

LED分光法による非破壊検査手法の開発

機械システム科 科長 兵頭 竜二
電子情報科 科長 指方 顕
電子情報科 研究員 田中 博樹

生育果実の糖度と水分ストレス（樹体の渇き具合）との間には密接な関係があるため、高品質果実の生産では水分ストレスを指標とした適切な灌水管管理が求められる。このため、水分ストレスによる緑葉の分光特性の変化に着目した、簡易な水分ストレス計の試作開発を行った。開発した試作機には、予め選定された12種の市販LEDが実装されており、実装されたLEDによる離散的な緑葉分光反射特性を計測して、さらにその計測結果から樹木の水分ストレス量を推定することができる。みかん生産者らの協力での性能評価を試みた結果、高糖度果実の生産で必要とされている実用的測定精度（ $\pm 0.2\text{MPa}$ ）を実現できる見通しを得た。

1. 緒言

収穫果実の糖度と、果実育成期間中に樹木が受けている水分ストレス量（植物の渇き具合）との間には密接な関係がある¹⁾。このため、ミカンなど果実の栽培では、糖度の高い果物を生産するため、水分ストレスを指標とした適切な灌水管管理が求められる。一方、樹木に水分ストレスが与えられれば、緑葉の分光特性に変化が現れる^{2), 3)}。また、その変化量から水分ストレスの物理的な指標である水ポテンシャルを推定することも可能である^{4), 5), 6)}。

そこで本研究では、果実栽培現場で活用できる簡易型の水分ストレス計の試作開発を進めている⁷⁾。開発中の装置は、市販の幾つかの発光ダイオードを光源に用いて緑葉の離散的な分光反射率を測定し、その結果から水ポテンシャルを推定するものである。

本報告では、試作開発中の水分ストレス計の有効性を確認することを目的に、この装置を実際のミカン栽培現場で試用し、水ポテンシャルの測定精度の検証実験、収穫果実の品質との関係の調査を試みた。

2. 評価方法

評価実験は、長崎県内のミカン生産者などの協力を得て実施された。

2.1 試作開発した水分ストレス計

試作開発した評価用機⁷⁾は、本体とプローブとが一体となった構造で、プローブ部分で緑葉を挟む動作が測定シーケンスを起動することを特徴としたものである（図1を参照）。この試作機には予め選定された12種の市販

LEDが実装されており、実装されたLEDによる離散的な緑葉分光反射特性が2秒程度で計測され、さらにその計測結果からミカン果樹の水分ストレス量が推定される。



図1 試作開発した水分ストレス計の概観

2.2 実験フィールド

この評価実験は長崎県の南部に位置するミカン生産の盛んな地域の一つである長与町で、平成20年の6月から11月にかけて実施された。必要な測定データの収集などは、ミカン生産者の協力に加え、JA長崎、農業改良普及センター、果樹試験場、農産園芸課の指導と協力の下で行なわれた。

対象とした栽培品種は原口早生であり、対象農園はT農園、K農園、Y農園の3園地であった。なお、本報告では3園地の結果をまとめて報告するが、都合上、詳細なデータ評価はT農園を主に報告する。

また、対象とした園地はマルチ栽培が行なわれている。表1は栽培期間中のT農園のマルチ被覆と灌水処理の状況を整理したものである。なお、このマルチ栽培と

は、樹木下の地面を防水透湿性のシートで覆う栽培技法であり、雨水の土中浸透を抑え、人為的にコントロールした灌水管理を行なうことが可能となる。通常、梅雨前後から収穫前後にかけてマルチ被覆処理が行なわれる。

