ウンシュウミカン樹における水分状態の簡易把握のための “水分ストレス表示シート”の開発

星 典宏^{1*}・森永邦久^{1a}・横井秀輔²・浜出絵理子²・草場新之助^{1b}・島崎昌彦¹

¹ 農業・食品産業技術総合研究機構近畿中国四国農業研究センター 765-0053 香川県善通寺市

² ライフケア技研株式会社 930-0084 富山県富山市

Development of a Water Stress Indicator for Simple Estimation of Water Status in Satsuma Mandarin Trees

Norihiro Hoshi^{1*}, Kuniyoshi Morinaga^{1a}, Hideharu Yokoi²,
Eriko Hamade², Sinnosuke Kusaba¹ and Masahiko Shimazaki¹

¹National Agricultural Research Center for Western Region, Zentsuji, Kagawa 765-0053

²Life Care R&D Inc., Toyama, Toyama 930-0835

Abstract

A simple new estimation method for water status in satsuma mandarin (*Citrus unshiu* Marrow.) was developed, expecting to improve irrigation in the summer and early autumn seasons and increase fruit quality. As a patch test, a “Water Stress Indicator” stuck on the abaxial side of the leaf changed color depends on the water status of the satsuma mandarin tree. The indicator is based on the fact that Cobalt(II) chloride changes its color by hydration reaction; if there is sufficient moisture, the light blue turns to a light red. To determine the appropriate condition of this indicator usage, the relationship between the diurnal change of transpiration and the leaf water potential (LWP) before sunrise was investigated. There was a clear difference in the transpiration rate of satsuma mandarin leaves around midday on a comparison of satsuma mandarin trees under various water statuses. If the transpiration rate was above the cut off ($3 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), LWP should be -0.8 MPa or more. Together with these results, the indicator should be stuck on the abaxial side of a leaf that receives sufficient sunshine around noon. Under this condition, if the indicator color turns light red within 5 min, the satsuma mandarin tree tested is not under water stress. The “Water Stress Indicator” would facilitate visual estimation of the water state from summer to early autumn.

Key Words : citrus tree, LWP (leaf water potential), patch test, transpiration

キーワード : 蒸散速度, カンキツ樹, 水ポテンシャル, パッチテスト

緒 言

カンキツ, 特にウンシュウミカンにおいては, 夏から秋にかけての適度な水分ストレスにより果実の糖の蓄積が促進され果実品質が良好になることが一般に知られており, これまで数々の報告がある (葦沢, 1971; 中里ら, 1996; 高辻, 1991). また, 水分ストレスによる糖度向上のメカニズムについては植物の持つ浸透調節機構が機能していることも明らかにされている (野並, 2001a; Yakushiji ら, 1996).

高糖度のウンシュウミカンを生産するためには, 夏場から収穫前まで, 適度な水分ストレス状態を維持することや, 減酸を促進するため, 水分ストレス状態から一時的に回復

させる, いわゆる“戻しかん水”を行うなど, かん水の水量や間隔などを考慮した合理的な水管理を行うことが不可欠である. しかし, 干ばつ年やマルチ栽培における過度な水分ストレスは光合成・呼吸などに影響を及ぼし (森永, 1993), また高い酸度や小玉化による秀品率の低下などの問題が生じる要因となっている. さらに過度な水分ストレスは隔年結果を助長する主な要因の一つに挙げられている (木原・小中原, 2000). 従って, 適切な水管理を行うことは高品質果実生産と安定生産にきわめて重要であり, 実際の水管理においても, 樹体の水分状態を園地で簡単に把握できる方法が, 生産現場から長年強く要望されていた.

一般にカンキツ生産者は, 水管理において, 葉の巻き, 葉色の低下, 旧葉の落葉, あるいは果実の肥大速度の減少や軟化など, 外観上の変化を目視により樹体の水分ストレス状態を判断しているが, これらは各生産者の主観的で経験的な判断に頼るところが大きい. 従って, 生産者によっては不適切な判断による水管理により十分な果実品質の向

2006 年 11 月 8 日 受付. 2007 年 2 月 15 日 受理.

