

カンキツ類における水分生理に基づく
高品質果実生産に関する研究

2014

岩崎光徳

目次

序論	- 3 -
第 1 章 高品質果実生産のための水管理方法の検討	- 9 -
第 1 節. 早生ウンシュウミカンの乾燥ストレスが果実品質に及ぼす影響 - 9 -	
緒言	- 9 -
材料および方法	- 9 -
結果	- 11 -
考察	- 14 -
第 2 節. ‘不知火’の乾燥ストレスが果実品質に及ぼす影響	- 18 -
緒言	- 18 -
材料および方法	- 18 -
結果	- 20 -
考察	- 22 -
第 3 節. ‘はれひめ’の乾燥ストレスが果実品質に及ぼす影響	- 25 -
緒言	- 25 -
材料および方法	- 25 -
結果	- 28 -
考察	- 31 -
第 2 章 カンキツにおける TDR 水分計を用いた枝内水分測定法の開発 - 35 -	
第 1 節. TDR 枝内水分測定法の確立	- 35 -
緒言	- 35 -
材料および方法	- 36 -

結果および考察	- 40 -
第 2 節. TDR 枝内水分測定法の精度向上と自動連続モニタリング ..	- 44 -
緒言	- 45 -
材料および方法	- 45 -
結果および考察	- 48 -
第 3 章 高品質果実生産を目的とした台木育成のための選抜指標の開発	- 59 -
台木の枝内水分通導性を利用した樹冠拡大能力の早期予測法	- 59 -
緒言	- 59 -
材料および方法	- 61 -
結果	- 63 -
考察	- 68 -
総合考察	- 70 -
摘要	- 81 -
引用文献	- 87 -
発表論文リスト	- 96 -

序論

わが国のカンキツ類の中で、最も多く生産されるウンシュウミカンは、昭和 50 年の 366.5 万トンにピークに減少し続け、近年は 90 万トン前後を推移している（農林水産省，2012a）。減少の要因として、香月・高橋（1995）は、生産過剰に起因する市場価格の暴落による園地転換、オレンジの輸入自由化、果実消費の多様化、生果需要の減少、品質指向を理由に挙げている。平岡・斉藤（2010）は、消費者を対象に「カンキツの果実を購入して不満に思ったこと」について、インターネットによるアンケート調査（回答数：15,506 人）を行った結果、「甘さが足りない」が 35.0%で最も多く、全ての年代で 1 位だった。このことから、ウンシュウミカンをはじめとするカンキツ類の消費量の維持・拡大には、消費者ニーズに合わせた高糖度な果実生産が不可欠と思われる。

カンキツ類の高糖度果実生産の対策として、シートマルチ栽培の技術確立と、新しい台木品種の作出が、重要な二つの柱として考えられる（第 1，2，3 図）。前者の技術は、資材費や労働の負担があることから、先進的な生産者に限定されるが、増糖効果は高いことから、高単価で取引される良食味なブランド果実を生産することができる。一方、後者は、特別な資材や労力を必要としないことから、生産者を限定しないものの、前者に比べて増糖効果は劣ることから、糖度の底上げ技術として位置づけられる。本研究では、この二つの増糖技術について、シートマルチ栽培は、高糖度果実生産のための効果的な水管理方法の確立と、その制御技術の開発を試み、台木品種の作出については、高糖度果実生産に適した効率的な台木選抜方法の開発を行った。

シートマルチ栽培とは、樹冠下に透湿性シート等を敷設することで、根圏部への雨水の流入を制限し、樹体に乾燥ストレスを付与する方法で、ウンシュウミカンを中心に普及している。しかし、現状の水管理による乾燥ストレスの調整や付与時期は、各生産者の経験に基づいて行われ、シートマルチ栽培の効果が十分に発揮されていない園も多くみられる。そこで、第 1 章では、高品質果実生産のための効果的な水管理方法について検討した。なお、本研究の高品質果実とは、通常の栽培方法に比べて糖度が高く、

