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

The Spectral Characteristics of Leaves in Water Stressed Satsuma Mandarin Tree at Growth Stage of Fruit and the Relation between it and the Sugar Content of Fruit

兵頭 竜二*・高見 寿隆**・松尾 憲一***・

一丸 禎樹***・下村 義昭*

*Ryuji HYODO, Toshitaka TAKAMI, Kenichi MATSUO,
Yoshiki ICHIMARU and Yoshiaki SHIMOMURA*

Abstract: It is very important to control the water stress at the growth stage of Satsuma Mandarin for high sugar content. It is known that a shift of the red edge wavelength of spectral reflectance to shorter wavelengths is caused in water stressed leaves. The authors investigated the transition of the water potential and the red edge wavelength of spectral reflectance in the actual fruit cultivation. Its period was from July to November in 2003. Consequently, the transition of the red edge wavelength was the same as the transition of the water potential in film-mulching on the ground surface of the fruit trees. Two main results were obtained. First, an adequate correlation between the averaged sugar content in harvest fruit and amount of change of the red edge wavelength at the growth stage of fruit was indicated from the results of measurements. Second, it is assumed that the individual differences of mandarin trees, such as the amount of fruit, volume of tree, and nutritive condition, influence the red edge wavelength.

1. はじめに

ミカンなどの果実生産においては、灌水や水切りと言った水管理が重要視されている。これは、適切な水管理によって樹体に与える水分ストレス量を制御すれば、果実の糖度や酸含量を調節することができ、高品質な果実を生産できるからである(野並, 2001)。また、中里ら(1996, 1997)は、樹体にかかる水分ストレス量を表す水ポテンシャルを用いて、果実肥大期に与えられた水分ストレス量と収穫期の果実糖度との関係な

どを調査しており、与えられた水分ストレス量が強ければ糖度の高い果実が得られることを示している。

ところが、この水分ストレスは、与え過ぎれば樹勢を弱め、柑橘類特有の隔年結果性などの症状を引き起こしたり、最悪の場合は樹木そのものを枯死させることとなる。従って、適量の水分ストレスを適度の期間だけ与えることが必要とされる。このため、与えた水分ストレス量の測定が必要となるが、水ポテンシャルなどの測定は手順が煩雑であり農業現場で使用されることは少なく、専ら経験と感による水管理が行われているのが実情である。

一方、水分ストレスが与えられた樹木緑葉の分光特性において、レッドエッジの波長が短波長側に移動(ブルーシフト)することが知られており、数多くの報告例がある。例えば、本郷ら(1998)は、水分ストレスに顕著な反応を示すナツツバキについて、水分ストレスに対する分光反射率の変化などを調査し、水分ストレスを受けた試験区のレッドエッジが短波長側にシフトする現象が観測されたことを報告している。また、

* 長崎県工業技術センター
Industrial Technology Center of Nagasaki
〒856-0026 長崎県大村市池田2-1303-8

** 長崎県果樹試験場
Nagasaki Fruit Tree Experiment Station

*** 長崎県総合農林試験場
Nagasaki Agricultural & Forestry Experiment Station

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 43, NO. 5, 2004

西田ら（2000）も、ツバキとヤマモモのポット苗を水分欠乏状態におき、レッドエッジがブルーシフトすることなどを確認している。

これらのことから、レッドエッジのブルーシフトを確認するために実験的に作り出された乾燥状態だけでなく、農業現場で実施されている通常のカン栽培においても同様のブルーシフトが観測されれば、ブルーシフトの観測は高品質な果実を栽培する場合に必要な水分ストレス量を見極める手段として有益である。そこで本論文では、2003年の露地カンの栽培期間において、作為的な水管理によって樹体にかかる水分ストレス量を変化させた試験圃場を準備して、7月から11月にかけてのレッドエッジ波長や水ポテンシャルの推移と収穫果実の糖度などについて調査した。さらに、レッドエッジ波長と水ポテンシャルとの関係や、レッドエッジ波長の変化量と収穫果実の糖度との関係などを考察した。

2. 調査方法

調査は、シートマルチ栽培技法によって栽培されているカンの試験圃場を利用して行った。試験に用いたカン果樹は、2003年5月上旬に開花期を迎え、収

穫は11月12日であった。調査期間は、開花後約70日から収穫前後までの約120日間であり、およそ10日間隔のレッドエッジ波長と水ポテンシャル、収穫後の果実糖度を測定した。