表1 T農園のマルチ被覆処理と灌水処理

項目	実施日
マルチ被覆	6/12 被覆 →→→→ 11/20頃 撤去
灌水処理 (約300/1樹)	8/13, 9/9, 10/14, 10/28

2.3 評価実験

評価実験では、従来技法による水ポテンシャルの測定結果との比較に加え、試作装置で定期的に観測された水分ストレス推定値と果実品質データとの比較検討を行なった。

評価実験のための測定は、園地毎に平均的な3木を選定し、その3木について実施した。

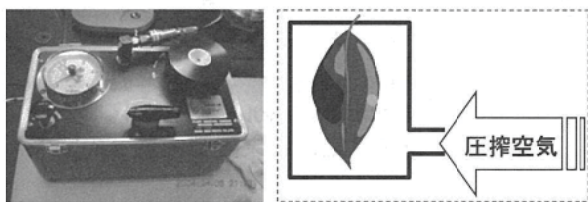
a) 水ポテンシャルとの比較検証

植物水分ストレスの物理的指標には水ポテンシャルを用いることとし、その測定にはプレッシャ・チャンバ装置を使用した(図2を参照)。

プレッシャ・チャンバ法とは、サンプルした葉を、葉柄部(茎)のみを外に出して加圧できる容器にセットし、圧搾空気を使用して葉に圧力をかける(図2(b)を参照)。そして、その圧力を徐々に増していけば、ある圧力のとき葉柄の断面から水が染み出してくる。その時の圧力にマイナス符号を付けた値を水ポテンシャルとして読み取る方法である。なおこの測定は、葉の裏面にある気孔が閉じる深夜に行うことが必要である。

実際の測定は、梅雨明け後で未だ樹木に水分ストレスが生じていない7月初旬(7月7日)と、強い水分ストレスが印加される8月中旬(8月12日)の2回、夜間に実施した。

水ポテンシャルとの比較検証では、これら夜間の実測結果と、その時同時に実施された試作開発機での測定に基づく推定結果との比較を行なった。



(a) 装置の概観 (b) 装置の原理
図2 プレッシャ・チャンバによる測定

b) 定期観測情報との比較検証

果実栽培現場では、果実状態や樹木状態を推し量るため、おおよそ10日周期で果実横径、果実糖度、果実酸度が測定され、その推移が調べられた。

なお、果実横径は予め試験木毎に選定された5果についての追跡調査の平均値である。果実糖度と果実酸度は、測定の度に各試験木から1果ずつ採取し、合計3果から搾取した果汁の混合物を分析したものである。

定期観測情報との比較検証では、定期観測に同期して実施した試作開発機での推定結果と、果実肥大量との関係や、果実糖度との関係などを考察した。

2.4 気象データ

図3は、栽培期間中の付近の降水量と全天日射量を整理したものである。

元となる情報は長崎県気象月報⁹⁾に掲載の観測地点「長崎」の測定結果であり、前述定期観測の日付に一致させて集計されている。

例えば観測日: 8月17日の情報は、その一つ前の観測日である8月7日からの10日間についての、区間累積の降水量と全天日射量を示している。なお、先頭の7月7日の情報だけは、前10日間の値である。

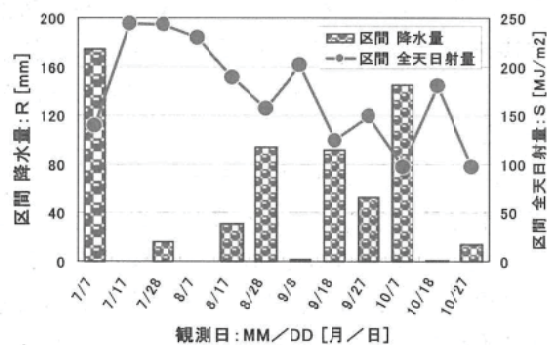


図3 評価実験期間中の降水量と全天日射量

3. 結果と考察

3.1 プレッシャ・チャンバ法との比較

図4は水ポテンシャル値についての比較結果を示しており、縦軸は試作開発機による推定値、横軸はプレッシャ・チャンバ法による実測値を示している。

この図から、推定値のパラツキは約±0.18MPaであり、高糖度果実の生産で必要と言われている実用的測定精度(±0.2MPa以内)を満たしていることが分かる。しかし、一部に0.4MPa~0.6MPaもの大きなバラツキを持つ測定点も存在する。