本報告の一部は園芸学会平成 18 年度秋季大会で発表した.

* Corresponding author. E-mail: starnor@affrc.go.jp

^a現在: 農業・食品産業技術総合研究機構果樹研究所

^b現在: 農林水産省大臣官房

上が得られない場合も多いのが現状である。

これまでウンシュウミカンの水分状態を簡易に視覚的に判別する試みとして、葉身閉鎖度（森永，1993）、葉の巻き上げ度（佐々木，2005）や萎れ角度（中元ら，1998）について検討した事例はあるが、これらは必ずしも簡便な方法とは言い難い面があった。

一方、作物の水分生理に関する研究では、葉の水ポテンシャル（以降、LWP と記す）を指標とした測定（野並，2001b）が精力的に行われており、サイクロメータ法（松田ら，1976）やプレッシャーチャンバー法（町田・間苧谷，1974）により LWP による水分ストレスの評価が行われ、カンキツ樹の水分状態の評価法としても妥当とされている（間苧谷・町田，1980）。また、貝原ら（2006）によれば、‘上野早生’を対象として、7月下旬頃から早朝日の出前の LWP が -1.0 MPa 程となる水分ストレス状態にすることにより、高品質果実生産を達成しており、LWP を指標とした高品質果実生産のための知見が示されている。しかし、これらの研究で用いられたプレッシャーチャンバー法などの測定手法では、一般に樹体内の水分状態が均質になると考えられている早朝日の出前の測定値（以降、 Ψ_{max} と記す）を用いていることや、測定機器が高価で取扱いが煩雑であることなどの難点がある。そのため、LWP は樹の水分状態の指標として有用ではあるものの、直接生産者が水管理に利用することは困難である。

本研究では、生産現場において生産者が短時間にかつ簡易に樹体の水分状態を把握できる方法を確立することを目的として検討を進め、葉裏面の気孔からの蒸散による水分を色調の変化として表示できる吸湿性素材を備えたシートによって、樹の水分状態を視覚的に把握する手法（特願 2006-54679）を開発した。また、このシートの実際の栽培園における最適な利用法を確立するために、シートの色調の変化と LWP (Ψ_{max}) 値ならびに日中の蒸散速度との関係について検討した。

材料および方法

1. 吸湿性素材の開発

本研究で用いた吸湿性素材である塩化コバルト (II) は、2 価の塩化物であり、吸湿して無水物から水和物へと変化する過程で、青色から薄紫色、淡赤色へと素材自体の色調が変化する。これを利用して蒸散速度の把握に用いた。本研究では葉の蒸散速度の把握のために、人体の皮膚水分の簡易計測用（牧野ら，2004）に開発されたシートの感度・形状等を改良したものを作成した。

2. 吸湿性素材の利用方法の確立のための LWP (Ψ_{max}) と日中の蒸散速度との関係の検証

‘宮川早生’（カラタチ台，樹齢 9 年生）を供試し、花こう岩風化土壌を敷詰めた近畿中国四国農業研究センター四国研究センター内の試験用傾斜地圃場、および雨よけハウス内に植栽した樹体を用いた。

1) 水分ストレス状態の葉の蒸散速度および LWP (Ψ_{max}) の変化

水分状態の異なる 16 樹の供試樹に対して、LWP (Ψ_{max}) と蒸散速度を測定した。

LWP (Ψ_{max}) はプレッシャーチャンバー（PMS Instrument Company Model 600）を用い、早朝日の出前（午前 3 時から 5 時）に無着果春葉を 2 枚採取し、圃場で直ちに測定し、平均値を LWP (Ψ_{max}) とした。町田・間苧谷（1974）が報告した測定法に準じ、チャンバー内の加圧には窒素ガスを用い、加圧速度はおおよそ毎秒 $0.02 \sim 0.06$ MPa で行った。

