

LED分光方式水分ストレス計の開発

Development of a Water Stress Tester Using the Spectra of Three LEDs

柴谷 一弘* 中村 健人* 谷尻 靖*
Kazuhiro SHIBATANI Taketo NAKAMURA Yasushi TANIJIRI

要旨

果実の糖度を上げる栽培技術に「水切り（水分ストレス）」というものがある。ただし、水分ストレスを与えすぎると果樹が弱ってしまうため、あるタイミングでかん水しなければならない。従来、このかん水は、経験と勘による作業であった。より効果的に、より安定的に高品質果実を収穫するためには、水分ストレスの数値管理が必要になる。

ここでは、LED光を緑葉に照射し、その反射光を光学濃度として検出する方式の水分ストレス計について報告する。水分ストレスと緑葉分光特性の変化（レッドエッジのブルーシフト）には相関関係があることが知られている。波長の異なる3つのLEDと光検出PDから構成した検出ヘッドを試作し、検出特性を評価したところ良好な結果を得た。本方式の利点は、安価で小型、手軽な短時間測定ができることである。

Abstract

Water stress control is a cultivation technique that can be used to increase the sugar content of fruit. However, too much or too little water stress damages the fruit. Previously, estimating the proper degree of water stress was based on experience and intuition. But if water stress could be properly controlled by unskilled workers through the use of a water stress tester, high quality fruit could be harvested more effectively and more stably.

This paper describes a prototype water stress tester that utilizes a known correlation between water stress and changes in the spectral distribution of green leaves: in the reflectance spectrum, the red edge shifts sharply to the blue region when water stress increases. The tester's PD (photo diode) detects reflected light from green leaves exposed to the tester's three LEDs, each of which has a different wavelength. An evaluation of the prototype water stress tester shows good performance, providing advantages in cost, size, and measuring time.

* コニカミノルタオプト(株)
技術開発センター 機器開発部

1 はじめに

糖度の高い美味しい果物を作るためには、適切な水やり（かん水）管理が必要である。たとえば、ミカンにおいては、夏から秋の降水量が少ない年に甘みの強い果実ができる。しかし、その時期の降水量が少なすぎると果実が小さくなり、酸っぱいミカンができることが知られている。これは、果樹に適度な水分ストレス（渇き状態）を与えると果実の糖度が上がるが、水分ストレスを与えすぎると果樹が弱ってしまうことを示している。ミカン農家では、高品質な果実を安定的に生産できるように、かん水の管理を行っている。かん水管理は、現在も栽培技術として研究開発が進められているが、その栽培技術は生産者や技術者の経験と勘に頼るものであり、一般化されていないという問題点がある¹⁾。日本においては、篤農家やベテラン技術者が年とともに消えていく運命にある。今後も安定的に高品質な果実を生産するためには、農業を志す若い世代や農業への新規参入者に対して、適切に栽培技術を伝授することが必要である。その方法として、経験や勘に頼っていた栽培技術を数値指標で表すことが考えられ、植物の生態情報を数値情報で表現するための測定器が必要になる。一方、近年、脚光を浴びている植物工場においても、栽培技術の数値化が成功のカギを握ることが指摘されている²⁾。このような測定器を現場で使用してもらうためには、安価で小型、そして使い方が簡易であることが条件になる。本報では、これらの条件を満たす水分ストレス計について検討を行った。

2 水分ストレスの測定方法

2.1 従来技術

水分ストレスを測定するための従来技術を以下に示す。

- ① 圧力チャンバ法（水ポテンシャル）
- ② 表示シート法
- ③ 土壌水分計
- ④ 分光法

圧力チャンバ法³⁾は、水ポテンシャルを直接的に測定する方法である。水ポテンシャルは水分ストレスの指標であるので、この測定方法が最も信頼度が高い。しかし、装置が大型なため、緑葉を採取して測定する必要があり、現場での測定ができない。また、緑葉を採取する最適な時間帯が深夜から早朝にかけてであり、作業負荷が大き