プレッシャ・チャンバ装置で計測される水ポテンシャルは、計測時の植物の状態（瞬時値）を反映している。一方、ミカン緑葉において、水分ストレスに起因する葉中クロフィルの状況や葉の性状の変化は時間的に緩やかである。このため、緑葉分光特性の変化に着目して水分ストレスを推定している試作開発機は、測定日前の数日間の水分ストレスの平均値を測定しているものと考えられる。

従って、試作開発機が本来持つ測定精度の問題に加え、前述のことが原因となって、測定点に大きなバラツキのものが含まれているものと推察される。

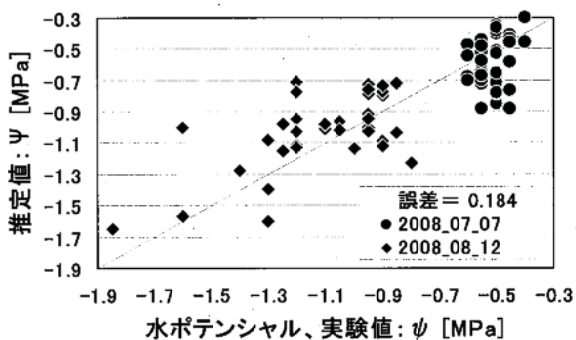


図4 水ポテンシャルの推定値と実測値との比較

3.2 ストレス推定値の推移

図5は、T農園の3木について、水分ストレス推定値の推移を示したものである。なお、図中の白抜きの測定点は、プレッシャ・チャンバ装置による夜間の測定値を示している。

この図によれば、試験木 T03 は栽培期間をとおしてあまり水分ストレスが掛かっていなかったことが分かる。また、試験木 T01 と T02 については、7月7日以降に水分ストレスが強まり、その後、弱い水分ストレスで推移していることも見て取れる。

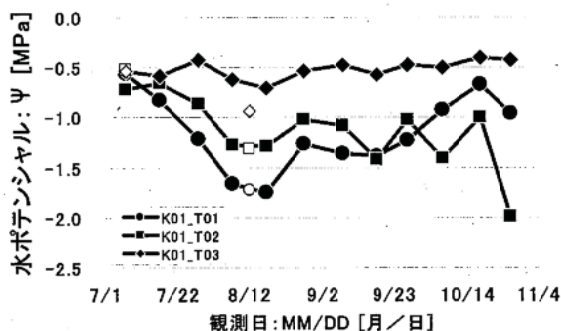


図5 ストレス推定値の推移

栽培期間の降水量と日射量を示した図3によれば、

7月7日から8月7日にかけて降水が少なく、強い日射があったことが確認できる。さらに、この間は灌水も行われていなかったため（表1を参照）、試験木 T01 と T02 にかかる水分ストレスが徐々に強くなっていくことが理解できる。なお、試験木 T01 については、根の張り具合や土中水分などの関係で、十分な水分ストレスが掛からなかったものと考えられる。

3.3 ストレス推定値と果実肥大との関係

図6は、T農園の3木について、果実横径の増大量から算出される果実体積肥大量と水分ストレス（水ポテンシャル推定値）との関係を示したものである。

一般に、植物に強い水分ストレスが掛かれば、植物は乾燥から身を守るため、気孔を閉じて水分の蒸散を抑える。また同時に植物体内に水分が不足するため、果実に蓄えられる水分の量が減少し、結果として、果実体積肥大量も減少する。

また、植物に潤沢な水分が与えられており、水分ストレスが掛かっていなければ、乾燥から身を守るために気孔を閉じる必要がなく、日射の強弱に応じて水分の蒸散量が増減することとなる。この結果、蒸散が少ないときに果実は大きく肥大し、蒸散が多いときには果実肥大量は減少する。

図6を見れば、試験木 T01 と T02 では、果実肥大量と水分ストレスとの間に正の相関が存在する可能性が窺える。これは、強い水分ストレスによって気孔が閉じていることが多く、水分ストレスに応じて果実肥大量が減少・増大しているものと理解できる。