2.1 気象データ

図1は、長崎県果樹試験場が観測記録した一日当りの降水量と、長崎海洋気象台が公開している全天日射量（長崎海洋気象台、2003）の推移を示している。長崎県果樹試験場と長崎海洋気象台との間は直線距離にして約30km離れているが、長崎県果樹試験場の日照計の不調により現地の正しい日射量が記録されていなかったため、参考として最も近い場所の観測値である長崎海洋気象台のものをを用いた。

また、長崎県果樹試験場で記録されている気象データによれば、6月下旬～7月26日の梅雨明けまでは雨や曇りの日が多かった。8月～10月の間は晴れの日が多く、特に9月中旬～10月にかけては、ほとんど降水が無い日が連続した。また、9月12日には、台風0314号が東シナ海を北上しており長崎県にも接近した。

2.2 試験圃場と圃場管理

圃場は長崎県果樹試験場の試験圃場で、主として

注) 降水量は長崎県果樹試験場の観測値。全天日射量は長崎海洋気象台の観測値。

図1 降水量と全天日射量

シートマルチ栽培技法が適用されているところを用いた。栽培されている品種は原口早生である。

シートマルチ栽培技法とは、透湿性の白いマルチシートで樹冠下の地面を覆う栽培技法である。この技法による栽培は、雨水などの浸透を防ぐことで人為的に制御された水分ストレスを果樹に与えることができ、高糖度果実の生産を可能にする。

2.2.1 試験区と試験木

試験区は、シートマルチ栽培技法が適用されているマルチ有第1区～第5区と（以下、単に第1区などと呼ぶ）、マルチ無区の合計6区とした（図2）。なお、第5区だけは2列に跨がって試験区が設定されている。この2列には、前年に実施された施肥量に関する試験の影響のため、栄養状態不良の果樹が幾本あった。このため、本論文の試験に適用できる試験木の数を確保するため、この2列を一つの試験区とした。

各列には10本あるいは11本の試験木があるが、その年の新梢発生量や着花量の違いにより、木によって着

果量が一定でない。そこで、第1区～第5区においては、着果量を揃えるための摘果作業も実施し、実験データを収集する代表木を選定した。図3は、選定された代表木の樹容積と着果量を示している。なお、樹容積とは、樹木の縦、横、高さの積に0.7を乗じた値で、枝葉の量やその拡がりを知る目安として用いられる。着果量とは、着果数を樹容積で割った値であり、枝葉の量に応じた着果数を知る目安となる。

2003年の栽培期は柑橘類にみられる隔年結果性の裏年に当たり、全体的に着果量が少なく、比較的に着果量の多い樹木でさえ、例年に比べれば充分とは言えない着果量であった。このため、試験木には、各試験区から最も着果量の多い木を普通着果樹として選んだ。これらの試験木の樹容積と自然着果量は、それぞれ $4.42 \pm 0.55 \text{ m}^3$ と $70.68 \pm 2.34 \text{ 個/m}^3$ であった。さらに、不適切な果実の除去と樹木内の着果を均等にするための摘果作業（9月10日に実施）の後の着果量は、 $53.84 \pm 3.68 \text{ 個/m}^3$ であった。また、参考のために次に着果量の多い木も少着果樹として試験木に追加した。これらの試験木の樹容積、自然着果量、摘果作業後の着果量は、それぞれ $5.04 \pm 0.25 \text{ m}^3$, $38.96 \pm 1.26 \text{ 個/m}^3$, $36.08 \pm 3.48 \text{ 個/m}^3$ であった。

マルチ無区については、普通着果樹を1本選定した。なお、マルチ無区については樹容積などの詳しい情報は無い。

2.2.2 水管理

各試験区におけるマルチシートの敷設期間と、その間の灌水の状況を表1に示す。

マルチシートの敷設作業は、その効果を十分に引き

図2 試験圃場内の試験区の設定

注)「9/10着果量」は、9月10日の摘果作業後の着果量を示す。

図3 樹容積と着果量

表1 マルチシート敷設期間と水管理の状況

試験区	マルチシートの敷設期間		灌 水 作 業 [ℓ/樹]					
	敷設日	撤去日	8/22	9/1	9/8	10/1	10/9	10/25
第1区	6月10日	11月5日			60	20	40	40
第2区	6月10日	11月5日			60		40	
第3区	7月19日	11月5日		60	60		40	
第4区	7月19日	11月5日	60	60	60		40	
第5区	8月4日	11月5日	(9月12日, 台風0314号通過時に雨水侵入。)					
マルチ無区	—	—	(常時, 雨水などが侵入。)					