いという問題点がある。

表示シート法³⁾は、葉の裏面から放出される水分を塩化コバルトシートで吸湿し、その色変化で水分ストレス状態を推定するものである。多くの緑葉にシートを貼りつける必要があり作業が煩雑であることが問題点である。

土壌水分計³⁾は、土壌にセンサを差し込んで、土中の誘電率などを測定して土壌の水分率を推定するものである。土壌水分と水分ストレスの相関が弱く、土中の温度や土の成分で影響を受けることが問題点である。

分光法は、緑葉の分光特性を測定し、その変化から水分ストレスを推定するものである。マルチチャンネル分光器とタングステン・ハロゲン光源を用いた水分ストレス計が兵頭らによって開発されている⁴⁾。この方法は、手軽に短時間での測定を可能にしたが、一般農家への普及において、コストと装置の大きさが課題である。本報では、分光法による水分ストレス計を低コストで小型化することを検討した。

2.2 緑葉の反射分光特性と水分ストレス

樹体の水分が不足すると樹体に水分ストレスがかかり、緑葉表面の分光特性に変化が生じる。Fig. 1に、水分ストレスの有無による緑葉の分光反射特性を示す。可視光域は全体的に反射率が低いが、波長550nm付近にはピークが存在する。この部分は、緑葉のクロロフィルからの反射が影響している。赤色の波長域から近赤外域には、反射率が急激に高まるところがある。この部分は、レッドエッジと呼ばれている。Fig. 1の青線は水分ストレスが小さい状態を示し、赤線は水分ストレスが大きい状態を示している。水分ストレスの有無によって、その分光特性が変化する様子がわかる。特に、レッドエッジと呼ばれる領域では、水分ストレスが大きくなると、分光特性が青色側(左側)にずれる。この現象はレッドエッジのブルーシフトと呼ばれている。水分ストレスとレッドエッジのブルーシフトには相関関係があることが知られており、このレッドエッジのブルーシフトを検出することができれば、樹体への水分ストレスのかかり具合を推定することができる⁵⁾。本報では、レッドエッジのブルーシフトを推定するための検出ヘッドについて報告する。検出ヘッドは、特定波長のLED光を用いて、緑葉の反射光を光学濃度として検出するものである。

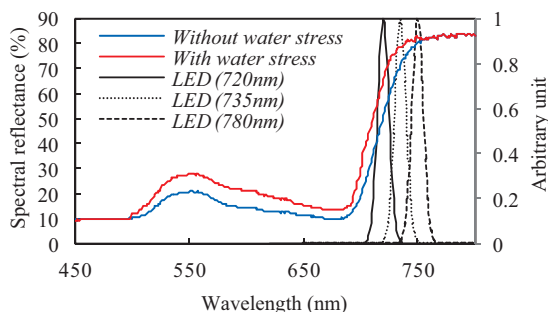


Fig. 1 Spectral reflectance of green leaves with and without water stress.

3 水分ストレス計の試作

3.1 方式

緑葉の分光特性を測定するのに、樹体全体を非接触で測定する方式と、1枚の緑葉を測定器で挟み込んで測定する方式が考えられる。前者は、作業効率の向上を目指す方式であるが、太陽光などの外乱の影響を考慮する必要がある。そのため、現時点では、装置が大型化し、コスト高になるという問題点がある。後者は、コニカミノルタセンシング(株)の葉緑素計(SPAD)で採用されている方式である⁶⁾。緑葉を1枚ずつ測定しなければならないが、小型で安価な装置を実現でき、より精度よく測定できるところにメリットがある。葉緑素計が緑葉の透過光を測定するのに対し、水分ストレス計は緑葉の反射光を測定する。これは、葉緑素情報が緑葉の透過光に含まれているのに対し、レッドエッジのブルーシフト情報が緑葉の反射光に含まれているからである。

Fig. 2に、挟み込み方式の概念図を示す。クリップにより緑葉を挟みこめるようになっている。クリップには、LEDとPDで構成された検出ヘッドが内蔵されている。

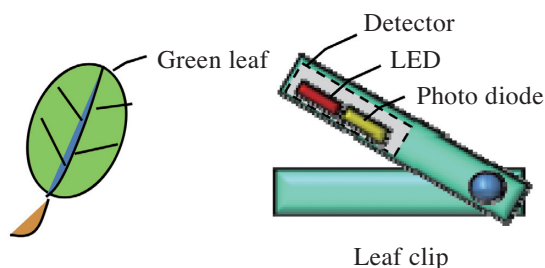


Fig. 2 Schematic of prototype water stress tester.