蒸散速度の測定は、定常制御型高精度ポロメータ（LI-COR, inc Model LI-1600）を用いた。対象とした葉は、おおよそ日射に正対し、十分に直達日射を受けている春葉とし、旧葉または虫害によって損傷を受けた葉などは除外した。蒸散速度測定は無着果春葉 1 枚を対象に行い、その樹の状態および部位で得られた値とし、平均値は用いなかった。

また、ポロメータに装備されてある測定機器により、光量子密度、気温、相対湿度、葉表面温度を蒸散速度の測定時の条件として併せて計測した。

夏季測定は 2005 年 8 月から 9 月および秋季測定は 2005 年 10 月に行った。

2) 吸湿性素材を用いた水分ストレス状態の判別

これまで水分量を評価するために、吸湿性素材（大江ら，2002）や潮解性素材（佐野，1999）を検知素材として用いた事例はあるものの、これらの素材を直接植物体に貼り付けて検証した事例は見当たらない。

蒸散速度の程度から樹の水分状態を簡易に推定するため、LWP (Ψ_{max}) 及び蒸散速度を測定した葉に対して吸湿性素材を用いて蒸散により葉から放出される水分量の簡易測定を行った。

あらかじめ検討を行った、樹体の水分ストレス状態が葉の蒸散速度の変化として表れる部位及び時刻において、開発した吸湿性素材を用いたシートの葉裏面への貼付け試行を 5 回行った。

結果および考察

1. 吸湿性素材の開発

この吸湿性素材はシートに固定してあり、葉に貼り付けることが可能で、一般的なパッチテストのシートと同様な形状である。このシートを“水分ストレス表示シート”と称する。水分ストレス表示シートの構造と素材を第 1 図に示した。

水分ストレス表示シートは、本体が樹脂フィルム製で、表面の中央付近に四角形の表示部がある。この表示部は、塩化コバルト吸湿性素材の色調を視認することができる。表示部の近傍に色見本が印刷され、塩化コバルトの無水塩に近い青色から、完全に吸湿し飽和した状態を示す淡赤色まで、色調の変化過程の色が数段階に分けて示されている。

裏面の剥離紙を剥がし、葉の裏面に密着させて貼り付け

第1図 水分ストレス表示シートの構造と素材

①樹脂フィルム ②色見本 ③塩化コバルト紙 ④表示部 ⑤不織布 ⑥接着部 ⑦剥離紙

第2図 LWP (Ψ_{max}) の異なる葉の蒸散速度の日変化

ることにより、葉裏面から蒸散に伴って放出された水分が、疎水性の不織布を介し塩化コバルトに吸湿され、貼り付けてから一定時間後の塩化コバルトの色調の変化から蒸散速度が把握できる。葉面からの蒸散による水分放出量が少ない場合、塩化コバルトは未吸湿時の青色であるが、吸湿して水分が多ければ飽和して淡赤色を呈する。この色調変化は吸湿される水分量に比例して変化する。

2. 吸湿性素材の利用方法の確立のためのLWP (Ψ_{max}) と日中の蒸散速度との関係の検証

1) 水分ストレス状態の葉の蒸散速度およびLWP (Ψ_{max}) の変化

早朝日の出前に測定したLWP (Ψ_{max}) が -2.2 MPa (強水分ストレス樹), -1.1 MPa (中水分ストレス樹), -0.5 MPa (弱水分ストレス樹) であった樹の蒸散速度の日変化を光量子密度と併せて第2図に示した。これはそれぞれの樹について、樹冠の赤道周囲付近で、樹の南側の十分に直達日射を受けている春葉の蒸散速度である。

水分ストレス状態の異なるそれぞれの樹について、日の出以降、光量子密度の増加に伴い各樹の蒸散速度は正午頃まで増加傾向を示し、その後日没にかけて減少傾向を示した。LWP (Ψ_{max}) による差が日中の最大蒸散速度として表れる傾向が認められた。