注) 第5区は、土壤の乾燥状態が悪かったことと台風被害による雨水侵入のため、管理した灌水作業はしていない。

マルチ無区は、管理した灌水作業はしていない。

出すため、土壤が適度に乾燥している時に実施する必要がある。このため、試験区毎に敷設日が異なる結果となっている。また、収穫前にはマルチシートが撤去され、樹勢の回復が促される。なお、9月12日に長崎県付近を通過した台風0314号の影響により、第5区のマルチシートが吹き飛ばされる事態が生じた。このため、台風通過後に第5区の土壤を乾燥させ、マルチシートの再敷設を行った。

灌水作業は、試験区毎に樹木当りの灌水量で管理して実施した。マルチ無区については、常に降水の影響を受けるため、管理した灌水作業は実施しなかった。第5区についても、土壤の乾燥状態が悪かったことや前述の台風被害により雨水侵入があったため、管理した灌水作業は実施しなかった。なお、マルチシート敷設期間中に降雨などがあったが、第1区～第4区ではマルチシートの機能により、シートを通した雨水の土中浸透はほとんどなかった。

表1に示すように、10月9日、第1区～第4区において一斉に灌水が行われている。これは、収穫前に実施されるもので、果実の肥大促進や、樹勢を回復させて翌年の新梢形成と着花を促すなどの目的がある。

10月1日と10月25日、第1区への灌水が行われている。この灌水は、好天が続いたことによって樹木に過度の水分ストレスがかかり、落葉現象が発生したために特別に実施したものである。

2.3 レッドエッジの波長

レッドエッジの波長は、緑葉の分光反射率を測定した後、その一次微分特性を求めて検出した。

分光反射率の測定は、測定器を試験圃場に持ち込み、樹木に付いている生きた状態の緑葉を対象にして実施

した。また、調査は午前10時～12時を目安に実施した。

2.3.1 分光反射率特性の計測

分光反射率の測定には、OceanOptics製のマルチチャンネル分光器(HR2000)と反射プローブ(R200-7)、タングステン・ハロゲン光源(LS-1)を使用した。

測定におけるプローブと緑葉との位置関係は、間隔を2mm、プローブの方向と緑葉の法線との角度を30°とした(図4)。測定では、この位置関係が保たれるように図5に示す治具を用いた。また、この治具には粉末状の硫酸バリウムを押し固めて作った板が仕込まれている。葉を測定しないときは、硫酸バリウムの板の反射光が測定され、分光反射率を求める際の基準となる。葉を測定するときは、葉の裏面に硫酸バリウムの板が当たり、裏面からの外乱光の侵入を防ぐように工夫されている。

試験葉は、各試験木について新梢の先端から3枚目の葉をランダムに5枚選択した。各試験葉の計測は場所を変えて2回とし、2回分の平均値をその葉の計測結果とした。さらに試験葉5枚の結果の平均値を、その試験木の測定結果とした。なお、この測定は非破壊で実施されるので、調査期間中、試験葉の変更はして

図4 緑葉の分光反射率の測定方法

図5 測定治具の概観

いない。

2.3.2 レッドエッジの検出

図6は、測定された分光反射率特性と、その一次微分特性を模式的に表している。緑葉は、赤色の光を良く吸収し（反射率は低い）、近赤外光を強く反射する。この低い反射率から高い反射率への変化域はレッドエッジと呼ばれ、分光反射率を一次微分すれば大きな山状の特性を示す。図中の λ_s と λ_e は、レッドエッジよりもそれぞれ短波長側あるいは長波長側の波長で、一次微分の値が0となる波長である。

本論文では、レッドエッジの波長： λ_{RE} を次式で定義した。ここで、 $R'(\lambda)$ は、測定された緑葉の分光反射率特性： $R(\lambda)$ の一次微分特性を表している。なお、この式で計算すれば、一次微分特性と横軸（一次微分の

図6 分光特性とレッドエッジ波長の検出

値が0)で囲まれた波長が λ_s から λ_e までの領域の(図6中の面S)、重心位置の波長を求めることができる。

$$\lambda_{RE} = \frac{\int_{\lambda_s}^{\lambda_e} R'(\lambda) \lambda d\lambda}{\int_{\lambda_s}^{\lambda_e} R'(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

