追熟に伴うトマトおよびキウイフルーツ果実のクロロフィル蛍光スペクトル変化

福地健一*・嘉数（大野）祐子

木更津工業高等専門学校 292-0041 千葉県木更津市清見台東 2-11-1

Characteristics of Chlorophyll Fluorescence Spectra Variations in Tomato and Kiwi Fruits During Ripening

Ken'ichi FUKUCHI* and Yuko KAKAZU-OHNO

National Institute of Technology, Kisarazu College, 2-11-1 Kiyomidai-Higashi, Kisarazu, Chiba, 292-0041, Japan

Abstract

In this study, we developed a non-destructive technique to evaluate fruit maturity based on fluorescence measurement and investigated its utility. The purpose of this technique is to adequately control the quality of climacteric fruits that show changes in taste and texture during ripening. The fluorescence maturity index (FMI), which is defined as the logarithm of $F685/F740$, was used for the evaluation. Here, $F685$ and $F740$ were the chlorophyll-a fluorescence intensity at 685 and 740 nm, respectively. The fluorescence at wavelength 685 nm is strongly reabsorbed into chlorophyll-a. Therefore, $F685$ increases relative to $F740$ when the chlorophyll content of a fruit decreases during ripening. As a result, FMI increases. We excited fruits using a light wavelength of 620 nm, which is not easily absorbed by carotenoids such as lycopene, and measured the fluorescence spectra emitted from the inside of the fruit. We ripened mature-green tomatoes 'Home-Momotarō' and examined the relationship between FMI and chromaticity (a^* value and a^*/b^* value in the $L^*a^*b^*$ color space). We clarified that FMI began to increase several days before changes in chromaticity. Moreover, after the tomatoes had come to maturity, FMI changed as well as the a^*/b^* value. Experimental results on kiwi fruits 'Hayward' revealed that the FMI changes differed greatly depending on the ripening temperature, and there were good linear correlations between FMI and fruit firmness (during the immature to edible phase) as well as between FMI and sugar/acid ratio (during the immature to fully-ripened phase). These results demonstrate that FMI is applicable to evaluate the maturity of tomatoes and the quality of kiwi fruits. It is thought that this technique can be effectively applied to judge the shipment time and edible period of fruits with constant epicarp color.

Keywords: chlorophyll fluorescence, chromaticity, fluorescence maturity index, fruit firmness, sugar acid ratio

1. 諸 言

2020 年 4 月 23 日受付

2020 年 7 月 9 日受理

*Corresponding author: Ken'ichi Fukuchi
(fukuchi@kisarazu.ac.jp)

近年、高品質な青果物を求める消費者が多くなり、収穫から流通、販売に至るまで、その品質を適切に管理することが求められている¹⁾。特に、クリマクテリック型の果実の場合、追

熟により食味評価が大きく変化するため、それらの熟度を精度よく非破壊で評価する手法の確立と装置の開発が課題となっている²⁾。すでに、果実の力学特性や光学特性を利用した非破壊評価装置が開発され実用化されているが、大型かつ高価格なものが多い²⁾。また、対象となる果実も装置ごとに限定されることから、汎用性の高い評価手法と小型で操作が簡便な装置の開発が望まれる。

我々は、植物葉のクロロフィル蛍光スペクトルを測定し、波長 685 nm 付近のピーク (F685) および 740 nm 付近のピーク (F740) の強度比 F685/F740 とクロロフィル濃度 C との関係性を調べた結果、 C が増加すると F685 がクロロフィル a に強く再吸収されるために、F685/F740 が減少することを明らかにした³⁾。ところで、果実に含まれるクロロフィルは、成熟に伴い分解されて減少することが知られている⁴⁾。従って、果実内部より放出される蛍光スペクトルを測定した場合、成熟に伴い、F685 は F740 に対して相対的に強く観察されるようになり、一定条件のもとでは、ランベルト・ベール則に従い、果実内の C と F685/F740 の対数との間に比例関係が成り立つと予想できる。以上のことから、我々は $\log(F685/F740)$ を蛍光計測に基づく果実の熟度指標 (FMI: fluorescence maturity index) として利用できるのではないかと考えた。物体内部から放出される蛍光スペクトルの計測は、物体表面における光の反射、吸収、散乱等の影響を受けにくいため、それらの影響を複雑に受ける分光反射スペクトルおよび分光透過スペクトルの計測⁵⁾と比較すると容易であり、大きさおよび凹凸や柔毛の有無等の表面状態が、種類あるいは個体間で異なる様々な果実の評価に適していると考えられる。また、励起光源として高強度の単色コヒーレント光が得られるレーザを使用すれば、広範にわたる非接触計測や時間・空間分解計測への応用も可能となる⁶⁾。