一方、試験木 T03 については、気孔が閉じるような強さの水分ストレスが掛かっておらず、葉からの蒸散などの影響で果実肥大量が増減しているものと理解できる。

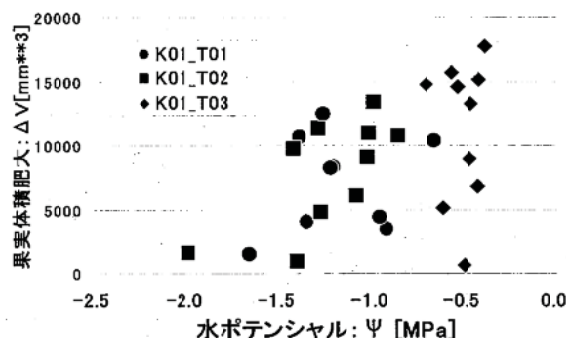


図6 ストレス推定値と果実肥大量との関係

3.4 ストレス推定値と果実糖度・酸度との関係

図7は、7月7日を起点とする水分ストレスの積算

量と果実糖度との関係を示している。なお、果実糖度が3試験木の平均値を示すため、この図をプロットするために用いた水分ストレスも3試験木の平均値とした。

果実糖度は育成期間に応じて上昇する。同じく、水分ストレスの積算量も増大する（水ポテンシャルで表現すれば、マイナスの方向に大きくなる）。このため、当然ではあるが、果実糖度と水分ストレスとの積算量との間には負の相関が見られる。

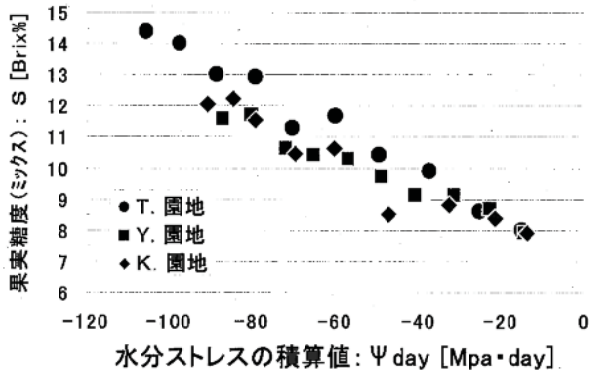


図7 ストレス推定値の積算と果実糖度との関係

図8は、収穫時の果実糖度と果実酸度に着目し、その時までの水分ストレス積算量との関係を示したものである。

データ点数が少なく、この図のみから結論を導くのは難しいが、負の相関を持つことが確認できる。

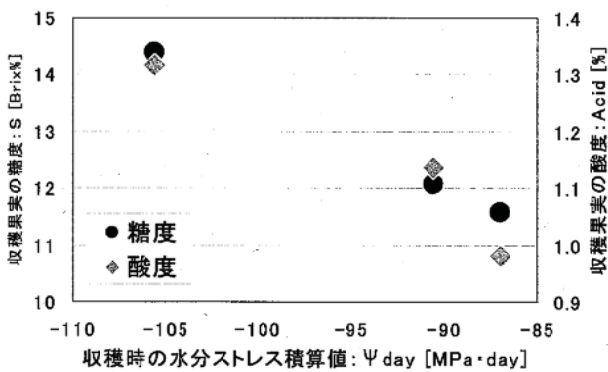


図8 収穫時のストレス積算値と果実糖度との関係

なお、図9は文献⁹⁾に掲載された同様の関係を示した図である。水分ストレス積算の起点の日付が同一でないことや測定手法が異なるなどの問題があるため、図8と図9の測定データを同一の横軸に描画することはできないが、両者が同様の特性をもっていることが見て取れる。