2.4 水ポテンシャル

植物にかかる水分ストレスを定量する方法として、本論文ではプレッシャチャンバ法による水ポテンシャルの値を採用した。

2.4.1 測定原理

圧搾空気を導入して加圧できる容器に、葉柄部だけを外に出して緑葉を中に入れ、密閉された状態を準備する(図7)。圧搾空気を容器内に導入して徐々に加圧すれば、ある圧力の時、葉柄の導管から水が吹き出してくる。この時の圧力にマイナス符号を付けたものを水ポテンシャルとみなす(和歌山県, accessed 2002)。従って、絶対値が大きいほど、樹体にかかっている水分ストレスが大きいことを意味する。

なお、この測定は緑葉の気孔が閉じる深夜から夜明け前が望ましいとされる。

2.4.2 測定

測定には、大起理化工業製の植物体内水分張力測定器(DIK-7002)を使用した(図8)。

試験葉には、各試験木について、新梢の先端から3枚目の葉をランダムに4枚選択したものを切り取って用いた。この測定は破壊検査であるため、調査の度に新しい試験葉がサンプルされる。

測定は、まず3枚の試験葉について実施した。その結果の最大値と最小値との差が0.1MPaを越えていれば、残りの1枚についても実施した。

なお、深夜から夜明け前の測定が望ましいことから、

図7 プレッシャチャンバ法の測定原理

図8 プレッシャチャンバの概観

分光特性を計測した後の深夜12時頃を目安に測定した。

2.5 収穫果実の糖度

収穫果実の糖度の測定には、ブリックス屈折糖度計を使用した。収穫された果実からランダムに選んだ5個について、その果肉を搾り、得られた搾り汁の混合液を測定した。従って、得られる値は果実個々のものではなく、平均の Brix 糖度である。

3. 調査結果

図9は、普通着果樹についてのレッドエッジの波長の推移 (●印) と水ポテンシャルの推移 (◇印) を示している。また、表2は収穫果実の平均糖度などを表している。

3.1 水ポテンシャルの推移

管理した灌水作業を実施した第1区～第4区に着目

する (2.2.2を参照)。

表1によれば、第1区と第2区は、第3区と第4区に比べて約1カ月早くマルチシートを敷設している。さらに第3区では9月1日、第4区では8月22日と9月1日に灌水が行われているのに対して、第1区と第2区ではこれらの日に灌水されていない。なお、第1区では10月1日と10月25日に灌水されているが、これは水分ストレス過多によって落葉現象が生じたために特別に実施したものである (2.2.2を参照)。従って、第1区と第2区は、第3区と第4区に比べて灌水量を制限した試験区であり、第4区はマルチシートを敷設した区の中では最も制限を加えていない試験区である。また、結果的に、第2区が最も灌水量の少ない試験区である。

図9に示された第1区～第3区の水ポテンシャルの推移によれば、マルチシート敷設後から9月初旬にかけて、徐々に水ポテンシャルが下がっていること、しかも第3区の水ポテンシャルの下がり方は第1区と第2区に比べて緩やかであることが確認できる。さらにその後も水ポテンシャルは下降を続けて10月中旬に極小となることや、10月9日の灌水作業と11月5日のマルチシート撤去に伴い、水ポテンシャルが上昇していることも分かる。一方、図9に示された第4区の結果では、水ポテンシャルの値に大きな変動はみられない。

これらのことから、シートマルチ栽培において適正な水管理を行うことで、樹木に与える水分ストレス量を制御できることが確認できる。

3.2 レッドエッジの推移

図9に示されたレッドエッジ波長の推移をみれば、

表2 収穫果実の平均糖度と水ポテンシャル及びレッドエッジ波長の変化量との関係

試験区	収穫果実の平均糖度		水ポテンシャルの変化量		レッドエッジ波長の変化量	
	[Brix 糖度]		[MPa]		[nm]	
	少着果樹	普通着果樹	少着果樹	普通着果樹	少着果樹	普通着果樹
第1区	13.6	14.6	0.87	1.09	4.49	6.24
第2区	14.0	14.2	1.50	1.35	3.04	8.45
第3区	13.1	12.8	0.84	0.85	5.15	2.12
第4区	12.0	12.5	0.12	0.08	3.95	2.36
第5区	11.4	12.6	0.32	0.36	2.56	3.66
マルチ無区	—	10.3	—	0.30	—	0.46
収穫果実の平均糖度との相関係数			0.8479 (0.8508)		0.8688 (0.6559)	