これまでに、採取後のトマト (*Solanum lycopersicum* L.) を用いた測定を行い、目視による果皮の着色が観察される前に蛍光スペクトルに変化が現れ、成熟に伴い FMI が増加することを確認している⁷⁾。そこで本研究では、まず、大玉トマトの主要品種の 1 つである‘ホームモマトロウ’を供試して、FMI と果皮色度 ($L^*a^*b^*$ 表色系) の関係を調査し、FMI を指標とした熟度評価の可能性および有用性について検討を行った。次に、新たにキウイフルーツ (*Actinidia deliciosa*) を用いた実験を行った。キウイフルーツは貯蔵性に優れ、ビタミン C、カロテノイド、食物繊維等の機能性成分を豊富に含み人気の高い果実の一つである⁸⁾。一方で、追熟を誘発させるために収穫後にエチレン処理を施す必要があり、収穫時期、貯蔵条件等に追熟速度が左右されることが知られている⁹⁻¹¹⁾。その上、トマトとは異なり、追熟に伴う外観上の変化がないため¹²⁾、消費者が食感、甘味、酸っぱさ等、自分好みの食

べ頃を判断するのが難しいという課題がある。そこで、キウイフルーツの主要品種の 1 つである‘ヘイワード’を供試して、異なる温度で追熟した際の FMI 変化を調査するとともに、熟度の異なる試料を用いて、FMI と果実硬度 (以下、硬度という) および味覚のパラメータとなる糖酸比¹³⁾の関係を調査し、FMI を指標とした品質評価が可能であるか検討を行った。

2. 材料および方法

2.1 蛍光スペクトルの測定方法

FMI を求める基となる蛍光スペクトルの測定装置概要を Fig. 1 に示す。100 W のキセノンランプ光源 (LAX-103, 朝日分光製) の放射光を、可視光照射用のミラーモジュール (MM-VIS, 朝日分光製) と半値幅 11 nm, 中心波長 620 nm のバンドパスフィルター (MX0620, 朝日分光製) を用いて単色化した後、合成石英製の光ファイバー ($\phi 5 \times 1000$ L, 朝日分光製) とロッドレンズ (RLQL80-1, 朝日分光製) を通して集光し、波長 620 nm, 強度 100 W m^{-2} の励起光を、果頂部を上に向けた試料の表面赤道付近に垂直照射した。励起波長については、前報⁷⁾の結果を踏まえ、リコペン等のカロテノイドによる吸収が少ない波長を選択した。試料内部より放出された蛍光を、試料表面に設置した光ファイバー (蛍光検出部) よりマルチチャンネル分光器 (PMA-50, 浜松ホトニクス製) に導き、入射スリット幅 $100 \mu\text{m}$, 露光時間 400 ms の条件においてスペクトル計測を行った。尚、本装置の詳細な仕様については、別報^{14, 15)}に記載されているため省略する。

Fig. 1 の左下に示すように、励起光の照射点を E, 蛍光検

Fig. 1 Block diagram of the device used for fluorescence spectra measurement. The value of r was 30 mm, θ was 45 degrees and L was about 24 mm. The intensity of excitation light (620 nm) on a sample surface was 100 W m^{-2} .

出部をD、励起光の入射軸と蛍光検出軸の交点をOとおき、 $OE = OD = r$ とする。供試したトマトの平均半径が約31 mm、キウイフルーツの平均半径が約25 mmであったことから、一連の測定において、 r を30 mmに固定した。試料表面上の弧DEの長さを L とすると、同一試料であっても L が異なれば、試料中のクロロフィルによるF685の再吸収の割合が異なるため、FMIに影響する。 L が小さいと、クロロフィル濃度の変化量に対してF685の変化量は小さくなり、指標としての感度が低下する。逆に L が大きくなると、蛍光検出部付近の蛍光強度が小さくなり測定精度が低下する。前報⁷⁾において、トマトのFMI変化を感度、精度ともによく観察できたのは、 L が25～35 mmの範囲であった。本実験では、 r を固定したので、 L はOEとODのなす角 θ で決まる。キウイフルーツの場合、予備実験において θ が45°の時に良好な結果が得られたことから（データは示さず）、 θ を45°、 L を約24 mmに固定し、トマトおよびキウイフルーツともに同じ条件で測定を行った。尚、両果実とも、蛍光スペクトル測定前の暗順応は実施しなかった。