適度な酸含量と大きさの果実を示す。夏秋季の乾燥ストレスは、果汁内糖度を上昇させる効果があるが、減酸と果実肥大に対しては抑制的に作用する（間苧谷・町田，1980；中里・岸野，1999）。そこで、高品質果実生産には、乾燥ストレスが糖度を効果的に上昇させる時期や、減酸や果実肥大に影響の少ない時期を明らかにする必要がある。これまで、乾燥ストレスの効果的な時期の解明は、数多く報告されるが、詳細な関係解明に至っていない。この理由は、試験方法にいくつかの問題を抱えているからである。これまでの試験方法は、時期別に多数の異なる乾燥処理区を設け、樹体水分あるいは土壌水分と果実品質との関係を、季節推移の比較を元に推定してきた。しかし、乾燥ストレスの調整が難しいことから判然としない結果が多く、また、複数年の結果を合わせて解析することは困難なため、一般性に課題があった。Myers（1988）は、樹体に付与された連続的な乾燥ストレスを、葉内最大水ポテンシャルを用いた積算水分ストレス法（water stress integral）で積算値に変換し、マツ科の樹木の針葉の長さ、幹断面積、土壌水分欠損、針葉内窒素濃度との関係を明らかにした。カンキツの果実品質についても、連続的な乾燥ストレスの積算に影響されると考え、この方法を応用して、乾燥ストレスの効果的な時期の解明を試みた。解明には、果実発育期を細分化し、各時期の乾燥ストレスの積算値と増糖量、減酸量、肥大量との相関分析を行うことで、時期別の詳細な関係を明らかにできると考えた。また、この相関分析による方法は、複数年の結果を合わせて解析できることから、これまでの試験では困難だった一般性のある情報を得ることができると考える。供試品種には、高糖度な果実生産が望まれる早生ウンシュウミカンと中晩生カンキツ‘不知火’および‘はれひめ’を用いて、時期別の乾燥ストレスと果実品質の関係から高品質果実生産に適した水管理方法を検討した。また、‘はれひめ’については、乾燥ストレス付与による果汁内糖、有機酸、アミノ酸の各成分変化についても明らかにした。

第2章では、第1章の水管理方法に基づいた乾燥ストレスの制御を行うため、現場で簡便に乾燥ストレスを診断できる技術の開発を行った。第1章で樹体水分の指標として用いた葉内最大水ポテンシャルは、果実品質と

の関連が高いが、高額な機器と高圧ガスを使用し、深夜に測定を行う必要があることから、現場で利用することは難しい。近年、TDR (Time Domain Reflectometry) 法を用いて、樹木の枝内体積含水率（以降 VWC）を測定する方法が、内外で報告されている (Constantz and Murphy, 1990; Holbrook ら, 1992; Irvine and Grace, 1997; 小林・田中, 2001; Wullschlegel ら, 1996)。TDR 法は、物質の誘電率はその物質中の水分含量により変動することを利用し、高周波の電磁波の反射時間から誘電率を測定することで水分含量を推定する。この方法を用いて、レモンやマンゴーにおける水管理の指標技術として応用する研究も行われている (Nadler ら, 2003; Nadler ら, 2006)。TDR 法による樹木の VWC 測定は、2~3 本のステンレス製センサーロッドを幹や枝の伸長方向に沿って埋め込み、ロッド周辺の枝内水分含量の変化を捉える方法である。しかし、幹や枝にロッドを挿入することは容易でなく、取り付けたセンサーは取り外しができないことから、多点計測はできない。そこで、平岡ら (2005) は、枝にあらかじめ挿入したセンサープローブ（ステンレス製釘）を介して測定することで簡便に多点計測する方法を考案した。本研究は、この方法をカンキツに適用し、精度の向上を図るとともに、葉内最大水ポテンシャルとの関係から評価方法としての有用性を検証した。

第 3 章では、高品質果実生産に適した台木の作出について、効率的な選抜方法を検討した。主要なカンキツの生産国は、地域の環境特性や穂木品種等に合わせて台木を選択している。一方、日本のカンキツ栽培は、ほとんど半わい性のカラタチ台が用いられ、1 種類の台木への偏りは世界的にも珍しい (吉田, 1995)。そのため、普通ウンシュウミカン等の樹勢の強い穂木品種に利用した場合、栄養成長が強いことから省力的とされるコンパクトな樹形の維持は難しく、果実品質も低くなる。カンキツの台木は、果実糖度と樹冠拡大能力に関係がみられ、一般に強勢台に比べてわい性台が、糖度の高い果実を生産する (Hodgson and Eggers, 1938; 小林ら, 1995; 高原ら, 1994)。そこで、近年は、高品質化を目的にカラタチ台よりもわい化効果の高い‘ヒリュウ’を利用した研究も行われている (米本ら, 2005)。