3.2 検出ヘッド

3.2.1 構成

Fig. 3に、検出ヘッドにおけるLEDとPDの配置を示す。検出ヘッドは、波長の異なる3つのLEDと2つのPDから構成されている。LEDは緑葉を斜めから照射するように配置されており、PD1は緑葉に正対する位置に、PD2はLED2とほぼ対称の位置に配置されている。LED波長の設計値は、LED1が720nm、LED2が735nm、LED3が780nmである。レッドエッジ部分を720nmと735nm

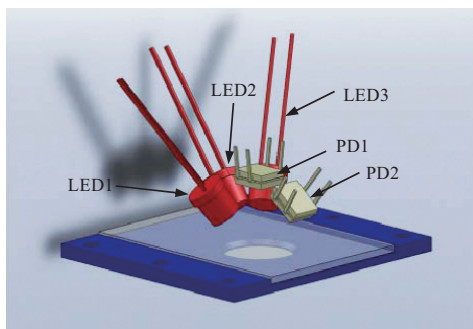


Fig. 3 Prototype detector head with 3 LEDs and 2 PDs.

で検出し、レッドエッジのブルーシフト量とレッドエッジの傾き変化を算出する。780nmは、緑葉分光特性のフラット部分を検出し、その検出値は720nmと735nmの検出値のレベル補正に用いる。特に、正規化植生指数の算出に対応できるように配慮した。

3. 2. 2 緑葉表面の散乱特性を考慮

検出ヘッドにおけるLEDとPDの配置は、緑葉表面の散乱特性を考慮して設計した。Fig. 4に、緑葉表面の散乱特性の測定方法を示す。緑葉とLEDの距離は22mmであり、緑葉表面の法線から35°の位置にLEDを設置した。LEDの光線中心の入射角は35°の状態、緑葉表面を照射した。LEDは、定電流源により50mAで駆動した。緑葉とPDの間隔はd、緑葉表面の法線からPD位置の角度は θ とする。PD検出面を緑葉の反射面と平行にして、PD位置（角度 θ ）を0°から60°まで変化させたときのPD検出値を測定した。

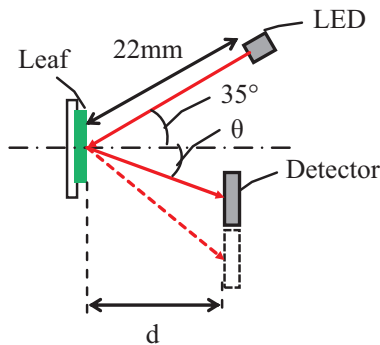


Fig. 4 Method of measuring light-scattering property of green leaf surfaces.

Fig. 5に、緑葉表面の散乱特性の測定結果を示す。図の横軸は緑葉表面法線からのPD位置（角度 θ ）であり、縦軸はPDの検出値を示す。上図は緑葉とPDの間隔がd=10mmの測定結果であり、下図はd=22mmの測定結果である。緑葉表面の反射光が点光源からの拡散光と仮定すると、PDの検出値は、緑葉とPDの距離の2乗に反比例し、PDの位置 $\cos \theta$ に比例することになる。ここで、緑葉とPDの距離は $d/\cos \theta$ であるので、PDの検出値は $\cos^3 \theta$ に比例することになる。d=22mmの結果は、PD検出値がほぼ $\cos^3 \theta$ に比例していると言え、緑葉からの反射光が適度な拡散光になっていると言える。一方、d=10mmの結果は、PD検出値に対してPD位置（角度 θ ）の影響が小さいことがわかる。これは、緑葉表面から拡散反射される光が点光源ではなく、ある拡がりを持った領域からであることが影響していると考えられる。これらの結果から、緑葉からの反射光は拡散光であるので、PDはどこに配置してもレッドエッジの検出が可能であると言える。ただし、PDを緑葉に近づけて配置した方が、PD位置（角度 θ ）による検出値の変化が小さくなるので、LEDの消費電力を考慮したPD配置の自由度は大きくなる。