LWP (Ψ_{max}) の差について葉の蒸散速度により判別を試みる場合、早朝あるいは日没前後では、LWP (Ψ_{max}) を十分に評価しうる葉の蒸散速度の差異が得られなかった。このため、LWP (Ψ_{max}) が異なる葉の蒸散速度の測定は、蒸散速度の差異が大きく表れる11時から13時頃に行い、蒸散速度を測定した部位を第3図に示した。

前述した方法で測定した、異なるLWP (Ψ_{max}) の樹について、11時から13時頃に測定した葉の蒸散速度を第4図に示した。これは、平均気温 $30.5 \pm 1.9^\circ\text{C}$ 、平均相対湿度 40.0 ± 8.9 Rh%, 平均葉表面温度 $31.3 \pm 1.9^\circ\text{C}$ 、測定時光量子密度 $1554 \pm 269 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の夏季条件下で行ったものである。

LWP (Ψ_{max}) がおよそ -0.8 MPa 以下では蒸散速度の低下傾向が認められた。LWP (Ψ_{max}) が -0.8 MPa 程度の弱水分ストレス状態では蒸散速度は $3 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ を超えたが、水分ストレス状態がそれ以上になった樹では、蒸散速度が $3 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ を大きく超えることはなかった。 -0.8 MPa 付近での蒸散速度のばらつきが大きかったことは、樹体内水分以外の気象要因によるものと推測されたが、光量子密度、気温、湿度などの気象要因との明確な相関関係はみられなかった。

本試験での測定結果から、LWP (Ψ_{max}) の低下に従い日中の蒸散速度が減少するという明確な関係は得られなかったが、前述した蒸散速度 $3 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ を閾値の目安として規定すると、LWP (Ψ_{max}) が、 -0.8 MPa 付近の状態とそれ以下の状態を蒸散速度から判別することが可能であると考えられる。

森永 (1993) は葉の巻き具合 (葉身閉鎖度) は、LWP が

第3図 蒸散速度を計測した部位及び葉

①樹冠の赤道周囲付近、かつ②南側の日射が十分に当たっている葉を選択。③日陰になっている葉、旧葉、虫食い葉は除外。

第4図 LWP (Ψ_{max}) と日中の蒸散速度の関係
(夏季測定, 8 から 9 月)

第5図 LWP (Ψ_{max}) と日中の蒸散速度の関係
(秋季測定, 10 月)

おおよそ -2 MPa 以下から変化し、 -3 MPa 以下では葉色が退色することを示しており、一般的にもこの範囲以下の強い水分ストレスであれば、外見からでも一見して確認は可能である。しかし、 -0.8 MPa 付近の外見の変化で判断しにくい水分状態を視認により判別することは困難である。

LWP (Ψ_{max}) と蒸散速度との関係から、前述したような条件の部位及び時間帯で葉の蒸散速度が閾値である $3 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上得られていれば、LWP (Ψ_{max}) は -0.8 MPa 以上であると推測でき、 $3 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下であれば、外見の明確な変化が無くても、おおよそ LWP (Ψ_{max}) は -0.8 MPa 以下の水分ストレス状態であると推測できる。

同様に 10 月上旬以降の秋季に、平均気温 $25.3 \pm 2.6^\circ\text{C}$ 、平均湿度 37.0 ± 3.2 Rh%, 平均葉表面温度 $26.3 \pm 2.9^\circ\text{C}$ 、測定時光量子密度 $1549 \pm 417 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の状況で測定を行った結果を第5図に示した。

LWP (Ψ_{max}) が -0.8 MPa 前後で水分ストレスが弱い樹では蒸散速度が $3 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ を超えることは少なく、夏季条件での測定時のような特徴的な LWP (Ψ_{max}) と蒸散速度の関係は明確には認められなかった。

2) 吸湿性素材を用いた水分ストレス状態の判別

水分ストレス表示シートは、樹の規定の位置 (第3図で示すように樹冠の赤道円周付近で、南側の十分に直達日射が得られる部位) の葉の裏面に、中肋を避けて貼り付けた。実際に葉に貼り付けた状態を第6図に示した。