‘ヒリュウ’は、カラタチの変異系で、枝やトゲは屈曲する特徴があり、

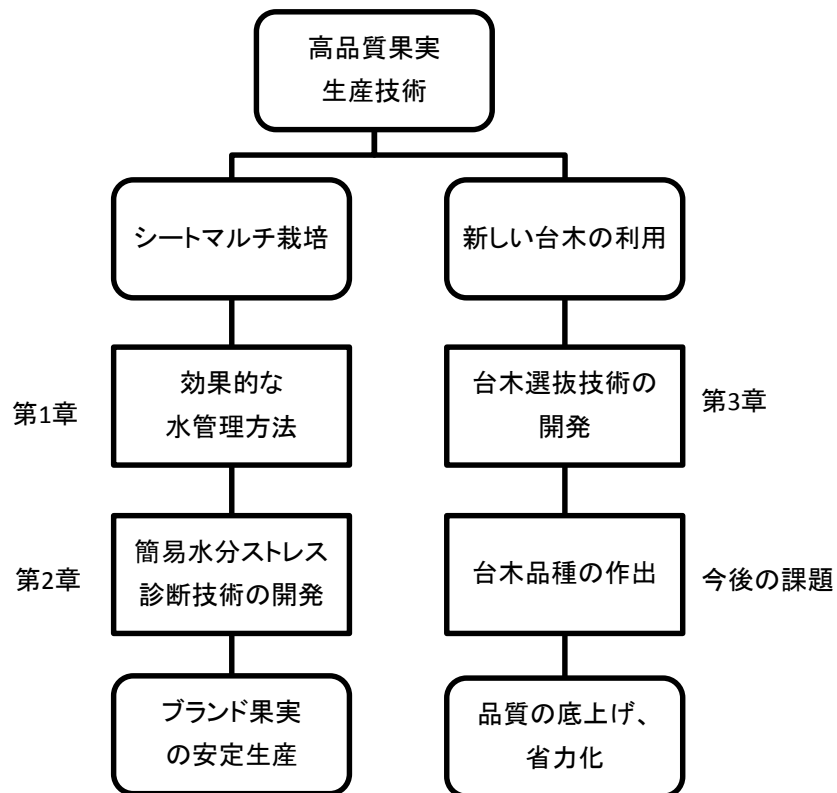
台木として利用した場合、浅根性で、乾燥ストレスが付与されやすいと考えられ、カラタチ台に比べて収穫時の果実糖度は高い傾向にある（Cantuarias-Aviles ら、2010；小林ら、1995；高原ら、1994）。しかし、‘ヒリュウ’台は、わい化効果が強いことから、生育不良や低い収量性の問題がある。そこで、穂木品種に合わせた樹勢の台木を作出することは、同時に高品質果実生産に適した台木の育成に繋がると考え、カラタチや‘ヒリュウ’とは異なる樹冠拡大能力を有する台木の作出を目標としている。交雑育種を用いた場合、交配から樹冠拡大能力を確認するまで、およそ15年以上を要し、その間、広大な圃場と多大な労力を必要とする。そのため、台木の樹冠拡大能力を早期に選抜する技術は、効率的な台木の作出にとって重要な要素技術となる。これまでは、緒方ら（1999）による、皮接ぎを用いた方法で、樹冠拡大能力の選抜を行ってきた。しかし、その選抜には皮接ぎ用苗の育成や皮接ぎの技術を要し、実生の獲得から判別までに3年以上を必要することから、検定数は多くて数十個体に限定される。有望な台木の作出には、検定個体の母数の大きさが重要であることから、選抜方法が律速要因となっている。Yonemoto ら（2004）は、カンキツにおいて、わい化効果の強い台木は、穂部の樹液流速が低いことを明らかにし、Syvertsen（1981）は、根から枝にかけての水分通導性が樹勢と関連があることを報告している。そこで、台木実生の幼苗を用いて、枝内の水分通導性を含む特性評価と、台木として利用した場合の樹冠拡大との関係を明らかにすることで、早期選抜技術として利用できる技術を検討した。

謝辞：本研究の取りまとめに当たり、御校閲と懇切丁寧なご指導を賜った京都府立大学教授本杉日野博士に対し、心から感謝の意を表す。また、絶えず御激励を賜った京都府立大学教授石井孝昭博士、直接御指導いただいた三重大大学教授奥田均博士、元果樹研究所口之津拠点高原利雄チーム長、果樹研究所口之津拠点深町浩上席、御助言を頂いた果樹研究所興津拠点吉岡照高上席、近畿中国四国農業研究センター根角博久上席、果樹研究所つくば本所業務第1科平岡潔志科長に対し衷心より感謝の意を表します。