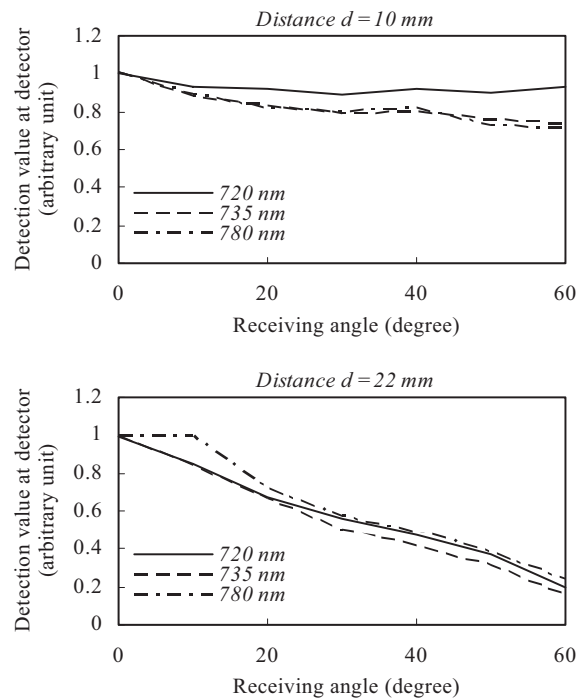


Fig. 5 Light scattering properties of green leaf surfaces.

Fig. 6に、今回試作した検出ヘッドの断面図を示す。現場における水分ストレス計の使い方とを考慮すると、ポータビリティの観点から、電源は電池になる。LEDの駆動電流をなるべく小さくすることも考えて、LEDとPDをできるだけ緑葉に近づけた配置設計としている。3つのLEDは、緑葉との距離が8mm、緑葉表面の法線からの角度が37°の位置に配置した。それぞれのLEDは、緑葉表面の法線を中心とした同心円上において、隣接した位置にある。2つのPDは、緑葉との距離が10.7mmの位置に配置した。一方（PD1）は緑葉表面の法線上にあり、他方（PD2）は緑葉表面の法線から37°の位置にある。Fig. 5の結果から、PDはいずれか1つでもよいが、今回は実験評価を目的に2つのPDを用いることにした。

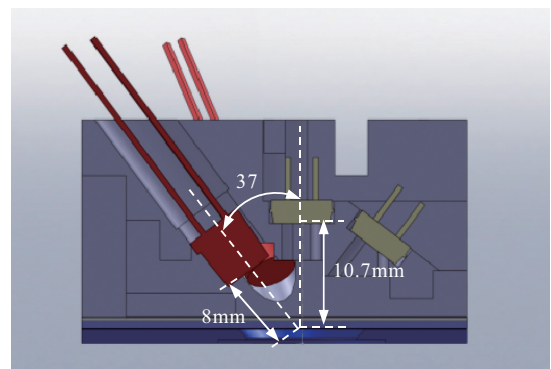


Fig. 6 Sectional side view of detector head.