2.2 トマトを用いた実験

2.2.1 試料

‘ホームモモタロウ’（タキイ種苗）の断根接木苗を、約40 Lの培養土（花と野菜の土W効果、応用自然科学製）を入れたプランターに定植し、千葉県木更津市内において日当たり良好の場所で栽培した（2019年4月～7月）。開花約50日後、目視により果頂部で緑がわずかに淡く白っぽくなった時点で緑熟と判断¹⁶⁾して採取し、赤道付近の長径が65 mm、短径が60 mm、質量110 g程度の果実13個を選んで、測定用の試料とした。

2.2.2 蛍光スペクトルおよび果皮色度の測定

試料採取後、25℃に制御した人工気象室内（日中12時間は約 $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の白色光照射）で、約17日間追熟し、1日ごとに蛍光スペクトルと果皮色度を測定した。蛍光スペクトルの測定方法は2.1で述べた通りである。果皮色度は色度計（TES-135A、TES製）を用い、2°視野においてCIE $L^*a^*b^*$ 表色系¹⁷⁾の a^* 値、 b^* 値を測定した。尚、蛍光スペクトルは試料赤道上2点について、果皮色度は2点の中間点を含めて計3点について測定を行い、それぞれ平均して試料の代表値とした。以後、同一試料で複数点の測定を行った場合、すべてそれらを平均して代表値を求めることとする。

2.3 キウイフルーツを用いた実験

2.3.1 試料

2018年11月上旬に千葉県松戸市内の果樹園にて、質量

が100 g程度である中玉の‘ヘイワード’を採取した（樹齢、開花日は不明）。直ちに保冷されたクーラーボックスに入れて千葉県木更津市内の実験室に運び、果実表面に傷および色ムラがあるものを除外し、計35個の果実を実験に供試した。試料は各実験操作に応じてA群（5個、106.29 g～108.79 g）、B群（5個、105.83 g～112.16 g）、C群（3個、104.64 g～112.55 g）およびD群（22個、77.21 g～96.81 g）の4つの群に分類し、エチレン吸着剤（TM-1、オルディ製）とともに3℃に設定したクールインキュベータに入れ、貯蔵した。

2.3.2 蛍光スペクトルの測定

採取4日後に、貯蔵していたキウイフルーツのうち、A群（5個）、B群（5個）およびC群（3個）をクールインキュベータより取り出し、各試料（計13個）の赤道上2点について、まず、初日の蛍光スペクトル計測を行った。その後、A群は、そのまま3℃に設定したクールインキュベータに戻して貯蔵した。B群とC群は、エチレン処理を施した後、B群は17.5℃、C群は25℃に設定したインキュベータ内で追熟を行った。各群の全試料について、2日ごとにインキュベータより取り出し、初日と同様に蛍光スペクトル測定を行った。尚、試料の乾燥を防ぐため、蛍光スペクトル測定時以外は、約2 mmの小穴を10個程度開けたポリエチレン袋に入れて保管した。

2.3.3 エチレン処理

試料とゼオライトエチレン約1.7 gを含む果実追熟剤（熟れごろ、日本園芸農業協同組合連合会製）とをポリエチレン袋（280 mm×200 mm、厚さ0.04 mm）に入れて密封し、48時間のエチレン処理を行った。エチレン処理中の温度は、その後の追熟温度にあわせ、17.5℃または25℃とした。ガス検知管（No. 172、ガステック製）で測定したポリエチレン袋内のエチレン濃度は、処理開始より1時間後および24時間後は1600 ppm、48時間後は500 ppmであった。尚、温度以外の条件をそろえるため、各エチレン処理の際、1枚のポリエチレン袋に入れる試料の数は5個とした。

2.3.4 硬度および糖酸度の測定

採取約6週間後に、3℃で貯蔵していたD群（22個）をクールインキュベータより取り出し、追熟しながらFMIと硬度および糖酸度との関係を調べた。

まず、クールインキュベータより取り出した直後のD群22個の中から任意に2個を選び、赤道付近4点の蛍光スペクトル計測を行い、FMIを求めた。その後、同4点の硬度を次の方法で測定した。Fig. 2に示したように、最大荷重が5 kgあるいは1 kgである果実硬度計（KM-5あるいはKM-1、藤原製作所製）の本体部分をX軸ステージに固定した。マイクロメータを回転させ、直径5.0 mm（断面積約 0.20 cm^2 ）の円筒型プランジャーを約 5 mm min^{-1} の一定速度で表皮を薄

Fig. 2 Image of the fruit firmness measurement device. The micrometer was rotated, and the tester (KM-5 or KM-12, Fujiwara Scientific Company, Tokyo, Japan) was moved at a constant rate (about 5 mm min^{-1}). The maximum load value when the cylindrical plunger (5.0 mm in diameter, 0.20 cm^2 in cross-sectional area) had penetrated 5.0 mm was measured.