また、種々有益な御助言と研究遂行に当たって御便宜を図って頂いた果

樹研究所長谷川美典所長，岡山大学教授森永邦久博士，果樹研究所栽培・流通利用研究領域檜村芳記領域長，果樹研究所品種育成・病虫害研究領域山田昌彦領域長，果樹研究所塩谷浩カンキツ研究調整監，研究遂行に際し多大な協力を惜しまれなかった果樹研究所口之津拠点西川芙美恵主任研究員，野中圭介研究員，今井篤研究員，果樹研究所興津拠点佐藤景子研究員の各位に深く感謝の意を表する。

さらに，果樹研究所口之津拠点業務第2科の職員には，圃場を用いた研究で御協力を得，成績の取りまとめには福田尚子女史の御協力を得た。ここに記して謝意を表する。



第1図 高品質果実生産技術の開発のフローチャート



第 2 図 シートマルチ栽培の様子



第 3 図 新しい台木作出のための
交雑実生群

第1章 高品質果実生産のための水管理方法の検討

第1節 早生ウンシュウミカンの乾燥ストレスが果実品質に及ぼす影響

緒言

早生ウンシュウミカン (*Citrus unshiu* Marcow.) は、夏秋季に乾燥ストレスを付与することで、果汁内の糖度を上昇させるが、同時に減酸や果実肥大も抑制させる（間苧谷・町田，1980；中里・岸野，1999）。そのため、増糖効果が高く、減酸や肥大に影響の少ない時期を特定することは、高品質果実生産のための水管理に重要である。しかし、これまで行われてきた乾燥ストレス処理に対する果実品質の変化を季節推移から判断する試験方法では、乾燥ストレスと果実品質の関係を、詳細に解明することが困難である。また、複数年の結果を合わせて解析することもできないことから、一般性についても課題を残す。

Myers（1988）は、水分ストレス指標の一つである葉内最大水ポテンシャル（以降 ϕ_{\max} ）を定期的に測定し、そのストレスを積算値に変換する積算水分ストレス法を提唱した。この方法は、連続的な乾燥ストレスを定量化できることから、果実品質との時期別の相関分析を行うことで、両者の関係を統計的に解析することができると考えられる。また、複数年の結果を合わせて解析できることから、一般性のある情報を得ることができる。

そこで、高糖度果実生産が望まれている早生ウンシュウミカンを用いて、時期別の積算水分ストレスと果実品質の関係解明を試みるとともに、高品質果実生産のための水管理方法を検討した。

材料および方法

1. 供試樹と処理区の作成方法

2007および2010年に、玄武岩質の埴土である果樹研究所カンキツ研究口之津拠点圃場に植栽されたカラタチ台‘原口早生’（2007年時点で17年生）を供試した。2007年は、乾燥ストレスの強度別に3つの処理区を作成し、弱乾燥区は ϕ_{\max} で $-0.4 \sim -0.7$ MPa、中乾燥区は $-0.7 \sim -0.9$ MPa、強乾燥区は

-1.0 MPaを目安に設定した。処理期間は，果実の発育期である7月6日～収穫日の11月12日までとした。2010年の処理区は，果実発育期を前半期（7月上旬～9月中旬）と後半期（9月中旬～11月上旬）に分け，乾燥ストレスの付与時期が異なる前半乾燥区と後半乾燥区を設定し，対照には湿潤区および前半期と後半期ともに乾燥ストレスを付与した通期乾燥区を設けた。水分ストレスの付与期間中の強度は， ϕ_{\max} で-0.8～-1.0 MPaを目安とし，湿潤処理期間中の灌水は約150 L／樹（降雨にして約20 mm）を週2回行った。乾燥ストレスの付与方法は，両年とも透湿性シートマルチ（タイベック，ソフトタイプ，幅3 m，デュボン社製）を樹冠下に敷設し，降雨を遮断した。灌水は，2007年は点滴灌水チューブ（ラム17，点滴孔間隔30 cm，ネタフィルム社製）を植栽列に対して平行に2列設置し，2010年は水平散水タイプの灌水資材（ミストエース20サイテキ04L-03，住化農業資材社製）を使用し，植栽列に対して平行に1列設置し行った。摘果は，両年とも7月上中旬に粗摘果，9月中下旬に仕上げ摘果を行い，収穫時の葉果比は約20に調整した。なお，肥培管理および病害虫の防除は，慣行の方法に従った。

2. 樹体水分と果実品質の調査方法

樹体水分は，Sholanderら（1964）のプレッシャーチャンバー（Model1000，PMS社製）法による ϕ_{\max} を測定した。 ϕ_{\max} は夜明け前に調査し，反復樹数と1樹当たりのサンプル数は，以下の調査項目を含め第1表にまとめた。 ϕ_{\max} の測定間隔は，週に1回程度とした。