3. 2. 3 緑葉を透過した迷光を考慮

緑葉表面にLED光を照射すると、多くは反射されるが、一部の光が緑葉を透過することがわかっている。この透過光は、緑葉の背後の状態により迷光となり、PD検出値

に悪影響を及ぼす。つまり、緑葉の背後面に反射部材があると、それにより反射された一部の緑葉透過光は、再び緑葉を透過してPDに到達してしまう。この迷光には、レッドエッジのブルーシフト情報が含まれていない。よって、迷光はPD検出値のオフセットとして現れ、検出誤差として影響する。

Fig. 7に、緑葉の背後状態によるPD検出値の比較を示す。実験には、Fig. 6の検出ヘッドを用いた。各LEDの波長は、LED1: 714nm, LED2: 747nm, LED3: 781nmである。白色ターゲットを測定したときのPD1の検出値が $10\mu\text{A}$ となるように、各LEDへの印加電流をキャリブレーションした。緑葉背後の状態を黒色板と白色板として実験を行った。黒色板と白色板で比較すると、白色板でPD検出値が20%程度大きくなっていることが確認できる。本報では、試作検出ヘッドの評価実験を、緑葉背後を黒色板にして行うことにした。

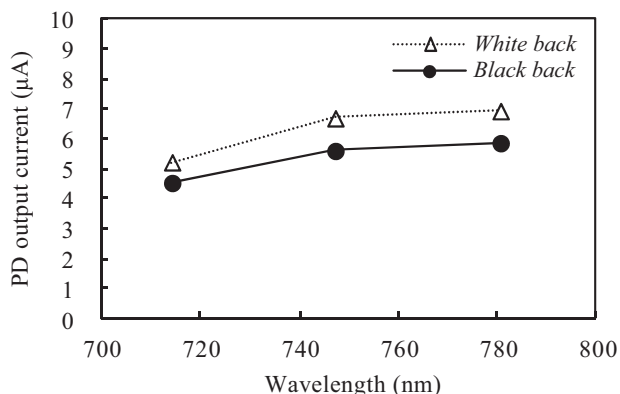


Fig. 7 Effect of light through a green leaf on detection value of PD.

3.3 検出制御部

3.3.1 回路

Fig. 8に、PD検出回路とLED駆動回路を示す。PD検出回路は一般的な電流・電圧変換回路であり、その変換率を $0.1\text{V}/\mu\text{A}$ とした。ノイズ対策用のLPFのカットオフ周波数は 1.6kHz とした。LED駆動回路は定電流駆動回路であり、定電流値は外部から指示値として与えられるようにした。これは、LED発光強度の個体ばらつきをキャリブレーションするためである。LEDのアノードとGND間には、 $0.1\mu\text{F}$ のコンデンサを挿入し、フィードバックノイズの除去を行っている。

低コスト化のため、LEDは市販の汎用品を適用している。今回用いた汎用品LEDの個体ばらつきを評価したところ、発光強度ばらつきは約83% (3σ 値)であり、波長ばらつきは約10nm (3σ 値)であった。発光強度ばらつきは、前述の定電流駆動回路により補正する。波長ばらつきは、各LEDの波長を実測し、その実測値に基づいて各LEDを係数補正することを考えている。今回は実施していないが、製品化においては、製品出荷時に波長キャリブレーション(各LED波長の係数補正)することを考えている。

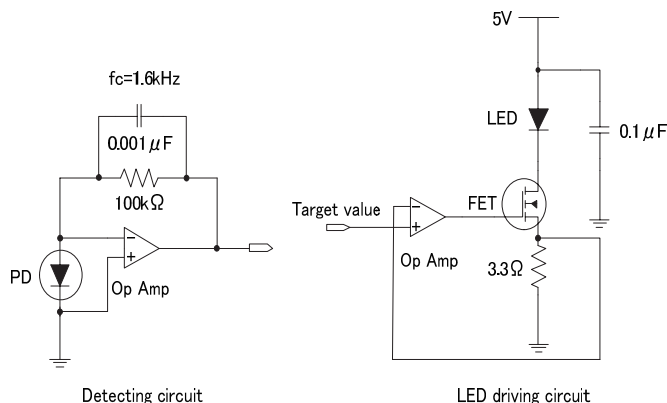


Fig. 8 Schematic of PD current detecting circuit and LED driving circuit.

