

(続紙 1)

京都大学	博士（農学）	氏名	Nie Sen
論文題目	Fluorescence Evaluation of Kiwifruit Maturity and Ripeness in Pre- and Post-harvest Stages (蛍光技術を利用した収穫前から収穫後におけるキウイフルーツの熟度評価)		
(論文内容の要旨)			
キウイフルーツはアジアで多く生産されている果実で、近年の健康志向とその栄養価から過去 10 年間に於いて世界的な生産量は増加傾向にあり、日本でも親しまれている果物の一つである。その果実は、開花後 200 日前後までは樹上で糖度の指標である SSC（可溶固形物量）が徐々に増加した後、貯蔵段階でエチレン処理などにより 14 %を超えるようになる。このとき、収穫時の糖度にばらつきがあると、貯蔵中に過熟になるものが出てくる。そのため商品価値を保ち、適切なタイミングで販売するには、成熟過程から追熟過程にかけて SSC をモニタリングする必要がある。これまでに、屈折式糖度計、硬度計、および果肉測色計等のサンプリング方式、ならびに非破壊計測として近赤外分光技術を利用した糖度計が用いられてきた。近赤外分光技術を用いた糖度計は可搬型の装置が市販されているが、高価なことから安価で簡便な SSC 推定技術が求められている。そこで本研究では、蛍光計測法に着目し、キウイフルーツの成熟度と収穫後の熟度評価への応用可能性を探索した。 本論文は 6 章で構成され、第 1 章では本研究の背景・目的を述べた後、第 2 章で実験に使用した Hayward と ZESY002 の 2 品種および、計測装置やデータ解析方法について述べている。第 3 章では、収穫期を決定するために成熟段階の Hayward に着目し、キウイフルーツの SSC を蛍光反応でモニタリングした。励起蛍光マトリックス（EEM）を測定した結果、成長段階の SSC と相関の高い 2 つの蛍光領域、領域 A（300～400 nm 励起／400～600 nm 蛍光）と領域 B（370～700 nm 励起／660 および 750 nm の蛍光）が確認された。PLSR（部分最小二乗回帰）を使って解析したところ、370 nm で励起した際の、400 から 600 nm の発光が選択され、RMSE（二乗平均平方誤差）0.65%、相関係数 0.87 を得た。この知見を元にして蛍光画像および可視画像を取得するために、370 nm に中心波長をもつ紫外 LED と白色 LED、ならびに可視カメラを用いたダブルライティングイメージング装置を構築し、そこから得た色とテクスチャの特徴量を組み合わせた SSC 推定モデルを構築した。このモデルの RMSE は 0.39% で、決定係数は 0.94 となった。 第 4 章では、成熟期の ZESY002 に着目した。ここでは第 3 章の実験と同様に EEM から領域 A（280～400 nm の励起／400～600 nm 蛍光）および、領域 B（350～700 nm 励起／660 および 750 nm の 2 つの蛍光）が観察された。EEM データに基づく PLSR による解析から、SSC および果肉の色相の推定には、360～370 nm の光で励起し、400～600 nm の蛍光を検出することが有効であることを見出した。このときの SSC 推定において、RMSE、0.81%、決定係数 0.96 を、果肉の色相の推定では RMSE、0.0064 %、決定係数 0.97 の精度を得た。さらに、ダブルライティングシステムを用いて果実表面のカラー画像および蛍光画像から SSC と果肉の色相予測モデルを個別に作成したところ、SSC の RMSE は 0.76%、決定係数は 0.97 に、果肉色相予測モデルの RMSE は 0.009%、決定係数は 0.94 となった。これらの手法で得られる評価値を Harvest index と定義し、キウイフルーツの成熟状態を非破壊的に監視することを提案した。 第 5 章では、収穫後の保存期間中における Hayward の SSC のモニタリングを行った。このとき、貯蔵温度の異なる環境（4℃と 24℃）の 2 区を用意し、追熟速度の異なる環境で実験を行った。EEM データより、領域 A（280～400 nm 励起／400～600 nm 蛍光）および領域 B（350～700 nm 励起／660～750 nm 蛍光）を見出した。蛍光強度の時間変化から葉緑素と関連すると考えられる領域 B の蛍光変化は、両実験区で追熟中の SSC の変化と高い相関性を示したため、PLSR を用いて SSC の推定モデルを構			

