

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、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果実の糖度や酸度と同時に内部温度を計測する新たな手法を提案し、その実用性について理論・実験の両面で検証した。また、本計測手法をベースに光源に半導体レーザーを使用した重量約300gのリモコンサイズの測定装置を試作した。

1. 緒 言

近赤外分光法^[1]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^{[2]、[3]}。

一方、我々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^[4]をベースとした非破壊計測手法を提案した^{[5]、[6]}。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法(Three-Fiber-Based Diffuse Reflectance Spectroscopy)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 γ を求める^[5]。

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

ここで、ここで λ_1 、 λ_2 、 λ_3 は果実に照射されるレーザー光の波長を表す。(1)式で表される相対吸光度比 γ は検出距離 ρ や Δ の変化、あるいは果実個々で散乱係数が異なることによる散乱光路長の変化等に左右されない物理量で果実糖度との直線相関を示す^{[5]、[6]}。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^{[5]、[7]}。

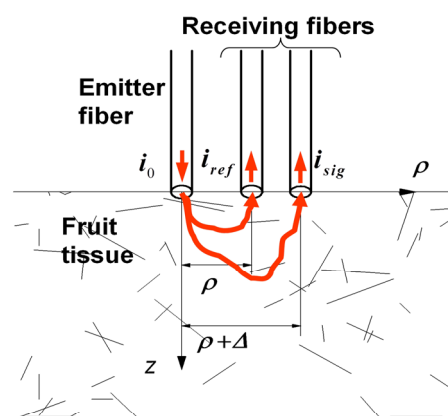


図1 TFDRS法の概略図

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し、反射光の一部が2本の受光ファイバーで受光される。



図2 TFDRS法をベースに商品化した携帯型糖度計光源に発光ダイオードを使用し、重量200gと世界最軽量を実現した。

図2はTFDRS法をベースに商品化に成功した携帯型糖度計を示す。本装置では、光源に近赤外領域の発光ダイオードを使用し、重量200g（電池重量含む）と世界最軽量を実現している。また、TFDRS法を用いることで、これまでの品種毎や収穫時期に応じた検量線の更新作業が不要となった他、太陽光などの影響を補正する外乱光補正技術を搭載することで、屋外での使用が可能となった。

しかしながら、水を多く含む果実や生体等では(1)式で表される相対吸光度比 γ 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での測定は難しい。

そこで、本開発ではこれまでに提案したTFDRSをベースに被検体の内部温度で補償する果実の糖・酸度の非破壊計測技術の開発を目的とした。

2. 研究内容と結果

2.1 内部温度補償による非破壊計測手法

葉緑素など可視域での色素吸収が無視できる近赤外領域では、果実を糖や酸を含んだ水溶液の散乱体と見なすことができ、果実の吸収係数は糖や酸を含んだ水溶液にその体積分率を乗じた値となる^[5]。図3はグルコースとクエン酸を含む水溶液の吸収係数について濃度依存($\text{mm}^{-1}/\text{wt}\%$)と温度依存(mm^{-1}/C)をそれぞれ測定した結果を示す。吸収係数の濃度依存は糖や酸による吸収に加えて、糖・酸度の増加による水の体積分率の減少に起因した水による吸収の減少などが複雑に絡み合った結果を反映している。また、吸収係数の温度依存は水の吸収係数の温度依存を表しており、水の吸収係数が大きくなる波長域で大きくなり、濃度依存とほぼ反対の傾向を示す。

果実の吸収係数も水溶液同様に含まれる酸度と糖度、さらには温度によって複雑に変化する。被検体が光吸収に起因する複数次数 C_k ($k=1\cdots m$)を含む場合、TFDRS法では複数の相対吸光度比 γ_k ($k=1\cdots n$, $n\geq m$)を用いた下記の(2)式により、各組成 C_k を同時に計測することが可能となる^[8]。

果実の光散乱体モデルを対象に反射スペクトルを計算した結果を図4に示す。ここでの計算では、果実モデルの散乱係数及び体積分率にトマトの値を用いた。また吸収係数はグルコース濃度を