果実品質は，果汁内Brix%，果汁内酸度および果実横径について調査した。Brix%および酸度は，酸糖度分析装置（NH-2000，堀場製作所社製）を用い

第1表 測定項目別の処理区当たりの調査樹数と1樹当たりのサンプル数

調査年	ϕ_{\max}	Brix% ^z	酸度 ^z	果実横径
	樹（葉）	樹（果）	樹（果）	樹（果）
2007	3（2）	6-7（5）	6-7（5）	3（5）
2010	3（2）	4（3）	4（3）	3（3）

^z収穫時のサンプル数は1樹当たり5果とした
項目間の調査樹は，重複するように設定した
括弧内の数値は1樹当たりのサンプル数を示す

て週1回の間隔で調査した。果実横径は、樹上にラベルした同一果実をノギスで週1回測定し、収穫時の横径が処理区内の外れ値（5%水準）と認められたサンプルは除外した。また、収穫時のみ簡易型分光色差計（NF333，日本電色工業社製）を用いて果皮色を測定し、そのサンプルはBrix%および酸度の測定に供した果実を用いた。

3. 時期別の積算水分ストレスと果実品質の算出法

月ごとの積算水分ストレスと果実品質との関係を明らかにするため、Myers（1988）の積算水分ストレス法を一部修正して用い、 $S\phi$ （ ϕ_{\max} の積算値）を以下の式を用いて算出した。

$$S\phi_x = \left| \sum \left(\frac{\phi_i + \phi_{i+1}}{2} - c \right) n \right|$$

ここで、 x は対象期間、 i は期間前の最終測定日のデータ、 c は測定期間中の灌水処理樹の ϕ_{\max} （7～9月は-0.4 MPaとし、10月以降は期間中の湿潤区または弱ストレス区の平均値を使用した）、 n は i から $i+1$ までの測定間隔日数を示す。

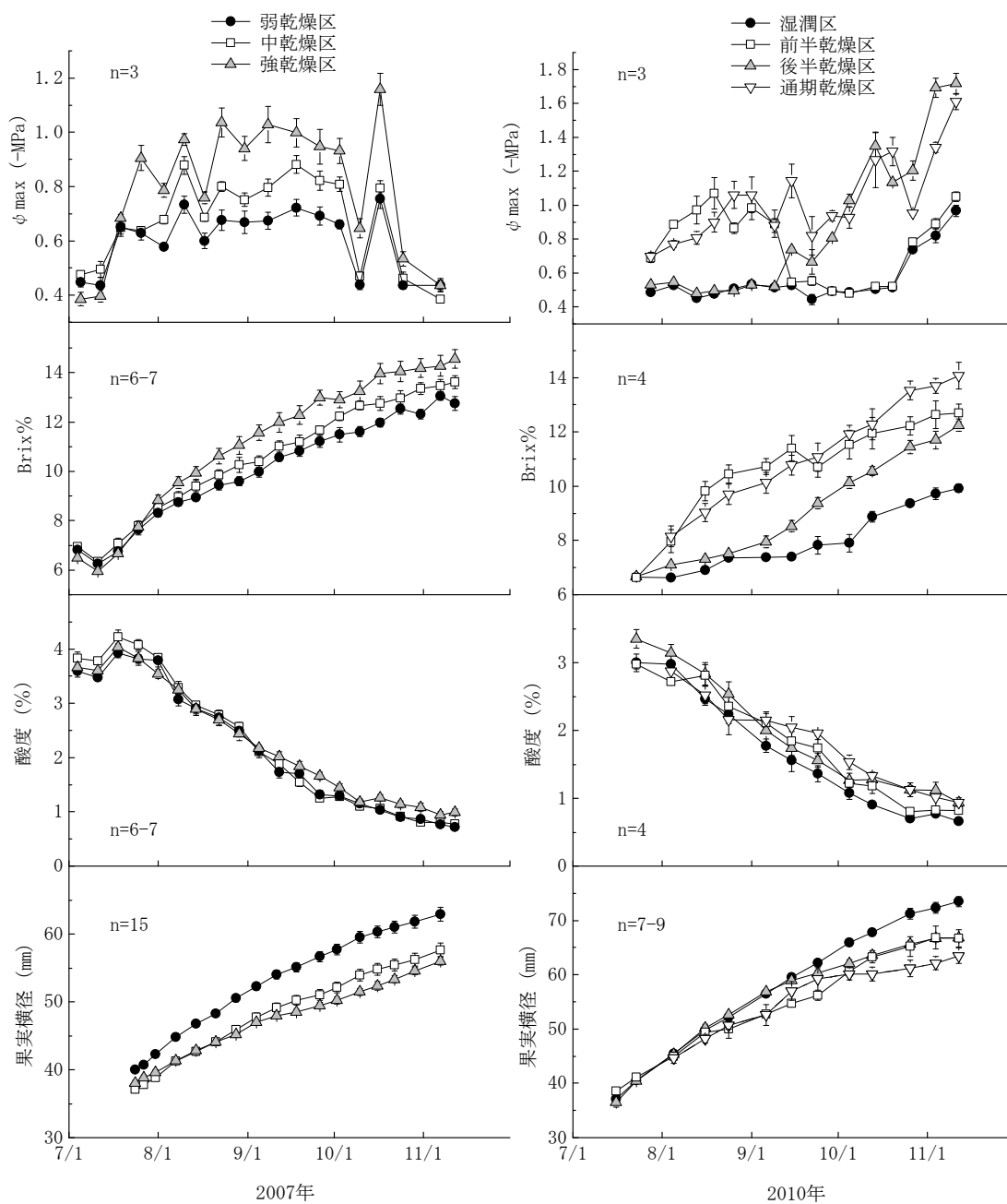
果実品質のBrix%、酸度および果実横径の期間増減量は、対象期間の初めと終わりの値をその前後の測定値より推定し、それらを減ずることにより算出した。