3.3.2 測定方法

Fig. 9に、測定手順のフローチャートを示す。測定プログラムは、LED発光強度のキャリブレーション部と測定部から構成されている。

緑葉を測定する前に、各LEDの発光強度ばらつきを補正するためのキャリブレーションを行う。キャリブレーション用の測定対象は白色ターゲットである。各LEDは一つずつ補正する。PD1の検出電流値が $10\mu\text{A}$ となるように、各LEDの印加電流を調整する。調整後、各LEDには、LEDの定格電流75mAに対して、 $10\sim 25\text{mA}$ の電流が流れることになる。

緑葉の測定は、LED1, LED2, LED3の順番で、各LEDを一つずつ発光させ、その時々緑葉からの拡散反射光をPDにより検出して行う。1回の測定に要する時間は約0.1sであり、短時間での測定を実現している。次の測定を開始できるまでのインターバル時間を短くすることができるので、測定点数が多い場合でも軽快で負荷の少ない作業が可能になる。

省電力化のため、緑葉を測定する時以外はLEDを消灯しておき、測定する時のみLEDを点灯する。LEDは、ある時間連続点灯すると、その自己発熱のために発光波長が長波長側に变化する。また、発光強度が低下することが知られている。発熱によるこれらの変化に対応するために、LEDを間欠駆動することにした。測定時のON時間を5ms、冷却時のOFF時間を5msとし、デューティ比50%でON-OFF制御したところ、自己発熱による波長と強度への影響はほとんどないことを確認できた。

PD検出回路にはノイズ対策用のLPFがあり、その時定数は約0.63msである。LED点灯後、PD検出値がほぼ定常状態になる1ms後から、PD検出値をAD変換することにした。AD変換のサンプリング周期は約 $100\mu\text{s}$ であり、LEDが安定して点灯している時間4msの間に40点のデータを取得する。この測定は、LEDの点灯2周期分を繰り返すことにし、各LEDに対してそれぞれ80点のデータを取得することにした。取得データの平均値を、各LED波長における緑葉分光特性の測定値(光学濃度)とする。

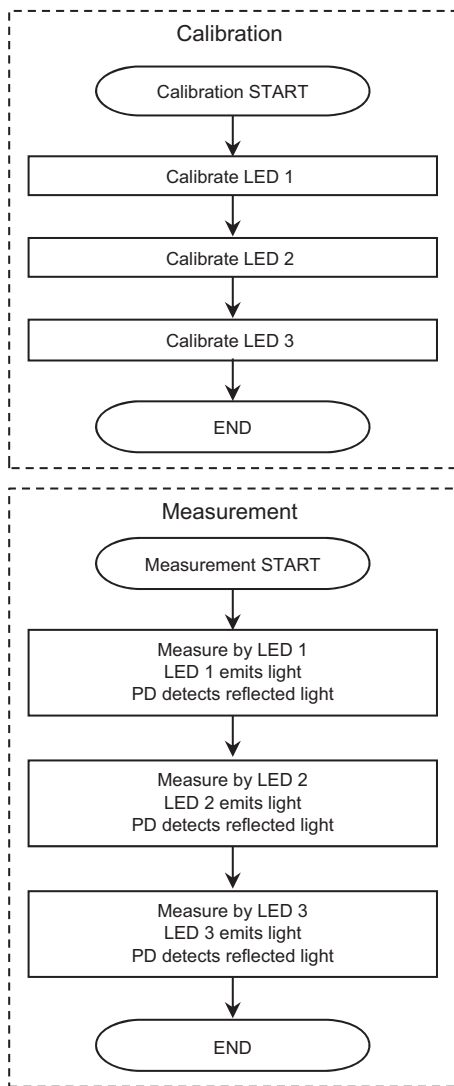


Fig. 9 Flowchart of calibration and measurement.