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_k \\ \vdots \\ C_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{10} \\ a_{20} \\ \vdots \\ a_{k0} \\ \vdots \\ a_{m0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \cdots & a_{kn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_k \\ \vdots \\ \gamma_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

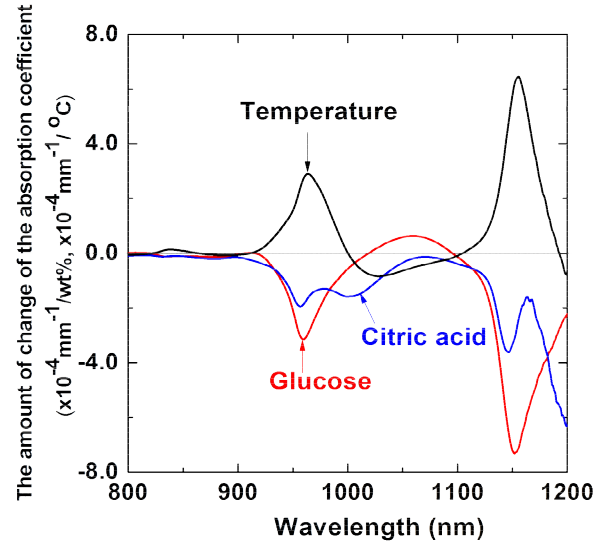


図3 水溶液の吸収係数の糖・酸度、及び温度依存
グルコースとクエン酸を含む水溶液の吸収係数の濃度依存 ($\text{mm}^{-1}/\text{wt}\%$)と温度依存 (mm^{-1}/C)を測定した結果。

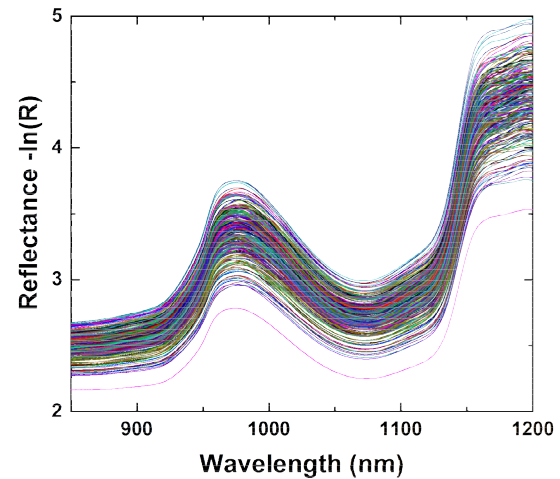


図4 反射スペクトルの計算結果

トマトの光散乱体モデルを用いて、散乱係数、糖度、酸度、及び温度をランダムに変えた250通りの反射スペクトルを計算した結果。

4 wt%~12 wt%、クエン酸濃度を 0 wt%~3 wt%、果実温度を 15 度~35 度の範囲でそれぞれランダムに変化させて、250通りの組み合わせで反射率を計算した。

図4に示した反射率から複数の相対吸光度比を算出し、(2)式により糖度と酸度をそれぞれ推定した結果を図5に示す。糖度と酸度の測定精度(誤差の標準偏差)はそれぞれ0.28 wt%、0.26 wt%となり、温度変化に影響されることなく実用精度での糖・酸度の非破壊計測が可能であることが検証された。また、同じ波長の組み合わせによる相対吸光度比を用いた(2)式による果実温度 T の測定精度の理論値は0.31 °Cが得られ、糖・酸度と同時に内部温度の計測も可能であることが検証された。

2.2 波長可変レーザーを用いた検証実験

図6にTFDRSをベースとした反射率の計測システムを示す^[6]。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。レーザーの発振波長域は750 ~ 1070 nm (スペクトル幅1 nm以下)で、果実の糖度測定に必要な波長範囲を十分にカバーしており、音響光学波長変換フィルター(Acousto-Optical Tunable Filter: AOTF)を用いることでレーザー光の波長・出力を機械的な駆動部無しで電子的に制御することができる。