なお、積算水分ストレスと果実品質の相関分析は、測定項目が重複する樹のデータを使用し、統計処理は統計ソフト（JMP ver.5.0.1a, SAS Institute Inc.）を用いて行った。

結果

1. 水分ストレスによる果実品質の推移と収穫期の果実品質

2007年に行った果実発育期の強度別水分ストレスは、 ϕ_{\max} で7月下旬～10月上旬まで概ね-0.6，-0.8および-1.0 MPaに維持された（第4図，2007年）。Brix%は、 ϕ_{\max} に差が生じた約1週間後の8月上旬より処理区間に差が生じ、10月以降はほぼ平行に推移し、収穫期には強乾燥区が弱乾燥区に比べて



第4図 ウンシュウミカンの時期別・強度別の水分ストレスが果実品質に及ぼす影響
図中の縦棒は標準誤差を示す

1.8度高くなった（第2表，2007年）。酸度は，強乾燥区が弱乾燥区に比べて9月中旬以降高く推移し，収穫期には0.27%高くなった。果実横径は，7月下旬以降弱乾燥区が他の処理区に比べ大きく推移し，収穫期の果実は他の処

理区に比べて5.2～6.9 mm大きく，果実重も9～28 g重かった。収穫期の果皮色（a*）は，強乾燥区が弱乾燥区に対して紅色の濃い果実となった。

2010年に行った時期別の乾燥ストレスについて，湿潤区の ϕ_{\max} は7月下旬～10月下旬まで約-0.5 MPaで推移し，その後は低下し，収穫期には約-1.0 MPaとなった（第4図，2010年）。一方，前半乾燥区は7月下旬～9月中旬まで-0.7～-1.1 MPaで推移し，その後は湿潤区と同程度に推移した。後半乾燥区は，9月中旬以降湿潤区と差が生じ，収穫期まで0.2～0.9 MPa低い値で推移した。通期乾燥区は，7月下旬～収穫期まで湿潤区に比べて0.2～0.8 MPa低い値で推移した。Brix%は，乾燥ストレスの付与時期に対応して上昇し，収穫期のBrix%は湿潤区に比べて通期乾燥区が4.2度高く，前半乾燥区と後半乾燥区はそれぞれ2.8および2.4度高かった（第2表，2010年）。酸度は，湿潤区が果実発育期間を通して低く推移し，収穫期の湿潤区は後半乾燥区および通期乾燥区に比べて0.28%低かった。果実横径の肥大は，処理区の乾燥ストレス付与期間に対応して湿潤区に比べ鈍化し，収穫期には湿潤区が他の処理区に比べ6.7～10.0 mm大きくなった。収穫期の果皮色は，湿潤区が他の処理区に比べ紅色の薄い果実となった。