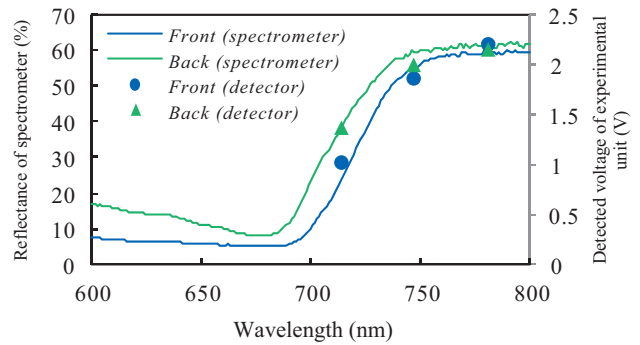


Fig. 10 Comparison of measurement results between spectrometer and prototype water stress tester with PD1 only.

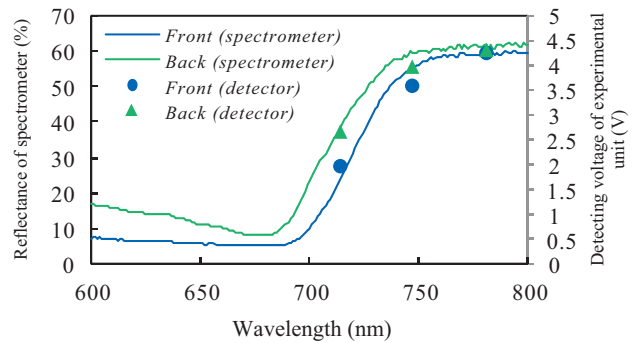


Fig. 11 Comparison of measurement results between spectrometer and prototype water stress tester with PD1 and PD2.

Table 1 Measurement error of spectral reflectance.

Wavelength (nm)	Spectrometer	Detector		Error (%)	
		PD1	PD1+PD2	PD1	PD1+PD2
714	0.625	0.744	0.738	19.0	18.1
747	0.934	0.932	0.903	0.2	3.3
781	0.958	1.024	0.985	6.9	2.8

$$\text{Error (\%)} = [(\text{detector} - \text{spectrometer}) / \text{spectrometer}] \times 100$$

4 測定値の評価

4.1 分光特性の測定

試作した検出ヘッドを用いて、緑葉の分光反射特性を測定し、その性能評価を行った。試作検出ヘッドに用いた各LEDの波長は、LED1: 714nm, LED2: 747nm, LED3: 781nmである。キャリブレーションは、白色ターゲットを測定したときのPD1の検出値が10 μ Aとなるように、各LEDへの印加電流を調節して行った。評価は、市販の計測用高精度分光光度計V-570(日本分光(株)製)を用いた測定結果と比較することにした。測定対象には緑葉の表面と裏面を用いることにした。これは、緑葉の表面と裏面で分光反射特性(レッドエッジの位置)が異なることを利用している。

Fig. 10は、試作検出ヘッドのPD1のみの検出値と計測用高精度分光光度計による測定結果の比較を示す。

Fig. 11は、試作検出ヘッドの(PD1+PD2)の検出値と分光光度計による測定結果の比較を示す。Fig. 10, 11ともに、試作検出ヘッドの検出値は、緑葉の分光反射特性の特徴をよく表していることがわかる。

Table 1に、試作検出ヘッドの検出値と分光光度計による測定値の定量的な比較を示す。両者による検出値の次元は異なる。両者の比較ができるように、Table 1の各波長における数値は、(表面の検出値/裏面の検出値)として無次元化したものである。試作検出ヘッドのPD1のみと分光光度計とを比較したところ、LED1: 714nmでは19.0%の誤差であった。LED2: 747nmでは0.2%の誤差、LED3: 781nmでは6.9%の誤差であった。レッドエッジの傾斜が大きいところ(LED1: 714nm)で誤差が大きく、傾斜が小さいところで誤差が小さくなっている。これは、試作検出ヘッドの(PD1+PD2)と分光光度計との比較結果でも同様であった。LED1: 714nmでは18.1%の誤差、LED2: 747nmとLED3: 781nmでは2~4%であった。レッドエッジの傾斜が大きいところで、分光光度計との誤差が大きくなるのは、レッドエッジの形状が緑葉の表裏で異なることと、LED光が波長分布を持った光であることに起因していると考えられる。よって、分光反射特性の測定値評価をレッドエッジの傾斜が小さいところで行うと、その測定誤差は数%程度で