図中に示し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5 mmと12 mmの2つの円周上に配置した16本の受光ファイバーで受光した。半径毎8本の受光ファイバーで集めた各反射光 i_{ref} 、 i_{sig} をそれぞれのInGaAs PINフォトダイオードで検出し、プリアンプで増幅した。この検出信号を2位相のロックインアンプで検出し、16 bitのAD変換ボードでサンプリング(5 ksps)した。入射光の波長を900 ~ 1070 nmの範囲を1 nmステップで掃引し、各波長の反射率 $R = i_{sig} / i_{ref}$ を50 msの時間間隔で平均した。

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φ35 mm×20 mmの円柱にくり抜き、その果汁の糖度を屈折糖度計で測定した。

図7に4つの相対吸光度比を用いた(2)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。ここで使用した4つの相対吸光度比では λ_1 、 λ_2 をそれぞれ900 nm、980 nmとした。3つ目の波長 λ_3 には930 nm、960 nm、1020 nm、1040 nmをそれぞれ用いた。測定時の果実温度の平均値(標準偏差)は18.8 °C (std. 0.3 °C)、22.1 °C (std. 0.2 °C)、24.6 °C (std. 0.1 °C)、24.7 °C

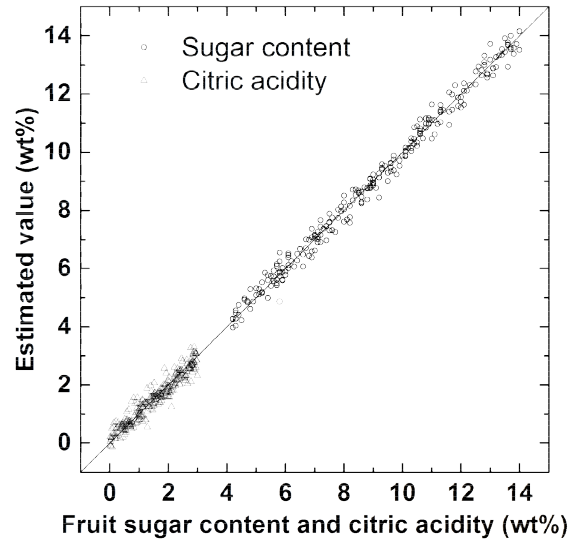


図5 TFDRS法を用いた果実の糖・酸度の推定結果

図4に示したトマトの光散乱体モデルで得られた反射率から相対吸光度比を算出し、(2)式により糖度(O)と酸度(Δ)をそれぞれ推定した結果。

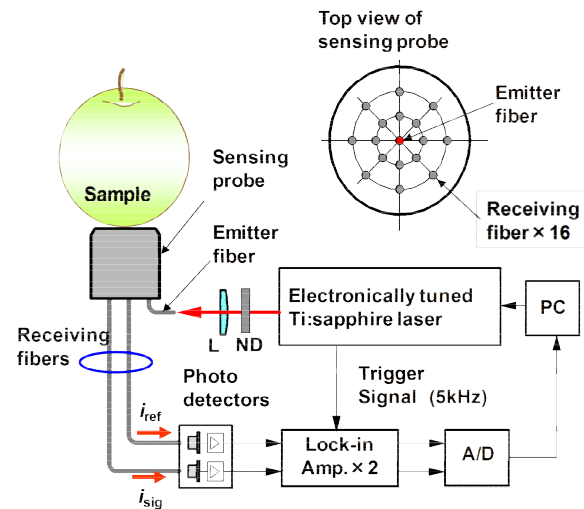


図6 TFDRS法をベースとした測定装置の概略図

光源に波長域750~1070nmの波長可変Ti:sapphireレーザーを使用した。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する。反射光は光照射ファイバーを中心とした2つの円周上に配置した受光ファイバーで検出される。

(std. 0.3 °C)、26.0 °C (std. 0.2 °C)、27.8 °C (std. 0.2 °C)で、各温度で50個~60個(総数310個)の果実を測定した。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理論通りに検証された。

次に、糖度推定で用いた上記の波長と相対吸光度比を用いて(2)式により果実温度を推定した結

果を図8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℃(理論値0.38℃)とほぼ理論値と一致した結果が得られた。