注) 収穫果実の平均糖度との相関係数は、マルチ有りの普通着果樹のみの結果を括弧記号外に、マルチ有りの少着果樹と普通着果樹をあわせた結果を括弧記号内に示している。

図9 レッドエッジ波長と水ポテンシャルの推移

図10 レッドエッジ波長と水ポテンシャルとの関係 (第1区～第5区)

本論文で使用したミカン果樹のレッドエッジの波長が、およそ709nm～719nmの間で推移していることが分かる。

特に、灌水量を制限した第1区と第2区では(3.1を参照),10月5日～15日の間にレッドエッジの波長が極小になることが確認できる。一方で、第1区と第2区に比べて灌水量をあまり制限していない第3区と第4区では(3.1を参照),レッドエッジの波長に大きな変化がないことも読み取れる。

また、前年の別の試験の影響(2.2.1を参照)と土壌の乾燥状態不良(2.2.2を参照)が有った第5区では、計測開始当初に短波長側にあったレッドエッジ波長が、台風被害が発生する9月12日頃にかけて長波長側に移動しており、9月16日の測定では第3区や第4区とほぼ同じ値(716.4nm)にまで達している。その後、レッドエッジ波長は第1区と第2区と同様のブルーシフトを起こしている。

3.3 収穫果実の平均糖度

水管理の状況(表1)と水ポテンシャルの推移(図9)によれば、第1区と第2区に強い水分ストレスがかかっている(3.1を参照)。特に第1区では既に述べたように落葉現象が生じる程であった(2.2.2を参照)。一方、第4区と第5区には大きな水分ストレスはかかっていない。

表2に示した収穫果実の平均糖度によれば、第1区と第2区で比較的に高い値が示されており(13.6Brix糖度～14.6Brix糖度)、第4区と第5区では低い値を示している(11.4Brix糖度～12.6Brix糖度)。マルチ無区に至っては、さらに低い値を示している(10.3Brix糖度)。

これらのことから、樹体にかかる水分ストレスが大きければ、収穫果実の平均糖度も上昇することが確認できる。また、表2からは、同じ試験区であっても、少着果樹(11.4Brix糖度～14.0Brix糖度)よりも普通着果樹(12.5Brix糖度～14.6Brix糖度)の方が、比較的に高い糖度の果実が得られることも読み取れる。

4. 考 察

4.1 水ポテンシャルとレッドエッジ波長との関係

シートマルチ栽培技法が適用された試験区(第1区～第5区)に着目して図9をみれば(図中の茶色、桃

色、橙色、黄色、緑色のグラフ)、それぞれの試験区におけるレッドエッジの推移と水ポテンシャルの推移の傾向が類似していることが見て取れる。特に第2区のレッドエッジの推移と水ポテンシャルの推移と、第5区の台風被害後の両者の推移は良く類似している。図10は、第1区～第5区について、レッドエッジ波長と水ポテンシャルとの関係を示したものであり、両者の相関係数は0.74であった。このことから両者の推移が良く類似していることが確認できる。

レッドエッジのブルーシフトが発生する要因としては、水分ストレス以外に日照や樹容積、着葉量、肥培管理と樹木の栄養状態など、いくつもの条件をあげることができる。樹容積が大きく着葉数が多ければ、葉からの蒸散量が増すこととなり、灌水量が同じであっても早く水分欠乏状態に陥ることとなる。また、着果量が多ければ、それらの果実を生育するために樹体が多量の水分などを必要とする。

図3によれば、第2区と第5区の普通着果樹の樹容積は、それぞれ4.62m³と5.14m³であり、第1区と第4区と同様の値(3.70m³と3.86m³)に比べて大きい。このため、第2区と第5区では葉からの蒸散量が多く、レッドエッジ波長の推移が水ポテンシャルの推移に良く類似したと考えられる。

一方、図9に示された第3区の結果では(図中の橙色のグラフ)、10月中旬に水ポテンシャルが大きく下降しているのに対して、レッドエッジの波長には大きな変化が見られない。このことについては、後述の収穫果実との平均糖度との関係で考察する。

4.2 灌水に対する樹木の反応

まず、図9に示された第2区の結果に着目して考える(図中の桃色のグラフ)。表2によれば9月8日に灌水作業が実施されている。9月16日の測定では水ポテンシャルが上昇し、続く9月25日の測定では水ポテンシャルが下降しているのに対し、レッドエッジの波長が長波長側に戻っている。

次に、第5区に着目する(図9中の緑色のグラフ)。9月12日、第5区では台風被害によりに雨水が侵入している(2.2.2を参照)。第5区でも、9月16日と25日の測定において、前述の第2区と同様の水ポテンシャルとレッドエッジ波長の動きがみられる。

