

# 高性能な非破壊「糖・酸度計」の実用機開発

電子情報科 専門研究員 下村 義昭

果物の高品質・ブランド化では果物個々の品質管理が重要となる。また、柑橘類では糖度と僅か1%前後の微量な酸度が味を左右する重要な品質項目となる。光を用いて糖度と微量な酸含量を正確に非破壊計測するには、果実による光散乱の影響と果実の内部温度による光吸収への影響をそれぞれ排除する必要がある。本開発ではこれまでに光散乱の影響を受けない独自の非破壊計測技術をベースに糖・酸度と同時に果実の内部温度も計測する新たな手法を考案した。また、本手法について実験・理論両面で検証した結果、果実の成分濃度に加えて温度を実用精度で同時計測できること確認した。

## 1. 緒言

近赤外分光法<sup>[1]</sup>は1960年代に小麦粉の水分の測定方法として米国で考案され、今日では果実を初めとする食品の品質管理、さらには医療診断とその適用範囲は広がり非破壊・非侵襲計測における重要な分析手法となっている。いずれの分野においても、光を強く散乱する散乱体の成分分析を目的としている。

光学的に透明な媒質の場合、散乱の影響を受けない為、吸光度からランベルト・ベールの法則を用いてその成分を簡単に定量することができる。しかしながら、散乱体では照射した光の反射光量が吸収と散乱の影響を同時に受ける為、反射光量から吸収成分のみを分離することは難しく、単純には反射スペクトルから成分を定量することができない。そこで、これまでの近赤外分光法では試料からの反射スペクトルを計測し、その2次微分値と成分濃度を関連付ける検量線を多変量解析により作成して成分濃度を定量してきた。こうした微分処理を行うには連続したスペクトルデータが必要なためハロゲンランプと分光器を備えた計測システムが要求される。

一方、著者はこれまでに果実糖度の非破壊計測を目的に空間分解分光法をベースとした非破壊計測手法を提案した<sup>[2]</sup>。1本の光照射ファイバーと2本の受光ファイバーを基本構成とする本計測手法をTFDRS (Three-Fiber-Based Diffuse Reflectance Spectroscopy)法と呼ぶ。TFDRS法では、図1に示すように1本の光照射ファイバーを用いて果実にレーザー光を照射する。果実に照射されたレーザー光は果実内部で散乱と吸収を繰り返し、その反射光の一部が2本の受光ファイバーで受光される。受光した2つの反射光量 $i_{ref}$ 、 $i_{sig}$ から反射率 $R = i_{sig} / i_{ref}$ を算出し、下記式で表される相対吸光度比 $\gamma$ を求める<sup>[2]</sup>。

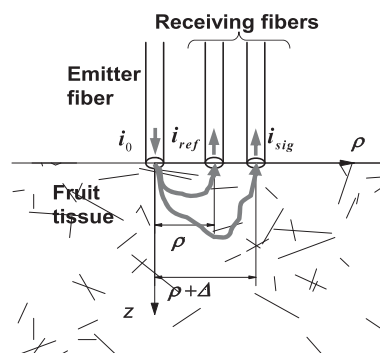


図1 TFDRS法の概略図。1カ所から光を照射し、異なる2カ所で内部からの拡散反射光を受光する。

$$\gamma(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \frac{\ln(R(\lambda_3)) - \ln(R(\lambda_1))}{\ln(R(\lambda_2)) - \ln(R(\lambda_1))} \quad (1)$$

ここで、 $R(\lambda_1)$ 、 $R(\lambda_2)$ 、 $R(\lambda_3)$ はレーザー光の波長 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ での反射率をそれぞれ表す。相対吸光度比 $\gamma$ は果実糖度との高い直線相関を有しており、これにより半導体レーザーや発光ダイオード等の離散スペクトル光源を用いた糖度の非破壊計測が可能となる<sup>[2,3]</sup>。

しかしながら、水を多く含む果実や生体等では相対吸光度比 $\gamma$ が測定部位の温度の影響を受けて変化してしまう。これは、主成分となる水の吸収係数が温度によって変化するためである。こうした温度変化を放射温度計等で表面温度を測定し補償することも可能であるが、被検体を室温に馴染ませて表面と内部の温度を同じにする必要がある。しかしながら、微量な血液成分や酸含量等を測定する場合、僅かな表面と内部の温度差でも大きな測定誤差となるため、被検体を室温に馴染ませた程度では実用的な精度の実現は難しい。

そこで、本研究ではこれまでに提案したTFDRS法をベースに測定対象の内部温度で補償する成分濃度の非破壊計測技術の開発を目的としている。尚、本報告では平成24年度に実施した内容について報告する。