あり、良好な結果と言える。一方、レッドエッジの傾斜が大きいところの測定値評価については、実際のブルーシフトを用いた確認が必要であり、今後の課題とする。

試作検出ヘッドのPD1のみの検出値と（PD1+PD2）の検出値を比較すると、4%程度の差であり、両者はほぼ同等と見なすことができる。これは、前述した緑葉の散乱特性を考慮した設計の結果である。試作検出ヘッドの評価結果からも、検出用のPDはいずれか1つでよいことが確認できた。

4.2 繰り返し精度

Table 2 に、試作検出ヘッドの繰り返し精度を示す。緑葉表面のある位置について、15回繰り返して測定した時の繰り返し精度を評価した。各LED波長における測定ばらつきは、 $3\sigma-1$ 値で0.02V以下であった。これは、検出値に対して1%程度の値である。繰り返し精度の実験結果を、代表的なレッドエッジの傾斜を用いて波長換算すると、0.2nm程度に相当する。水分ストレスの有無により、レッドエッジがブルーシフトする変化幅は20nm程度であることが知られている。よって、この繰り返し精度は、ブルーシフトの変動幅に対して、1%程度に相当し、ほぼ目標とおりの結果であった。

Table 2 Repeat accuracy.

	Average (V)	$3\sigma-1$ (V)	Error (%)
LED1	1.034	0.015	1.415
LED2	1.952	0.012	0.616
LED3	2.550	0.018	0.704

5 まとめ

波長の異なる3つのLEDを用いた簡易なLED分光方式水分ストレス計の検出ヘッドを試作した。3つのLEDは、汎用品で市販されているものである。試作評価の結果は次のとおりである。

- (1) 緑葉表面の分光特性を測定し、計測用高精度分光光度計の測定結果と比較すると、誤差が数%であり、良好な結果であった。
- (2) 繰り返し精度は、水分ストレスによるブルーシフトの変化幅に対して1%程度であった。
- (3) 緑葉表面の散乱特性を考慮したLEDとPDの配置設計ができるようになり、検出用PDは1つで十分であることを確認できた。

今後は、圧力チャンバ法による水分ポテンシャル値との比較検証を行い、水分ストレス計としての実力把握を行いたい。また、トマトのリコペン検出やメロンへの適用など、ミカン以外の果樹にも本方式を積極的に適用していきたい。

本報で報告したような、LEDを用いた簡易分光による植物生態測定装置は、植物の栽培技術を蓄積する上で非常に重要であると考えている。近年、植物工場の実用化が話題になっているが、設備としてのハードウェア技術だけでなく、栽培技術の数値化も成功のカギを握っている。現在、人工光型植物工場で栽培できる植物は、サラダ菜などの少数の品種に限られている。その原因は、人工光（蛍光灯やLED）を用いたときの栽培技術の不足にある。簡易分光技術により、栽培技術の数値化を行うことができれば、この課題を解決する一助になると考える。農業が経験と勘の世界から脱却したとき、高齢化が進んだ日本農業の維持発展に道が開けるのではないかと考える。

●参考文献

- 1) 兵頭竜二他、果実生育期間に水分ストレスを与えられたウンシュウミカンの緑葉分光特性とその果実糖度との関係。写真測量とリモートセンシングVol.43, No.5, (2004)
- 2) 高倉直、今、なぜ植物工場か。農業および園芸第84巻第11号、1063-1067 (2009)
- 3) ファイトテクノロジー研究会、ファイトテック How to みる・きく・はかる。養賢堂 (2002)
- 4) 兵頭竜二、樹木水分ストレス推定のための緑葉分光特性計測装置の試作開発。日本写真測量学会年次学術講演会 (2010)
- 5) 兵頭竜二、樹木水分ストレス推定のための緑葉分光特性の計測。日本写真測量学会秋季学術講演会 (2009)
- 6) 葉緑素計 SPAD-502 Plus。カタログ、コニカミノルタセンシング株式会社