これらのことから、レッドエッジの波長は水ポテンシャルに似た推移を示すが、灌水に対して水ポテン

シャルは比較的早い応答を示し、レッドエッジの波長は水ポテンシャルに比べて遅い応答を示すことが理解できる。

4.3 マルチ無区

図9に示されたマルチ無区の結果では（図中の青色のグラフ）、シートマルチ栽培が適用された他の試験区に比べて、水ポテンシャルの推移とレッドエッジ波長の推移の傾向が類似していない。

本論文での測定は10日間隔を目安に実施したが、屋外での実験ということも有り、結果的に雨天時の測定は避けて実施した。また、水ポテンシャルとレッドエッジの波長とでは、灌水に対する応答の速さが異なることを既に述べた（4.2を参照）。

このため、水ポテンシャルは9月中旬から10月にかけての好天の影響を強く受けてマイナス側に移動し、レッドエッジの波長は降水や朝露などの影響を保持してしまい長波長側に移動したと推察される（2.1と図1を参照）。

4.4 分光反射率の一次微分特性の変化

図11は、第2区とマルチ無区を例として、分光反射率の一次微分特性の一部を示したものである。

図9に示した第2区の水ポテンシャルの推移によれば（図9中の桃色のグラフ）、8月5日の時点では未だ十分な水分ストレスがかかっていなかったが（水ポテンシャルの値は -0.78MPa ）、その後徐々に水ポテンシャルが下降し、10月6日の時点では強い水分ストレスがかかっている（同値は -2.22MPa ）。また、マルチシート撤去後（表1）の11月11日には水ポテンシャルが -1.02MPa まで上昇し、水分ストレスが軽減されたことが分かる。

十分な水分ストレスがかかっていなかった時（図11(a)中に桃色で示した特性）、その一次分特性は、全体的になだらかな山状の形で、どちらかと言えば長波長側（720nm付近）に極大部が現れるような特性を示している。水分ストレスが徐々に増大した時には（図11(a)中の橙色と黄色）、極大部となる波長が短波長側（700nm付近）に移動していることが分かる。さらに、強い水分ストレスがかかっている時には（図11(a)中の緑色と青色）、極大部への立ち上がりさがさらに急峻な特性へと変化していることも読み取れる。また、水分ストレスが軽減された後では（図11(a)中の紫色）は、700nm付

近で現れていた極大部への立ち上がり方が小さくなるとともに、長波長側（720nm付近）の極大部も現れ始めていることが分かる。

一方、マルチ無区の同様の一次微分特性の例を示した図11(b)を見てみれば、これらの特性は全体的になだらかであるか、あるいは長波長側（720nm付近）に極大部があることが分かる。この図は、第2区の水分ストレス増大期と水分ストレス最大期に一致する観測日のものであるが、その特徴は、第2区での十分な水分ストレスがかかっていない時期の特性（図11(a)中の桃色）に類似している。

なお、図11によれば、樹木が受ける水分ストレスが変化しても、一次微分の値が0となる波長（2.3.2で述べた λ_s と λ_e ）に大きな変化はみられず、おおよそ670nmと760nmである。

これらのことから、本論文で使用したミカン緑葉の分光反射率の一次微分特性は、波長がおおよそ670nm～760nmの範囲で正となり、700nmあるいは720nm付近に極大部を持つ特性を示し、樹木が受けた水分ストレスによってその2つの極大部の発現性が変化していると推察される。

4.5 レッドエッジ波長のばらつき

図12は、平均の分光反射率ではなく、個々の試験葉の分光反射率から一次微分特性を求め、試験葉毎にレッドエッジ波長の検出を試みた結果であり、例として第2区の普通着果樹のものを示している。なお、図12中のL01～L05は5枚の試験葉の区別を表しており、さらに比較のため図9で示したレッドエッジ波長の推移（図9中の桃色）も同時に示している。

図12によれば、試験葉毎のレッドエッジ波長は、第2区の平均のレッドエッジ波長に対してばらつきを持っていることが分かる。水ポテンシャルは、日照の影響や、気孔が閉じて蒸散の影響が無くなる深夜に測定される。深夜にはこれらの影響が無くなることから、樹体内の水分が多く、葉に均等に行き渡り、測定値のばらつきが抑えられる。しかし、緑葉の分光反射率の計測では、葉色を決定付けるクロロフィルや、葉の構造の関与が大きい（寺島，1999）。緑葉中に含まれるクロロフィル量や、葉の厚みなどの構造は、樹木の栄養状態や日照状態、水分ストレスなど、幾つかの条件を履歴として蓄積していると考えられる（蔡，2002）。このため、緑葉個々の分光特性が微妙に異なり、レッド