第2表 ウンシュウミカンにおける時期別・強度別の水分ストレスが収穫時の果実品質に及ぼす影響

処理区	果実重 (g)	果実横径 (mm)	Brix%	酸度 (%)	果皮色 (a*)
2007 弱乾燥区	99.0 a ^z	62.9 a	12.8 b	0.75 b	22.20 b
中乾燥区	89.6 b	57.7 b	13.6 ab	0.84 b	24.38 a
強乾燥区	71.5 c	56.0 b	14.6 a	1.02 a	24.67 a
2010 湿潤区	119.0 a	73.5 a	9.9 c	0.66 b	22.24 b
前半乾燥区	106.0 b	66.7 bc	12.7 b	0.82 ab	24.78 a
後半乾燥区	107.6 b	66.8 b	12.3 b	0.94 a	25.54 a
通期乾燥区	101.8 c	63.5 c	14.1 a	0.94 a	26.79 a

^z異なるアルファベットはTukey-Kramerの多重検定により5%水準で有意差あり

反復数は第2表の反復樹に対応し，果実重と果皮色はBrix%と酸度に供した果実を用いた
 収穫日 2007年：11月12日，2010年：11月12日

2. 時期別の水分ストレスと果実品質の相関関係

S ϕ は，7月中旬～9月の間，月増糖量と正の相関，月肥大量と負の相関があった（第3表）。月減酸量との間には，相関はみられなかった。

第3表 ウンシュウミカンにおける月別の積算水分ストレスと果実品質の相関関係

期間 ^z		月増糖量	月減酸量	月肥大量
7月中下旬	$S\phi_7$	0.719 ** (n=12)	-0.278 (n=12)	-0.860 ** (n=10)
8月	$S\phi_8$	0.782 ** (n=24)	0.073 (n=24)	-0.859 ** (n=19)
9月	$S\phi_9$	0.560 ** (n=24)	0.106 (n=24)	-0.702 ** (n=19)
10月以降	$S\phi_{10-}$	0.198 (n=24)	-0.459 (n=24)	-0.449 (n=19)

表中の値はPearsonの直線回帰式による相関係数を示し、*は5%、**は1%水準で有意である

^z7月中下旬は2007年のデータ、8、9および10月以降は2007年と2010年のデータを使用

考察

1. 積算水分ストレスによる時期別の乾燥ストレスと果実品質の関係

時期別に積算水分ストレスと果実品質との関係を解析した結果、 $S\phi$ は7月中旬～9月で増糖量と肥大量との間に有意な相関が認められた。これは、乾燥ストレスの積算に対して果実品質が変化することを意味し、従来の試験で判然としなかった果実品質に影響する乾燥ストレスの時期を特定することができた。また、2007年と2010年の結果を合わせた解析で相関関係が認められたことから、一般性のある情報として利用できると考えられる。一方、減酸量との関係については、有意な相関は認められなかった。これは、乾燥ストレスによる変化量の大きさと果実間のサンプル誤差が関係していると考えられる。相関係数が明確に表われる増糖量の場合は、乾燥ストレスによる1か月当たりの変化量が最大で約2度程度に対して、果実間の標準誤差は約0.2度である。一方、減酸量の同変化量は最大で約0.2%に対して、果実間の標準誤差は、約0.1%である。つまり、サンプル果実間の標準誤差に対して乾燥ストレスによる変化量の大きい糖度の場合は、相関関係が明確に表われるのに対して、酸は果実間の標準誤差と比べて乾燥ストレスの変化量が小さいため、乾燥ストレスの影響がマスキングされる。よって、酸のような形質は、相関係数が中程度の場合でも、乾燥ストレスによる影響がある可能性は高いと考えられる。

糖度について、2010年の後半乾燥区は、10月以降についても上昇することが季節推移から確認されるが、積算水分ストレスによる増糖量との相関はみ

られなかった。そこで、2007年と2010年の積算水分ストレスと増糖量との相関分析を別々に行ったところ、2010年の相関係数は0.753で有意な相関が認められたのに対して、2007年は相関が無かった。これは、2007年の処理区に長期間の乾燥ストレスを付与したことが要因であると考えられる。予備試験で、 ϕ_{max} を-1.0 MPaに維持した場合、見かけの光合成速度は2～5割低下することを確認していることから、同化産物の減少によって増糖効果が表われなかったと推察される。よって、早生ウンシュウミカンの果実発育期間中の乾燥ストレスは増糖効果があると考えられる。

増糖効果の強度は、積算水分ストレスと月増糖量との回帰直線の傾きとして表われ、二つの回帰直線の傾きの検定（川端，1978）より統計的に強弱を判別できる。7月中下旬～10月以降（10月以降のデータは2010年のみを利用）の $S\phi$ と増糖量の回帰直線の傾きを検定した結果、7月中下旬と8月の回帰直線の傾きは、10月の傾きに比べ有意に高かった。このことから、果実発育期の前半の方が増糖効果は高いことが認められる。

