

# 光学特性の評価手法確立による非破壊計測装置の応用展開

電子情報科 科 長 下 村 義 昭  
電子情報科 主任研究員 田 中 博 樹  
食品・環境科 主任研究員 三 木 伸 一

光学的手法による非破壊測定装置は農産物の品質管理やヘルスケアにおいて高いニーズと大きな市場規模を持った成長産業として期待されている。また、長崎県が保有する光学的非破壊計測に関するコア技術は携帯型の非破壊糖度計を実現するなど装置の低コスト・小型化で競合製品を差別化できる強力な武器となっている。一方、コア技術を活用した非破壊測定装置の開発では測定光源の波長や測定精度に関する装置仕様を理論と実験の両面で検討する必要があるが、穀物や生体では理論計算に必要な吸収係数等の光学特性の測定が難しく正確な情報が不足している。そこで、本研究では光散乱体の光学特性を正確に測定する手法を確立して穀物や生体等の光学特性のデータベースを構築することを目的としている。本報告では、時間相関単一光子計数法をベースとした時間分解分光による光散乱体の光学特性測定方法と装置について述べる。

## 1. 緒 言

光学的手法による非破壊計測装置は農産物の品質管理や生体組成計測によるヘルスケアにおいて高いニーズと大きな市場規模を持った成長産業として期待されている。また、長崎県独自の光学的計測技術は携帯型の非破壊糖度計を実現するなど装置の低コスト・小型化で競合製品を差別化できる強力な武器となっている。

非破壊糖度計を実現した計測手法TFDRS (Three-Fiber-Based Diffuse Reflectance Spectroscopy) [1] の概略と糖度測定のスナ比 $\eta$ を図1に示す。スナ比 $\eta$ は糖度の測定精度(測定誤差の標準偏差)を $\Delta C$ として $\eta = (1/\Delta C)^2$ で定義される。TFDRSでは、果実の表面から光ファイバで光を照射し、反射光の一部を2本の受光ファイバで受光する。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。

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

ここで、 $R(\lambda_1)$ 、 $R(\lambda_2)$ 、 $R(\lambda_3)$ は波長 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ での反射率をそれぞれ表す。(1)式で表される相対吸光度比 $\gamma$ は散乱の影響を受けない物理量で果実糖度と良い直線相関を示す。

図1に示したスナ比 $\eta$ の算出では、(1)式の波長 $\lambda_1$ 、 $\lambda_3$ をそれぞれ900 nm、1060 nmとして波長 $\lambda_2$ のみを変化させた。スナ比 $\eta$ の実測値(実線)と理論値(点線)

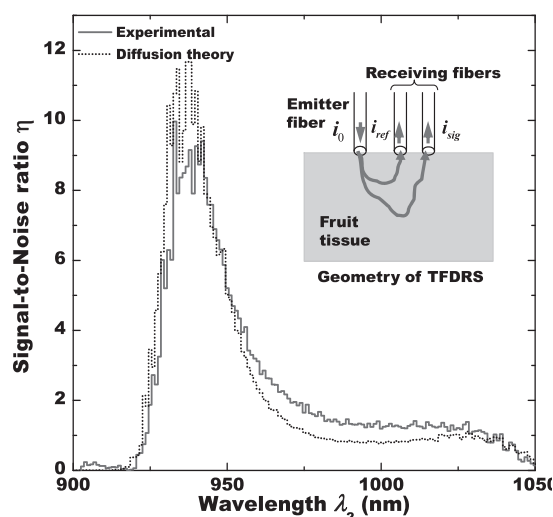


図1 TFDRSの概略とスナ比 $\eta$ の波長依存

は良く一致しており、波長の組み合わせと測定精度を理論的に予測できる。TFDRSにおいて最適な波長を選択し測定精度を理論的に予測するには、吸収係数等の被検体固有の光学特性の情報が必要となる。透明な糖水溶液の散乱体でモデル化できる果実では、後述の手法により光学特性を容易に測定することができる。

一方、穀物や生体では、含まれるタンパク質や炭水化物が不溶性のため、吸収係数等の光学特性の測定が難しく情報が少ない。そこで、本開発では不溶性物質の光学特性を正確に測定する手法を確立し、穀物や生体等の光学特性のデータベースを構築することを目的とした。

## 2. 研究内容と結果

### 2.1 TFDRS による光学特性の測定

吸収係数が既知の被検体の場合、散乱係数は TFDRS で得られる反射率の実測値と理論値が一致する値として非線形最小二乗法等により決定することができる。図2はTFDRSを用いて測定したポリスチレン水溶液（粒径500 nm、濃度0.50 wt%）の反射率（●）と理論値（実線）を示す。ここで、ポリスチレン水溶液の吸収係数は水の吸収係数に体積分率を乗じた値とした。反射率の理論値と実測値はその差の相対値が±1%以下と良く一致しており、決定された散乱係数 $1.062 \text{ mm}^{-1}$ （±0.002  $\text{mm}^{-1}$ ）（波長1000 nm）は粒径等から散乱理論で算出した理論値 $1.056 \text{ mm}^{-1}$ （波長1000 nm）と良く一致した。