図11 緑葉の分光反射率の一次微分値の例

注) L01～L05は、測定に用いた5枚の試験葉の別を示す。
 平均値は分光反射率の平均値から求めたレッドエッジ波長を示す。

図12 緑葉毎のレッドエッジ波長の推移の例 (第2区)

エッジ波長にばらつきが発生したと考えられる。

このレッドエッジ波長のばらつきの影響を軽減するには、統計的にみて充分な数の試験葉をランダムに選択して計測することや、葉一枚一枚ではなく樹冠全体を一度に計測することなど、今後、測定方法に工夫が必要である。

一方、水ポテンシャルとレッドエッジ波長との間に

良い相関性があったことを考慮すれば (4.1を参照)、本論文でのレッドエッジ波長の検出方法が有効であったことが理解できるが、与えられた水分ストレスの変化に応じて、分光反射率の一次微分特性に特徴的な変化も見受けられる (4.4を参照)。従って、レッドエッジ波長のばらつきの影響を軽減するには、このような変化の特徴を活用した測定手法の開発も必要と考えら

れる。また、日照条件や同一梢における着果の有無などがレッドエッジ波長の変化に与える影響を調べ、水分ストレスの変化に対して敏感な場所の緑葉を試験葉として選ぶことも重要である。

4.6 栽培条件と収穫果実の平均糖度との関係

表2の水ポテンシャルの変化量とレッドエッジ波長の変化量は、各試験区のそれぞれの最小値と、測定期間中のマルチ無区のそれぞれの平均値との差を示しており、栽培期間中に樹木が受けた水分ストレス量の目安である。図13は、収穫果実の平均糖度と、水ポテンシャルの変化量またはレッドエッジ波長の変化量との関係を示しており、相関係数は表2の下欄に示している。なお、図13(a)は第1区～第5区の普通着果樹、同(b)は同じく普通着果樹と少着果樹をあわせた結果である。

図13から、収穫果実の平均糖度は、水ポテンシャルの変化量、およびレッドエッジ波長の変化量の両方に対して正の相関性を持つことが分かる。着果量の違い(普通着果樹と少着果樹)に着目して表2を見れば、収穫果実の平均糖度と水ポテンシャルの変化量との相関係数は0.85程度、収穫果実の平均糖度とレッドエッジ波長の変化量との相関係数は0.65～0.86となり、水ポテンシャルの方が着果量の変化に対して安定した相関性を保っている。

しかし、例えば、第3区の普通着果樹と少着果樹を比較すれば、水ポテンシャルの変化量はそれぞれ0.85MPaと0.84MPa、レッドエッジ波長の変化量は2.12nmと5.15nmであり、収穫果実の平均糖度は12.8Brix糖度と13.1Brix糖度である。水ポテンシャルの変化量

に大差は無いが、レッドエッジ波長の変化量の違いが果実糖度の高さの違いを正しく表している。同様に第2区の場合も、1.35MPaと1.50MPa、8.45nmと3.04nm、14.2Brix糖度と14.0Brix糖度であり、レッドエッジ波長の変化量の違いが果実糖度の高さの違いを正しく表している。

また、特に第3区では、10月中旬に水ポテンシャルが大きく下降しているにもかかわらず、レッドエッジ波長に大きな変化が見られなかった(4.1と図9中の橙色のグラフを参照)。表2によれば、水ポテンシャルの変化量は0.85MPaであり、第4区や第5区のそれ(0.08MPa～0.36MPa)よりも、どちらかと言えば第1区や第2区のそれ(1.09MPa～1.35MPa)に近い。しかし、第3区の収穫果実の平均糖度は12.8Brix糖度であり、第4区や第5区の平均糖度(12.5Brix糖度～12.6Brix糖度)に近い。レッドエッジ波長の変化量については、第3区は2.12nmであり、第1区や第2区のそれ(6.24nm～8.45nm)よりも、第4区や第5区のそれ(2.36nm～3.66nm)に近い。

果実への糖の集積は樹木が受けた水分ストレスの履歴であり、レッドエッジも同じくその履歴を情報として蓄えていると考えられる。従って、レッドエッジ波長の変化量も収穫果実の平均糖度を予測するのに有効な情報である。