く削いだ試料表面に挿入していき、果実表面より 5.0 mm 貫通した際の最大荷重値を読み取り、プランジャーの断面積で除した値を kg cm^{-2} で表し、その点における硬度とした。尚、 1.0 kg cm^{-2} ($9.8 \times 10 \text{ kPa}$) のように圧力換算値も併記する。硬度測定後、試料の赤道部分約 40 g を切りだし、ミキサーで粉碎した後にろ過して得られた果汁について、キウイ専用のポケット糖酸度計 (PAL-BX|ACID8, アタゴ製) を用いて糖酸度を測定した。

次に、残りの D 群 20 個について、5 個ごとにポリエチレン袋に入れて 2.3.3 で記述した方法で温度 17.5°C においてエチレン処理を施した後、 17.5°C に設定したインキュベータ内で追熟を行いながら、適宜、蛍光スペクトル、硬度および糖酸度の測定を行った。

3. 結果と考察

3.1 トマトおよびキウイフルーツの蛍光スペクトル変化

Fig. 3 に緑熟で採取したトマト‘ホームモモタロウ’およびエチレン処理後のキウイフルーツ‘ヘイワード’を 25°C で追熟した際の蛍光スペクトル変化の典型例を示す。

まず、トマトの蛍光スペクトル変化を見ると、採取直後（追熟 0 日目）の状態では、F740 が大きく観察されたが、F685 は非常に小さくなっている。前報⁷⁾において、緑熟のトマト果実断面における蛍光分布を測定した結果、果実の内部にお

Fig. 3 Typical fluorescence spectra variations during ripening. The upper graph shows the results for tomato ‘Home-Momotaro’ and the lower graph shows those for kiwi fruit ‘Hayward’. The ripening period is given in the legend of each graph. FMI was defined as the logarithm of $F685/F740$.

いては F685 も強く観察されたことから、短波長側の F685 は、果実中のクロロフィルに強く再吸収されてしまい、果皮表面の蛍光検出部まで到達できなかったと考えられる。追熟 6 日目では、F685 と F740 とともに僅かな増加がみられた。このことは、果実内部に含まれるクロロフィルの分解が始まり¹⁸⁾、励起光がより果実内部まで進入できるようになった結果、蛍光検出部付近の蛍光強度が増加したと考えれば説明できる。追熟 8 日目以降は、さらに果実内部のクロロフィル濃度が減少したためにクロロフィル蛍光自身が弱くなり F740 は減少に転じ、一方で、クロロフィルによる再吸収効果が小さくなったため、F685 は相対的に強く観察されるようになったと考えられる。追熟 10 日目になると、F685 は F740 より大きくなり、明確なピークとして観察されるようになった。10 日目の蛍光スペクトルを基に FMI を計算すると、

$$\text{FMI} = \log(F685/F740) = \log(8250/5940) \approx 0.14 \quad \dots (1)$$

となる。

次に、キウイフルーツの蛍光スペクトル変化を見ると、追熟前

(0日)のF740は、追熟前のトマトと比較すると、三分の二以下であり、追熟日数が増すとともに徐々に増加した。果実内部のクロロフィル濃度は、キウイフルーツの方がトマトより高いため、追熟前は励起光が試料内部まで進入できずに蛍光検出部付近の蛍光強度は小さく、追熟によるクロロフィルの減少に伴い、徐々に蛍光強度が増加したものと考えられる。一方、F685に関しては、追熟前にはほとんど観察されず、追熟に伴い徐々に増加するものの、追熟20日目に果実からアルコール臭がするようになって、トマトと異なり明確なピークとして観察されることはなかった。追熟に伴って果実内部も赤変するトマトとは異なり、キウイフルーツの果実内部は追熟後も濃緑色を示しており、相当量のクロロフィルが存在していると考えられる。これらの違いが、トマトとキウイフルーツの蛍光スペクトル変化の違いとなって観察されたものと考えられる。

尚、Fig. 3に示した蛍光スペクトルより(1)式同様にFMIを計算すると、トマトについては、追熟前が約-1.8、追熟12日目が約0.4、キウイフルーツについては追熟前が約-2.5、追熟20日目が約-0.7であった。F685が明確なピークとして観察されないキウイフルーツにおいても、追熟によりFMIが増加することが確認できた。