蒸散速度が $3.2 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の弱水分ストレス樹 (LWP (Ψ_{max}) = -0.6 MPa) の葉と $1.2 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の強水分ストレス樹 (LWP (Ψ_{max}) = -2.1 MPa) の葉の裏面に貼り付けて色調変化を検証した結果を第7図に示した。

吸湿性素材の色調変化について、色見本は4段階であったが便宜上8段階に目視で判断を行った。これは時間経過における吸湿性素材の色調が4段階の色見本と完全に一致しない場合があることから、色見本中の近接色を表せるよ

第6図 水分ストレス表示シートの貼り付け状態と色調変化

第7図 LWP (Ψ_{max}) の異なる葉における水分ストレス表示シートの色調変化

弱水分ストレス樹は、 $\Psi_{max} = -0.6$ (MPa), 蒸散速度 = 3.2 ($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) の樹を用い、強水分ストレス樹は、 $\Psi_{max} = -2.1$ (MPa), 蒸散速度 = 1.2 ($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) の樹を用いた最大・最小値を誤差範囲として示した

うに、より細分化したものである。初期状態の青色を 0.0, その間の 2 つの中間色は 0.3 および 0.7 とし, 飽和した状態の淡赤色を 1.0 とした。さらに 2 つの中間色については, ± 0.1 で近接色を考慮した数値を用いた。第7図は色調変化を数値化した平均であり, その最大・最小値を誤差範囲として併記した。

シートを貼り付けてから 5 分後の弱水分ストレス樹では吸湿性素材が蒸散により放出された水分を吸湿し淡赤色を示したが, 強水分ストレス樹では明らかな色調の変化は見られなかった。このことから, 水分ストレス表示シートを貼り付けた後, おおよそ 5 分経過した時点であれば, 色調の変化として LWP (Ψ_{max}) の判別が可能と考えられた。

水分ストレス表示シートの色調表示では LWP (Ψ_{max}) が低かった樹でも短時間に淡赤色を示す場合も認められたが, これはシートの密着の不足など貼り付けの不具合が原

因と考えられた。また, LWP (Ψ_{max}) が高かった樹でも蒸散速度が低い場合もわずかだが認められた。このような状態があることから, 1 樹に対して水分ストレス表示シート 1 枚の色調変化の結果では十分ではない。このため複数枚 (実施形態として 3 枚を想定) に対して貼り付けを行い, また翌日あるいは, 数日後に同一条件で再度を行うことにより, 確実な葉の水分状態の把握が可能となる。

今回作成, 試行したシートの適用時期の条件として, 第 4, 5 図で示したような, 水分ストレスが弱い樹での蒸散速度が $3 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上得られる時期に限定され, 日中の気温が 30°C 程度の水分管理が特に必要な夏季 (8 から 9 月) の時期に利用できると考えられる。

今回開発した水分ストレス表示シートを用いた植物の水分ストレス状態を把握する本法は, 廉価 (1 枚当たり 100 円未満を想定) な方法であり, 生育期間中何度も迅速簡便に測定を行うことが可能で, 非破壊的な方法で, 実際の生産現場で生産者が樹体の水分状態の把握に用いることのできる手法であるといえる。

今回の研究開発では, 対象をウンシュウミカン樹に限定して検討を行ったが, 吸湿性素材を覆う不織布の大きさ, あるいは塩化コバルトの配合比を検討することによって, 吸湿性素材が飽和して色調が変化するまでの時間 (感度) を自由に変化させることが可能であることから, 今後, 中晩生カンキツや落葉果樹, さらに他のさまざまな植物体に対しても, 蒸散速度の変化を介して水分状態を色調の変化として視覚的に捉えることが可能であり, 本法の応用範囲は多岐に渡ると考えられる。