2.3 内部温度補償方式の非破壊測定装置

前述したように、TFDRS法を用いた果実糖度等の非破壊計測では測定指標となる相対吸光度比が測定部位の温度の影響を受けて変化してしまう。そこで、現行のTFDRS法ベースの携帯型糖度計(図2)では、図9(a)に示したように放射温度計で表面温度を測定して相対吸光度比の温度変化分を補正している。このような放射温度計を用いた温度補正では被検体の表面と内部に温度差があると大きな測定誤差が生じてしまうため、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等の作業が必要となる。一方、本開発により提案した測定方式では、図9(b)に示すようにレーザー光を用いて内部温度を測定することができる。これにより、放射温度計が不要となり、表面と内部で温度差がある場合でも高精度な糖度等の非破壊計測が可能となる。

図10(a)に本開発で提案した内部温度補償方式により試作した非破壊測定装置を示す。小型・携帯化も考慮して光源に近赤外光の半導体レーザーを搭載し、サイズと重量がそれぞれ181×48×70mm、314gとリモコン並の装置を実現した。受発光部の詳細を図10(b)に示す。表面は放射温度計を省いたシンプルな構造となった。また、受光部はプラスチックファイバーを光照射口を中心とした2つの同心円上に複数配置した構造とした。

反射光の検出回路には数十kHzで強度変調させたレーザー光の反射光を同調検波するロックインアンプを用いた。本検出回路による反射率の信号対雑音比(SN比)は約3,300倍を実現しており、糖・酸度測定に必要な性能を実現した。また、駆動電源には単三アルカリ電池2本を使用し、1回の測定時間は約2.5秒で5000回以上の計測を記録した。

3. 結言

果実や生体等の成分濃度を光学的な手法で非破壊計測する場合、測定対象の内部温度の影響を補償した測定が必要となる。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法により得られる相対吸光度比を複数用いた一次多項式により、果実の内

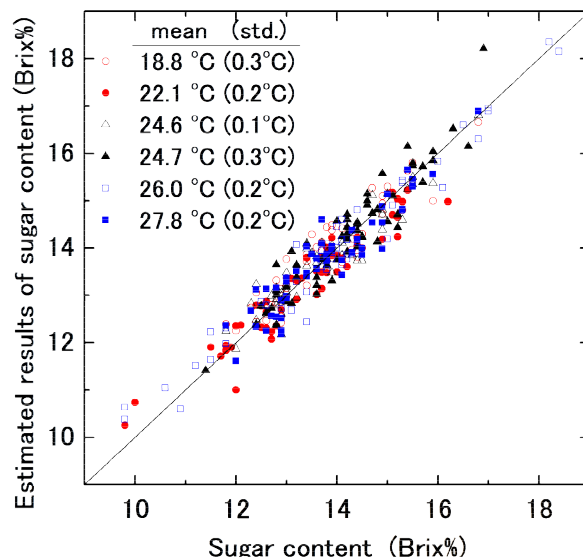


図7 TFDRS法によるりんご糖度の推定結果

果実温度を室温に馴染ませることで18.8℃~27.8℃の範囲で設定した。各温度で50~60個、総数310個のりんごを対象に、相対吸光度比を用いた(2)式により糖度を推定した結果。