3.2 トマトのFMIと果皮色度の関係

一般にトマト果実の熟度は、果皮色度 ($L^*a^*b^*$ 表色系) の a^* 値あるいは a^*/b^* 値を用いて評価される場合が多い¹⁹⁾。特に、 a^*/b^* 値は、追熟初期 (催色期～半熟期) において、果実の頂部、腹部、底部でほぼ同様の値を示し、目視による果実の着色程度との間に比例関係があることが報告されている²⁰⁾。そこで、追熟日数に対するFMI、 a^* 値および a^*/b^* 値の変化を比較することにした。ところで、2.2.1で述べた通り、緑熟の判断は目視で行ったため、採取日から着色開始日までの日数は、試料ごとに様々であった。つまり、採取時点での各試料の熟度は異なっていたと考えられ、採取日を基準として日ごとの変化を比較することは適切でない。そこで、各試料の a^* 値が負 (緑色方向) から正 (赤色方向) に転じた日を基準とし、基準日 (0日) の前後8日間 (-8日～+8日) の値を比較することとした。供試した試料13個の中から、全期間 (-8日～+8日) でデータが得られた10個の試料について、日ごとに各指標 (FMI、 a^* 値、 a^*/b^* 値) の平均値を求めた。結果をFig. 4に示す。

初日 (-8日) と最終日 (+8日) での各指標の値およびその変化量は、 a^* 値が約-12から約35まで約47の増加、 a^*/b^* 値が約-0.5から約2.2まで約2.7の増加、FMIが約-1.8から約0.5まで約2.3の増加であった。目視観察の結果も踏まえ、変化の様子をグラフ上で比較する。 a^* 値および a^*/b^* 値については、-8日から-3日まで大きな変化はな

Fig. 4 Changes of FMI, a^* value and a^*/b^* value in tomato 'Home-Momotarō' during ripening. "0" of the horizontal axis indicates the day when the a^* value changed to positive (plus) from negative (minus). Each plot was a mean value of 10 samples, and the error bars show standard deviations ($\pm\sigma$, $n = 10$).

は一定であり、果皮色も緑色のままであった。-2日に a^* 値は約-11、 a^*/b^* 値は約-0.4とわずかに増加したが、ほとんどの試料で果皮色の変化は観察されなかった。-1日になると a^* 値は約-8、 a^*/b^* 値は約-0.3まで増加し、目視でも果実の一部がわずかに着色したことが確認できた。 a^* 値および a^*/b^* 値がプラスに転じた基準日 (0日) には、果実全体に橙赤色が広がったことが確認できた。+1日以降、両値ともに

Fig. 5 Comparison of FMI, a^* value and a^*/b^* value after normalization. The data in Fig. 5 is a normalized representation of the data in Fig. 4 as follows: each index value before ripening (value of -8 d) was assumed to be 0 and that after ripening (value of $+8$ d) was assumed to be 1.

急増したが、 a^* 値は+4日に+35となり増加が止まり、それ以降は一定値を保った。一方、 a^*/b^* 値については、+4日に約1.9になった後、+8日に約2.2となるまで増加を続けた。目視では、+2日に完全に着色して完熟した後、少しずつ赤味が深くなり、+8日には、赤色が黒みをおび、肉質の軟化も確認できたことから過熟の状態に達したと考えられる¹⁶⁾。FMIについては、-5日に約-1.7となり、初期値よりわずかな増加がみられた。Fig. 4のエラーバーが示す通り、-5日付近では、 a^* 値および a^*/b^* 値と比べFMIの偏差が大きいことから、Microsoft EXCELのデータ分析ツール (t検定: 一対の標本による平均の検定) を用いて、-8日と-5日の値を検証した結果、有意差が認められた ($P < 0.05$)。-5日以降、+8日までFMIは増加を続け、全体としてはシグモイド曲線に近い変化となった。

FMIと a^* 値および a^*/b^* 値の変化の割合を比較するため、各指標の-8日の値を0、+8日の値を1として正規化を行い、Fig. 5に再プロットした。Fig. 5より、FMIは-5日から基準日(0日)までの間、 a^* 値および a^*/b^* 値を上回る割合で増加したことがわかる。また、完熟したと考えられる+2日から過熟となったと考えられる+8日までの間、FMIは a^*/b^* 値とほぼ同じ割合で変化をした。永田¹⁸⁾が抽出法により求めたトマト果実の各追熟段階における色素含有量を見ると、緑熟期から半熟期にかけて、クロロフィルは最大含有量に対して約7割の減少、同じくリコペンおよび β -カロテンはそれぞれ約1割および約3割の増加であった。緑熟期から半熟期におけるクロロフィル含有量の変化の割合が、リコペンおよび β -カロテンのそれより大きいため、-5日から0日までFMIの