5. おわりに

本論文では、樹体にかかる水分ストレス量を変化させた試験圃場において、果実生育期間中の2003年7月から11月にかけて、レッドエッジ波長の推移と、植物

図13 収穫果実の平均糖度と水ポテンシャル及びレッドエッジ波長の変化量との関係

の水分ストレス量を定量する方法として広く用いられている水ポテンシャルの推移を調査した。この結果、農業現場での通常のミカン栽培においてもレッドエッジのブルーシフトが観測されることを確認した。さらに、シートマルチ栽培技法が適用されていれば、レッドエッジ波長の推移は水ポテンシャルの推移と同じ傾向を示すことも確認した。また、この場合、灌水に対するレッドエッジ波長の応答は、水ポテンシャルのそれよりも遅いことも分かった。

さらに、収穫果実の平均糖度との関係を調べた結果、果実糖度はレッドエッジ波長の変化量との間にも高い相関性を持つことが分かった。また、水ポテンシャルの変化量が大さいにもかかわらずレッドエッジ波長の変化量が小さい場合、収穫果実の平均糖度も比較的に低い値を示すことが確認された。このことは、レッドエッジ波長の変化量が収穫果実の平均糖度を予測するのに有益であることを意味している。しかし一方で、樹体の栄養状態や樹容積などの個体差がレッドエッジ波長の推移に影響をおよぼすことや、同じ木に付いている葉であっても個々にレッドエッジの波長が異なることなどのため、レッドエッジ波長と水ポテンシャルとの関係を一意に決定付けられる段階までには至っていない。

また、本論文で使用した試験木の分光反射率の一次微分特性は、700nmと720nmにピークをもつ特性が重ね合わさったような様相を呈していることが分かった。今後はこの特性の動きを検証し、樹木にかかる水分ストレスを見極める方法を確立することが課題である。さらに、試験葉の選択方法や分光特性の測定方法など、水分ストレスを感度良く推定できる調査手法の開発なども行い、この技術を収穫果実の糖度推定や果樹の水管理などに活用することも検討する予定である。

(受付日2004.5.10, 受理日2004.9.10)

参考文献

- Paul J. Curran, W. Robert Windham, Henry L. Gholz, 1995. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll concentration in slash pine leaves, *Tree Physiology*, 15(3), pp.203-206.
- パサリブ・ドニトソン・パハラ, 安田嘉純, 栗屋善雄,

齊藤元也, 前里 卓, 小熊宏之, 1996. レッドエッジの微分スペクトルによる森林の解析, 日本写真測量学会学術講演会論文集, pp.205-210.

中里一郎, 松永茂治, 岸野 功, 1996. ウンシュウ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, 長崎県果樹試験場研究報告, 3, pp.1-10.

Hartmut K. Lichtenthaler, Anatoly Gitelson, Michael Lang, 1996. Non-Destructive Determination of Chlorophyll Content of Leaves of a Green and an Aurea Mutant of Tobacco by Reflectance Measurements, *J. Plant Physiology*, 148, pp.483-493.

神田英司, 1997. 水稻生育ステージを特徴づける波長域とレッドエッジシフト, 東北農業研究成果情報, pp.31-32.

中里一郎, 松永茂治, 岸野 功, 1997. ウンシュウミカンのフィルムマルチ栽培における果実肥大期の果実品質と収穫時の果実品質との関係, 長崎県果樹試験場研究報告, 4, pp.17-26.

本郷千春, 小林達明, 有田ゆり子, 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.

寺島一郎, 1999. 光環境と葉の光合成—生体生理学からの視点—, 植物の環境応答(渡邊 昭, 篠崎一雄, 寺島一郎), 秀潤社, 東京, pp.92-101.

西田顕郎, 小杉緑子, 大手信人, 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.

野並 浩, 2001. 植物水分生理学, 養賢堂, 東京, pp.236-257.

和歌山県有田振興局農林水産普及課, カンキツ調査方法, 有田みかんデータベース, <http://www.mikan.gr.jp/gijyutu/shishin/chousa.html> (accessed 13 Aug. 2002).

蔡 晃植, 2002. クロロフィル, 植物分子生理学入門(横田明穂), 大昭和印刷, 東京, pp.114-119.

長崎海洋気象台, 長崎県気象月報(2003年6月~11月), 月別・旬別の気象観測データ, http://www.nagasaki-jma.go.jp/contents/month_report.html (accessed 25 Jun. 2004).