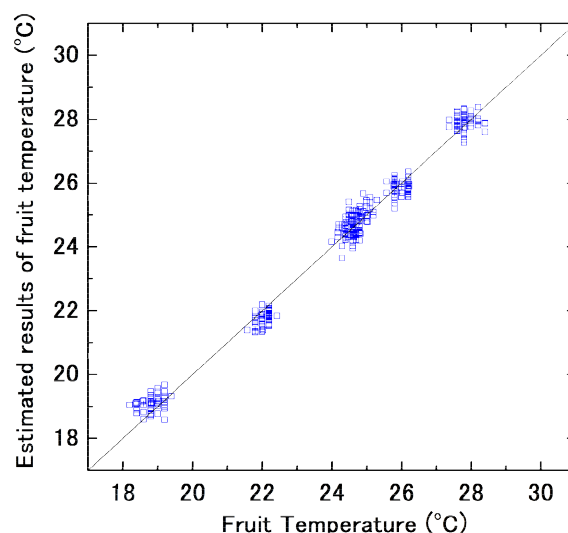


図8 TFDRS法による果実温度の推定結果

横軸の果実温度には放射温度計で測定した果実の表面温度を用いた。縦軸の果実温度は相対吸光度比を用いた(2)式による推定結果。

部温度に影響されない糖度と酸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。

さらに、提案した計測手法をベースに光源に近赤外の半導体レーザーを搭載した非破壊測定装置を試作し、サイズと重量がそれぞれ181×48×70mm、314gとリモコンサイズの装置を実現した。今後は、測定装置の製品化に向けた測定精度向上と受発光部等の部品コスト削減を考慮した改良を行う。

また、ここ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あり、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体組成の非侵襲計測でも有効となる。特に、生体では果実に比べて温度以外に多くの夾雑物があるが、夾雑物に合わせた複数の波長を最適に選択することで本計測手法が適用できる^[8]。

参考文献

[1] 尾崎幸洋, 河田聡編:日本分光学会測定法シリーズ 32 近赤外分光法 (学会出版センター, 東京, 1996).
 [2] S. Saranwong, J. Sornsrivichai, and S. Kawano: J. Near Infrared Spectrosc. 11 (2003) 175.

[3] 森本進:非破壊計測シンポジウム講演要旨, 19 (2003) p. 31.
 [4] M. G. Nichols, E. L. Hull, and T. H. Foster: Appl. Opt. 36 (1997) 93.
 [5] 下村義昭, 岡田龍雄:レーザー研究 33 (2005) 620.
 [6] 下村義昭:レーザー研究 39(2011) 233.
 [7] 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.
 [8] Y. Shimomura, S. Miki, T. Tajiri, and H. Tanaka:Proc. of IEEE/LEOS Annual Meeting, 274-275(2009).

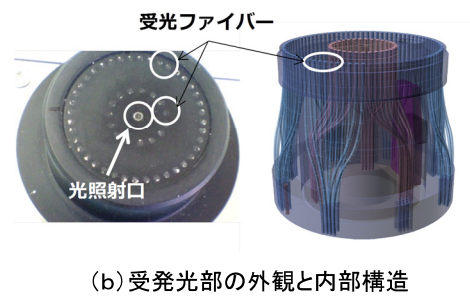
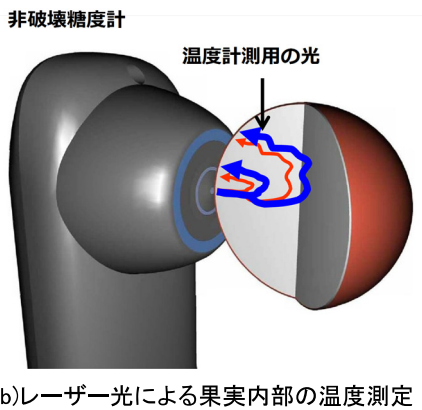
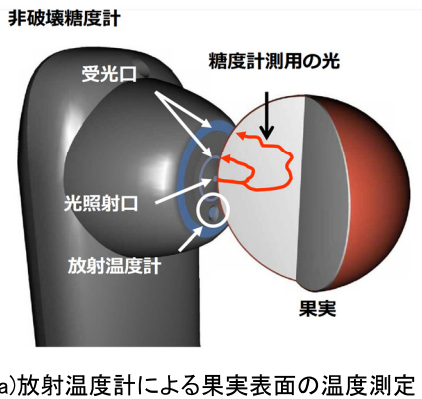


図9 果実温度の測定方法

(a) 現行の放射温度計を用いた温度測定。被検体を室温に馴染ませる等、表面と内部の温度を同じにする必要がある。(b) 本開発で提案した TFDRS 法をベースとしたレーザー光による内部温度の測定方法。内部組成と同時に内部温度を測定することにより、表面と内部の僅かな温度差による測定誤差を低減することができる。

図10 試作した非破壊測定装置

(a)試作装置の外観。光源に半導体レーザーを搭載し、重量約300g とリモコン並の装置を実現した。(b)受発光部の外観と内部構造。受光部には光照射口を中心とした2つの円周上にプラスチックファイバーを複数配置した。