変化の割合が a^* 値および a^*/b^* 値の変化の割合を上回ったと考えられる。

以上のことから、FMIを指標として、緑熟期から過熟期のすべての段階でトマトの熟度評価を行うことが可能であることがわかった。特に、果皮色度に変化があらわれる数日前よりFMIの増加が始まることから、出荷時期の判断を行う上で、本手法を有効に利用できると考えられる。

3.3 異なる温度で追熟したキウイフルーツのFMI変化

エチレン処理を行わず3℃で貯蔵した試料 (A群)、エチレン処理を行い17.5℃で追熟した試料 (B群) および25℃で追熟した試料 (C群) のFMI変化をFig. 6に示す。追熟前のFMIは、全群とも約-2.5であった。

まず、A群はエチレン処理をしておらず3℃という低温に保ったにもかかわらず、10日目以降にFMIは少しずつ増加しはじめ、30日後には約-2.2までになった。この状態で貯蔵した場合でも、僅かずつクロロフィルが分解されると考えられる。渡辺²¹⁾はキウイフルーツ ‘ヘイワード’ を4℃で貯蔵し、抽出法により総クロロフィル含量を測定した結果、貯蔵に伴って総クロロフィル含量が減少することを報告しており、本測定もこれに矛盾しない結果となった。

次に、B群のFMI変化だが、4日目~10日目にかけて約-1.8まで急激に増加 (初期急増) し、その後、22日目にかけて約-1.4まで緩やかに増加 (中期緩増)、24日目以降は再び急増 (後期急増) に転じ、30日目に約-0.8となった。追

Fig. 6 Changes of FMI in kiwi fruits ‘Hayward’ under different ripening conditions. Group A: 3 samples stored at 3 °C without ethylene pretreatment, Group B: 5 samples ripened at 17.5 °C after ethylene pretreatment (48 h, 500 to 1600 ppm, 17.5 °C) and Group C: 5 samples ripened at 25 °C after ethylene pretreatment (48 h, 500 to 1600 ppm, 25 °C).

熟 30 日目で、試料よりアルコール臭と果梗部からの果汁漏れが観察されたため、過熟と判断し、測定を終了した。一方、C 群の場合、変化の傾向は、B 群と似ているものの、初期急増は 2 日目から、後期急増は 14 日目から始まり、20 日目には過熟の状態となる等、B 群の約三分の二の日数で、FMI が同程度まで増加した。これより、追熟温度が高い C 群の方が B 群より追熟速度が速いと判断できる。

以上のように、追熟温度の違いによって、FMI の変化の様子は、大きく異なることが明らかとなった。このような温度による追熟速度の違いは、エチレン処理時の温度およびその後の追熟温度により、キウイフルーツ自身によるエチレン生成が開始されるまでの日数に差があるため⁹⁾と考えられる。

3.4 追熟中のキウイフルーツにおける FMI と硬度および糖酸比との関係

キウイフルーツ D 群を用いた追熟実験における、FMI 値と硬度および糖酸比との関係を Fig. 7 に示す。まず、追熟前の FMI が約 -2.2 の試料における硬度は、約 14 kg cm^{-2} (約 $1.4 \times 10^3 \text{ kPa}$) であった。その後、FMI に比例して硬度は減少し、FMI が約 -1.6 のときに硬度は約 1.2 kg cm^{-2} (約 $1.2 \times 10^2 \text{ kPa}$) となった。一方、FMI が -1.6 以上の領域では硬度の減少は、極めて緩やかなものとなり、FMI が -1.0 になると約 0.55 kg cm^{-2} (約 $5.4 \times 10 \text{ kPa}$) となった。‘ヘイワード’果実の可食硬度についての報告は多くないが、硬度 $0.6 \sim 1.2 \text{ kg cm}^{-2}$ ($6 \times 10 \sim 1.2 \times 10^2 \text{ kPa}$) を可食果とする報告²²⁾や、 $1.0 \sim 1.4 \text{ kg cm}^{-2}$ ($9.8 \times 10 \sim 1.4 \times 10^2 \text{ kPa}$) がとくに旨いとする報告²³⁾を参考にすると、本実験においては、硬度の減少が緩やかになり始める FMI 値 -1.6 前後が可食期と考えられる。本追熟条件においては、追熟前 (未熟) から可食になるまでの段階では、FMI (X) と硬度 (Y_f) の間に $Y_f = -22.1X - 34.1$ ($R^2 = 0.977$, $P < 0.001$) のよい直線関係を見出すことができた。尚、採取してから追熟を開始するまでの貯蔵期間が、D 群と B・C 群では異なるため、単純には比較できないが、Fig. 6 において、FMI 値が -1.6 程度となるのは、B・C 群ともに、中期緩増が観察された時期であり、B 群 (追熟温度 17.5°C) では追熟 14 日目、C 群 (追熟温度 25°C) では追熟 10 日目前後と考えられる。

