N., Kuramoto, M., Ogawa, Y., Suzuki, T., Kondo, N., 2019. Monitoring mature tomato (red stage) quality during storage using ultraviolet-induced visible fluorescence image. *Postharvest Biology and Technology* 160, 111031.
- Schouten, R.E., Huijben, T.P.M., Tijskens, L.M.M., van Kooten, O., 2007. Modelling quality attributes of truss tomatoes: Linking colour and firmness maturity. *Postharvest Biology and Technology* 45, 298-306.
- Tijskens, L.M.M., Evelo, R.G., 1994. Modelling colour of tomatoes during postharvest storage. *Postharvest Biology and Technology* 4, 85-98.
- Toor, R.K., Savage, G.P., 2006. Changes in major antioxidant components of tomatoes during post-harvest storage. *Food Chemistry* 99, 724-727.