## 2. 研究内容と結果

### 2.1 波長可変レーザーを用いた実験装置

図2にTFDRS法をベースとした反射率の計測装置の概略図を示す<sup>[2]</sup>。光源に繰り返し周波数5 kHz、パルス幅100 ns以下、平均出力約60 mWの電子制御波長可変Ti: sapphireレーザーを用いた。検出プローブの中心に配置した光照射ファイバーを介してレーザー光を果実に照射し、一部果実からの反射光を検出プローブ中心から半径の異なる2つの円周上に配置した複数の受光ファイバーで受光した。半径毎に集めた各反射光  $i_{ref}$ 、 $i_{sig}$  をフォトダイオードで検出し、2位相のロックインアンプで増幅した後にAD変換した。レーザー光の波長を1 nmステップで900 - 1070 nm の範囲で掃引しながら各波長の相対反射率  $R = i_{sig} / i_{ref}$  を一定の時間間隔で平均して算出した。

また、果実サンプルとしてリンゴを皮付きのまま用いた。果実サンプルの温度は室温と同じ温度に馴染ませることで設定した。各サンプルは反射率測定後に放射温度計で測定部表面の温度を測定し、その後測定箇所を中心に表皮から  $\phi 35 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  の形状にくり抜き、その果汁の糖度を屈折糖度計で測定した。

### 2.2 実験結果と考察

図3 (a)に4つの相対吸光度比  $\gamma$  の一次多項式により果実糖度を推定した結果を示す。横軸の糖度は市販の屈折糖度計を用いて測定した値(Brix%)である。また、4つの相対吸光度比では  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  をそれぞれ900 nm、980 nmとし、波長  $\lambda_3$  に930 nm、960 nm、1020 nm、1040 nmをそれぞれ用いた。果実糖度の測定精度は0.41 Brix%(理論値0.31 wt%)と果実温度の影響を受けることなく実用的な精度での糖度測定が可能であることが検証された。

次に、糖度推定で用いた上記の波長と相対吸光度比  $\gamma$  により果実温度を推定した結果を図3 (b)に示す。横軸の温度は放射温度計で測定した果実の表面温度である。本来は内部温度と比較すべきであるが、ここでは果実温度を室温に馴染ませて測定しており、内部温度と表面温度の違いは小さいものと考えた。果実温度の測定精度は0.34 °C (理論値0.38 °C) とほぼ理論どおりの結果が得られた。

## 3. 結言

本研究では測定対象の内部温度の変化に左右されない成分濃度の非破壊計測手法についてTFDRS法をベースに検討した。その結果、TFDRS法により得ら

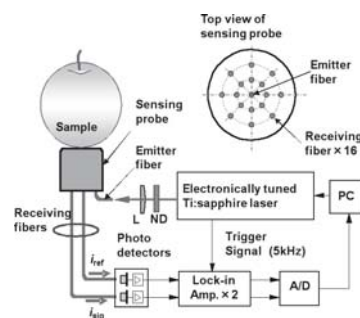


図2 TFDRS法をベースとした反射率の計測装置の概略図。

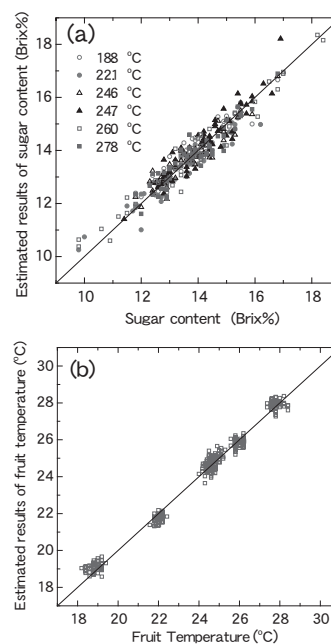


図3 TFDRS法を用いた果実糖度(a)と果実温度(b)の推定結果。

れる相対吸光度比  $\gamma$  を複数用いた一次多項式により果実の内部温度に影響されない果実の成分濃度の非破壊計測が可能であること、さらには内部温度の推定も可能であることを理論・実験の両面で検証した。また、本開発で提案した非破壊計測手法は測定対象の内部温度の影響を直接補償する手法で、表面と内部の僅かな温度差でも大きな測定誤差を生じる微量な血液成分や酸含量等の測定で特に有効となる。

## 参考文献

- [1] 尾崎幸洋、河田聡編：近赤外分光法(日本分光学会測定法シリーズ32)、学会出版センター、東京、(1996)。
- [2] 下村義昭：レーザー研究39 (2011) 233.
- [3] 下村義昭、田中精史、立石賢二：レーザー学会第378回研究会報告、RTM-08-29 (2008) 1.