摘 要

ウンシュウミカンの適正な水管理に利用するために樹体の水分状態を簡易に視覚的に把握できる“水分ストレス表示シート”を開発した。これは素材に塩化コバルトを用いることで, 蒸散により葉裏面から放出される水分に応じて色調が変化し, 色調の変化度合いから樹体の水分状態と LWP (Ψ_{max}) を推定できるものである。そのためにプレッシャーチャンバー法により測定したウンシュウミカン樹の LWP (Ψ_{max}) と日中の蒸散速度との対応関係を明らかにした。

その結果, 夏季のウンシュウミカンに対して, おおよそ正午前後 1 時間の時間帯に十分直達日射を受けている春葉に対して水分ストレス表示シートを複数枚の葉の裏側に貼り付けることにより水分状態を把握できること, 貼り付け後 5 分経過後の吸湿性素材の色が淡赤色に変色すると, LWP (Ψ_{max}) は, -0.8 MPa 程度の水分ストレス状態であることを明らかにした。また, 5 分経過後の吸湿性素材の淡赤色への変化が少ないほど, 樹の水分ストレス状態が高まっていることを示し, 樹体の水分状態の把握ならびに適正なかん水時期を判断する指標などに利用することも明らかにした。

引用文献

- 葦沢正義. 1971. 温州ミカンの品質と水管理 (1). 農及園. 48: 1155-1160.
- 貝原洋平・宮本輝仁・新堂高広. 2006. 根域制限栽培のウンシュウミカン‘上野早生’における水分ストレス付与程度の違いが果実品質に及ぼす影響. 園学雑. 75 (別2): 99.
- 木原武士・小中原 実. 2000. ウンシュウミカンにおける隔年結果の現状と対策. 果樹試報. 34: 111-136.
- 町田 裕・間苧谷 徹. 1974. 果樹の葉内水分不足に関する研究 (第1報). Pressure chamber による温州ミカン葉の water potential の測定法について. 園学雑. 43: 7-14.
- 牧野輝彦・横井有紀子・佐藤里美・横井秀輔・諸橋正昭. 2004. 経表皮水分喪失量 (TEWL) の簡易測定法の検討. 新薬と臨床. 53: 521-526.
- 間苧谷 徹・町田 裕. 1980. 夏季におけるウンシュウミカン樹の水管理の指標としての葉の水ポテンシャル. 園学雑. 49: 41-48.
- 松田松二・浅沼興一郎・山田宣良. 1976. サイクロメータによる葉の水分ポテンシャルの測定. 香川大農学報. 27: 139-143.
- 森永邦久. 1993. カンキツ光合成の向上と果実生産に関する研究. 四国農試報. 57: 135-205.
- 中元勝彦・平尾 晃・湯浅哲信. 1998. ワセウンシュウの葉の調位運動を利用した水管理指標が樹体および果実形質に及ぼす影響. 園学雑. 67 (別2): 194.
- 中里一郎・松永茂治・岸野 功. 1996. ウンシュミカンのフィルムマルチ栽培における乾燥ストレスの期間及び程度が果実品質に及ぼす影響. 長崎果樹試報. 3: 1-10.
- 野並 浩. 2001a. 植物水分生理学. p. 236-252. 養賢堂. 東京.
- 野並 浩. 2001b. 作物の水分生理に関する土, 葉, 茎における計測. 日作紀. 70: 151-163.
- 大江敏博・濱田眞民・吉田誠吾. 2002. 湿度検知材とその製造方法および湿度検知材を用いた乾燥剤. 特許公開 2002-350419.
- 佐野津根子. 1999. 湿度インジケータ. 特許 2878095.
- 佐々木俊之. 2005. 秋季におけるウンシュウミカンの水ストレスの指標としての葉の巻上げ度 (葉身の閉鎖程度). 園学雑. 74 (別2): 114.
- 高辻豊二. 1991. 温州ミカンの水分制御による糖度向上技術. 農業技術. 46: 398-402.
- Yakushiji, H., H. Nonami, T. Fukuyama, S. Ono, N. Takagi and Y. Hashimoto. 1996. Sugar accumulation enhanced by osmoregulation in Satuma mandarin fruit. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 121: 466-472.