次に、果実のおいしさを最も直接的に表すパラメータである糖酸比¹³⁾ (Y_s) に関しては、追熟前の約 7 から完熟後の約 18 まで増加し、未熟から完熟に至るまでの全段階にわたって FMI (X) との間に、 $Y_s = 10.2X + 28.5$ ($R^2 = 0.889$, $P < 0.001$) の直線関係がみられた。ヘイワード可食果の糖度は約 13%，酸含量は約 1.1～1.2%とする報告²²⁾を参考にとすると、糖酸比で約 11～12 となる。これを糖酸比と FMI との関係式に代入すると FMI は -1.7～-1.6 となり、可食果の

Fig. 7 Relationships between FMI and fruit firmness ($\triangle$) and FMI and sugar/acid ratio ($\circ$) in ‘Hayward’ kiwis at various stages of maturity. The samples (Group D) had been preserved at 3°C for six weeks after harvesting and ripened at 17.5°C after ethylene pretreatment (48 h, 500 to 1600 ppm, 17.5°C). Fruit firmness (kg cm^{-2}) was calculated by dividing the maximum load value by cross-sectional area (0.20 cm^2) of the cylindrical plunger.

硬度に対応した FMI 値 -1.6 とはほぼ一致する。また、それ以降のさらなる追熟により、糖酸比が増加するため、味覚的には、より甘いと感じるようになると予想される。Fig. 7 のグラフを参照すれば、FMI の値から硬度と糖酸比の両方を推定することが可能となるため、消費者の好み (硬度、味覚) にあった食べ頃の判断に利用できると考えられる。

キウイフルーツの追熟速度は、貯蔵条件 (期間、温度)、エチレン処理条件 (濃度、時間、温度)、その後の追熟温度で大きく異なり、さらに産地や個体差も大きく影響する⁹⁻¹²⁾。容易に FMI が測定できれば、個体に適した追熟条件の設定や食べ頃に合わせた出荷が可能となる等、生産者ニーズに対応できると考える。また、緑色のまま完熟するミニトマトの品種として注目されている‘みどりちゃん’、西洋ナシの‘ラ・フランス’、白桃の‘さくら’といった、果皮色の変化がほとんど観察されない種類の果実を用いて蛍光スペクトルの測定を行ったところ、追熟により FMI が増加することが確認できた (データは示さず)。これらの品種に対しても、硬度や糖酸比等と FMI との関連を調査することで、本手法による熟度評価が可能になると考える。一方、本研究では、蛍光スペクトルの測定に、励起光源としてキセノンランプ、蛍光検出器としてマルチチャンネル分光器を使用しており、このままでは汎用性が低い。そこで、今後、半導体レーザあるいは高輝度 LED を励起光源とし、高感度フォトダイオードと狭域バンドパスフィルターを組み合わせることで、蛍光検出を行うことで、安価で携行可能な計測器を開発することを検討している。

4. 摘 要

果実内部から放出されるクロロフィル蛍光スペクトルを測定し、クロロフィル濃度と密接に関連する蛍光強度比 F685/F740 の対数を指標（FMI）として、非破壊で果実の熟度および品質評価が可能であるか検討を行った。

緑熟のトマト‘ホームモモタロウ’を追熟し、FMI と果皮色度（ a^* 値および a^*/b^* 値）との関係を調べた結果、果皮色度に変化があらわれる数日前より FMI の増加が始まり、完熟後は a^*/b^* 値と同様の变化をすることが明らかとなった。キウイフルーツ‘ヘイワード’を用いた実験では、追熟温度により FMI の変化が大きく異なること、一定条件で追熟を行った場合、FMI と硬度との間では未熟から可食までの段階において、FMI と糖酸比との間では未熟から完熟に至る全段階において、それぞれ直線関係があることがわかった。

以上のことから、同一装置による蛍光スペクトル計測に基づき、FMI を指標としてトマトの熟度評価およびキウイフルーツの品質評価を行うことが可能であり、本手法は、追熟しても果皮色が変わらない果実の出荷時期や食べころの判定に有用であると考えられる。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 JP18K05913 の助成を受けた。