これらのことから、本研究で試作開発中の水分ストレス計で測定された水分ストレスも、収穫果実の品質との間に十分な関係を見いだせることが理解できる。

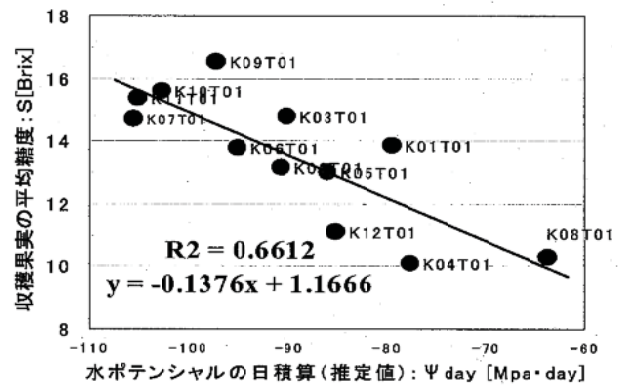


図9 収穫時のストレス積算値と果実糖度との関係⁹⁾

4. 結言

本研究では、樹木が受ける水分ストレスによって緑葉の分光特性に変化が生じる現象に着目して、簡易型に水分ストレス計を計測する装置の試作開発を進めている。このため本報告では、その性能評価実験の一貫として、ミカン生産現場で試作開発機を実際に使用して、水分ストレスの計測が可能かどうか検証実験を行った。加えて、収穫された果実の品質との関係についても評価も試みることで、試作開発機の有効性についても考察を加えた。

この結果、水分ストレスの指標である水ポテンシャルとの比較検証においては、高精度果実の生産で必要とされている実用的測定精度(±0.2MPa以内)を満たした計測が可能であることが示唆された。

果実肥大量との関係においては、葉に存在する気孔が閉じる程の水分ストレスが植物に掛かっているとき、果実肥大量と水分ストレスとの間に正の相関の存在が伺えるなど、測定結果が樹木や果実の水分ストレス状態と一致することが確認された。

収穫果実との関係においては、樹木に累積された水分ストレスと収穫果実糖度との間に負の相関があることが確認できた。

これらのことにより、試作開発中の水分ストレス計は、ミカン果樹にかかる水分ストレスを測定できるのみならず、高精度果実を生産する時の灌水管理の支援機器としても有効に機能する可能性がある。

今後はこの技術の実用化に向けて、測定精度の向上や適用樹種・品種の拡充、栽培現場での利用方法の開拓などの事業化課題にも取り組む計画である。

参考文献

- 1) 野並浩、2001. 植物水分生理学、pp.236 - 257.
- 2) 本郷千春、他、1998. 分光反射率からみた樹木の水ストレス反応、写真測量とリモートセンシング、37(4), pp.43 - 50.
- 3) 西田顕郎、他、2000. 樹木単葉の分光反射率特性と光合成速度および水分欠乏との関係、日本リモートセンシング学会誌、20(3), pp.6 - 16.
- 4) 兵頭竜二、他、2004. 果実育成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、43(5), pp.24 - 35.
- 5) Ryuji Hyodo, et al., 2005. Practical Use to Satsuma Mandarin Cultivation of the Red Edge Wavelength of Leaves, ACRS2005.
- 6) 兵頭竜二、他、非破壊検査手法を取り入れた農作物の高品質栽培技術の確立、公設試連携プロジェクト平成 17 年度終了課題研究報告書、長崎県科学技術振興局（非公開）.
- 7) 兵頭竜二、2008. LED光源で計測した緑葉反射率による樹木水分ストレスの推定、日本写真測量学会平成 20 年度秋季学術講演会発表論文集、pp.103 - 106.
- 8) 長崎海洋気象台:長崎県気象月報（2008.6～11月）、http://www.nagasaki-jma.go.jp/gyomu/tokei/tuki_jun.html (accessed 03 Dec. 2008).
- 9) 兵頭竜二・高見寿隆、2006：水分ストレスと関係のある分光特性特徴量の簡易的な検出、日本写真測量学会平成 18 年度秋季学術講演会発表論文集、pp.95 - 98.