築した。このモデルをそれぞれの実験区で評価したところ、4℃処理では RMSE、0.93%、決定係数 0.82 を示し、24℃処理では RMSE、1.09%、決定係数 0.86 と良好な結果を得た。

第6章では、この2品種に対して蛍光技術が収穫前後において成熟度と追熟程度の推定可能性がある結論づけた。特にSSCの推定には2つの蛍光領域A（280～400 nm励起／400～600 nm蛍光）と領域B（350～700 nm励起／660 nmおよび750 nmの蛍光）が重要であることを挙げ、その波長帯を利用して開発された蛍光・可視画像を得られるダブルライティングシステムの有用性について述べている。また、このシステムで用いた紫外LEDの波長は370 nmであり、EEMデータで得られた最適値367nmに対して60%の照射効率であったことを課題点として挙げるとともに、今後の将来展望についても触れ、本論文を総括している。

注) 論文内容の要旨と論文審査の結果の要旨は1頁を38字×36行で作成し、合わせて、3,000字を標準とすること。

論文内容の要旨を英語で記入する場合は、400～1,100 wordsで作成し
審査結果の要旨は日本語500～2,000字程度で作成すること。

(論文審査の結果の要旨)

キウイフルーツはクライマクテリック型の果実に分類されるが、自らエチレンを生成しないため、収穫後の追熟には人為的なエチレン処理が必要となる。そのようなポストハーベスト処理において、収穫時の成熟度が同程度であることが望ましく、それを非破壊的に評価できる安価な技術はキウイフルーツの生産において重要である。また、市場への出荷タイミングを考慮すると、貯蔵中にも同様に糖度の指標となるSSC(可溶固形物量)を画像で簡便に推定できる技術は、過熟となって廃棄処分される果実の削減に貢献する。本論文は、SSCの推定に可視と蛍光画像を利用する技術の開発を試みたものであり、キウイフルーツの成熟・追熟過程における蛍光特性の変化や果肉の色相変化について詳細に調査し、最適な励起・発光波長、および果皮のテクスチャを利用した解析方法について提案している。評価できる点は以下のとおりである。

1. 2種類の品種(Hayward と ZESY002)について、成熟過程の蛍光特性を取得し、両品種でSSCの増加と共に2つの領域(領域A:280~400 nm 励起/400~600 nm の蛍光、領域B:350~700 nm 励起/660 nm および750 nm の蛍光)の蛍光強度が高くなること、および収穫後の Hayward の追熟過程では2つの領域の蛍光強度が減少することを見出した。
2. 画像からSSCを非破壊で評価するために、370 nmの紫外LEDと白色LEDを組み合わせたダブルライティングイメージング装置の構築、ならびにテクスチャ、カラーおよび蛍光画像を組み合わせた解析方法の提案により、熟度を非破壊評価できることを示した。
3. ダブルライティングイメージング装置で得た画像を用いることで、成熟段階の ZESY002 の果肉の色相を非破壊推定できることを明らかにした。

以上のように、蛍光分光技術は、キウイフルーツの成熟および追熟過程を非破壊でモニタリング可能であり、品質の向上や食の安全・安心、食品ロス問題等に貢献できることから、生物センシング工学、農業システム工学、フィールドロボティクスの発展に寄与するところが多い。

よって、本論文は博士(農学)の学位論文として価値あるものと認める。

なお、令和2年2月10日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士(農学)の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。

また、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

注) 論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。

ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日: 年 月 日以降(学位授与日から3ヶ月以内)