引用文献

- 1) 石川豊. 包装資材の特性に基づいた青果物の輸送並びに貯蔵中の品質保持に関する研究. 日本食品保蔵科学会誌. 42: 29–33. 2016.
- 2) 大森定夫, 平田晃, 鷹尾宏之進, 中元陽一, 藤岡修. 青果物の非破壊品質評価技術に関する開発研究. 農業機械化研究所研究報告. 40: 1–64. 2011.
- 3) 高橋邦夫, 峰内（福地）健一, 江森康文, 小林智, 石井弘允. レーザ誘起蛍光法による植物の生育状態のモニタリングに関する基礎的研究. 照明学会誌. 79: 86–92. 1995.
- 4) 立木美保. エチレンによる果実の成熟・老化制御機構. 果樹研究所研究報告. 6: 11–22. 2007.
- 5) 社団法人照明学会編. 光の計測マニュアル. 日本理工出版会, 東京. 352–369. 1990.
- 6) 大澤敏彦, 小保方富夫. レーザ計測. 裳華房, 東京. 1–26. 1994.
- 7) 福地健一, 嘉数祐子. クロロフィル蛍光計測による大玉トマトの熟度評価. 木更津工業高等専門学校紀要. 52: 41–48. 2019.
- 8) 西山一郎. キウイフルーツの消化促進効果に関する研究動向—アクチニジンの役割—. 栄養学雑誌. 72: 292–301. 2014.
- 9) 矢野昌充. キウイフルーツの追熟特性の解明ならびに高品質化に関する研究. 日本食品保蔵科学会誌. 29: 51–55. 2003.
- 10) 村上覚, 鈴木麻友, 服部憲明, 佐々木俊之. キウイフルーツ‘レインボーレッド’の収穫時期および予冷条件の違いが 1-MCP の処理効果に及ぼす影響. 園芸学研究. 15: 73–79. 2016.
- 11) 村上覚, 神谷健太, 佐々木俊之. キウイフルーツ‘レインボーレッド’における弾性指標による熟度の評価. 園芸学研究. 16: 89–93. 2017.
- 12) 澤田達也, 瀬尾康久, 森嶋博, 芋生憲司, 川越義則. キウイフルーツの貯蔵および追熟に関する研究（第 1 報）. 農業機械学会誌. 54: 61–67. 1992.
- 13) 伊藤三郎. 果実の機能と科学（食物と健康の科学シリーズ）. 朝倉書店, 東京. 63–67. 2011.
- 14) 嘉数（大野）祐子, 福地健一, 高橋邦夫. 2 種の UV 励起光によるラッカセイ生葉の LIF スペクトル変化および蛍光葉内分布. 植物環境工学. 22: 100–106. 2010.
- 15) 福地健一, 嘉数（大野）祐子. UV-B 照射がラッカセイ葉の蛍光スペクトルおよび表皮の分光透過特性に及ぼす影響. 植物環境工学. 28: 18–28. 2016.
- 16) 農文協編. トマト大辞典. 農山漁村文化協会, 東京. 163–180. 2015.
- 17) 財団法人日本色彩研究所編. 色彩科学入門. 日本色研事業株式会社, 東京. 49–63. 2000.
- 18) 永田雅靖, 山下市二. トマト果実に含まれるクロロフィルおよびカロテノイドの同時, 簡便定量法. 日本食品工業学会誌. 39: 925–928. 1992.
- 19) 菅理哉, 小出章二, 折笠貴寛, 中村宣貴, 椎名武夫. 保蔵温度の異なる緑熟トマトの追熟における果皮色, 積算エチレン生成量および果実品質の変化. 日本食品保蔵科学会誌. 40: 279–283. 2014.
- 20) 繆冶煉, 堀部和雄, 加藤元保, 青木勝平, 岩井静子. トマト果実の色と食味の関係. 植物工場学会誌. 12: 242–247. 2000.
- 21) 渡辺慶一, 高橋文次郎. 緑色系, 黄色系キウイフルーツ果実の発育および貯蔵中のクロロフィル, カロテノイド色素. 園芸学会雑誌. 68: 1038–1043. 1999.
- 22) 小原均, 岡本敏, 岸田佳子, 大川克哉, 松井弘之, 平田尚美, 高橋英吉. エセフォン処理がキウイフルーツ‘ヘイワード’果実の樹上成熟に及ぼす影響. 園芸学会雑誌. 66: 273–281. 1997.
- 23) 伊藤三郎, 橋永文男. エチレンによるキウイフルーツの追熟促進. 鹿児島大学農学部学術報告. 35: 49–53. 1985.