同様に、果実の吸収係数も市販の分光光度計で測定した糖水溶液の吸収係数に体積分率を乗じた値として得ることができるので<sup>[1]</sup>、上記手法により果実の散乱係数を得ることができる。一方、不溶性のタンパク質や炭水化物を主に含む穀物や生体では、吸収係数を分光光度計で測定できないため、散乱係数の決定も難しくなる。そこで、本開発では次項で述べる時間分解分光<sup>[2]</sup>による散乱係数や吸収係数の測定方法を検討している。

### 2.2 時間分解分光による光学特性の測定

図1で時間幅が数 ps のパルス光を入射光  $i_0$  とした場合、反射光  $i_{\text{ref}}$ （又は  $i_{\text{sig}}$ ）のパルス幅は入射光に比べて数100倍と大きくなる。この反射光の時間波形は検出距離や散乱係数等、被検体固有の光学特性の関数として解析的に算出することができる<sup>[2]</sup>。これにより、散乱係数等の光学特性を測定した反射光の時間波形と理論値が一致する値として非線形最小二乗法で決定することができる。

図3に時間相関単一光子計数（以下 TCSPC: Time Correlated Single Photon Counting）法をベースに試作した時間分解分光システムの概略を示す。照射光源に繰り返し数80 MHz、パルス幅2 ps 以下の波長可変 Ti:sapphire レーザー（Tsunami, Spectra-Physics 社製）を用いた。被検体からの反射光を光ファイバ（NA=0.22, コア径0.1 mm）で受光し、光検出器 PD1（PHD-400, Becker & Hickl 社製）と PD2（SPD-100-CTE, Micro Photon Devices 社製）で入射光の一部と光ファイバで受光した反射光をそれぞれ検出する。各光検出器からの信号を TCSPC 回路

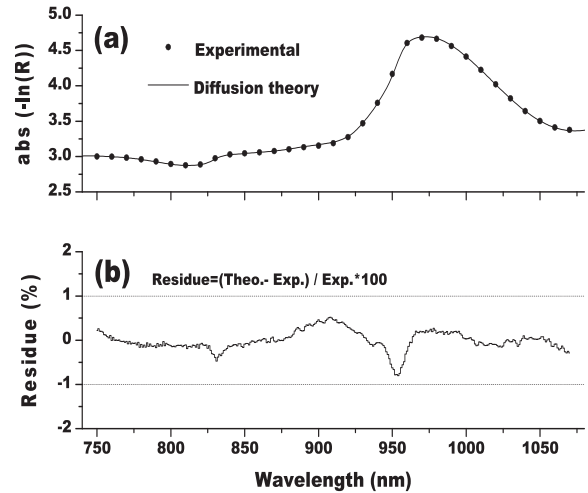


図2 TFDRSを用いて測定したポリスチレン水溶液の反射率と理論値。

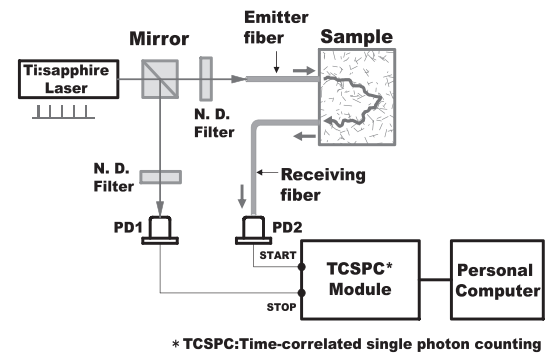


図3 TCSPC法をベースに構築した時間分解分光システムの概略図。照射光源にパルス幅2 ps 以下の Ti:sapphire レーザーを用いた。

(SPC-130EM, Becker & Hickl 社製)に入力してレーザー光の照射から単一光子検出までの時間を測定することにより、反射光の時間波形が得られる。

## 3. 結 言

本開発では、不溶性物質の光学特性を測定するために、TCSPC法をベースにパルス幅2 ps 以下のチタンサファイアレーザーを測定用光源とした時間分解分光システムを構築した。今後は、光学特性が既知の被検体を用いて本時間分解分光システムの精度評価を行い、穀物や生体を対象に光学特性に関するデータベースを構築する。

## 参考文献

- [1] 下村義昭：レーザー研究 39(2011) 233.
- [2] M. S. Patterson, B. Chance, and B. C. Wilson: Appl. Opt. 28(1989) 2331.