果実肥大との関係について、10月以降に積算水分ストレスとの相関は認められなかったが、第4図-2010の各区の果実横径の推移は、乾燥ストレスに対応関係があると推量される。そこで、2007年と2010年の相関分析を別々に行ったところ、2010年は、相関係数は-0.73で有意な相関がみられたが、2007年に相関関係は認められなかった。これには二つの要因があると考えられる。一つは、乾燥ストレス中あるいはストレス後の果実が、灌水や降雨によって急激に肥大することがあり（間苧谷・町田，1977），このようなサンプルを含む場合は、相関図のプロットが乱れることで相関係数は低下する。二つ目は、果実肥大は、日射量や果実周辺部の温度によって肥大速度が異なることから（富永・大東，1982；宇都宮ら，1982），複数年の結果を解析した場合は、年毎で異なる直線性を示す可能性があり、相関係数が低下することが考えられる。つまり、2007年は10月下旬以降に湿潤状態となったことから、中乾燥区と強乾燥区の肥大が促進されたこと、2007年の弱乾燥区の10月から11月12日までの肥大量が6 mmに対して、2010年の同様の条件である湿潤区は9 mmだったことが要因と考えられる。

以上のことから、積算水分ストレスを用いて果実品質との相関分析を行う

場合、対象とする形質の特性を把握した上で利用する必要があるが、最も重要な糖度との関係については、明確にすることができる。

2. 早生ウンシュウミカンにおける水分ストレスが果実品質に及ぼす影響

ウンシュウミカンの乾燥ストレスの付与時期について、居石・新堂(1996)は8～9月にpFで2.7程度、坂本ら(2000)は極早生ウンシュウミカンで8月上旬～9月上旬にpF2.5～2.7程度とすることにより、糖度が向上すると報告している。本研究では、積算水分ストレスより7月中旬～収穫まで増糖効果は認められ、7月中旬～8月は10月以降に比べて増糖効果が高かった。これにより、今まで判然としなかった乾燥ストレスの効果的な時期が明らかとなった。乾燥ストレスの強度について、貝原ら(2006)は、根域制限栽培の極早生ウンシュウミカン‘上野早生’で、7月中下旬以降の ϕ_{max} を-1.0 MPaに維持することで、収穫時のBrix%が12度以上になることを報告している。本研究においても、2007年の ϕ_{max} を-1.0 MPaに維持した強ストレス区のBrix%は、他の処理区に比べ明らかに上昇した。しかし、予備試験として夏場の ϕ_{max} を-1.2 MPaに維持した樹は、落葉が一部でみられたことから、樹体に与えるダメージを考慮すると-1.0 MPaを乾燥ストレスの上限とすることが適当であると考えられる。

ウンシュウミカン果実の酸含量は、9月を境に、分解よりも生成が多い集積過程から、生成よりも分解が多くなる減少過程に転換し(久保田ら, 1972; 坂本・奥地, 1970; 沢村ら, 1973), 土壌の乾燥による酸濃度の高い果実は、果肉中の酸代謝の抑制と果肉肥大成長の抑制による濃縮によって生じる(坂本・奥地, 1970)。本研究の積算水分ストレスと減酸量との相関関係は認められなかったが、2007年の強乾燥区は9月中旬以降より弱乾燥区と差が生じ、2010年の後半乾燥区は通期乾燥区と同程度の高酸果実となった(第4図, 第2表)。このことから、9月以降の酸の転換時期以降に与える乾燥ストレスは、酸の代謝抑制と果肉肥大抑制によって収穫時の果実を高酸にすると推察される。

果実肥大について、貝原・新堂(2006)は極早生ウンシュウミカン‘上野早生’において、7～9月の間で ϕ_{max} の平均値と日肥大量に相関が高いこと

を明らかにしている。本研究においても同様に、 $S\phi$ は7～9月の間で月肥大量と負の相関があった。また、前述のように10月以降についても、2010年の結果より、相関が認められることから、果実発育期間中の乾燥ストレスは、果実肥大を抑制すると考えられる。

宮本・前田（2008）は、早生ウンシュウミカンの果実発育期を、Ⅰ：満開後70～105日、Ⅱ：同105～125日およびⅢ：同125～190日の3相に分け、現場の高品質果実を生産している園地は、Ⅰ相で糖度を上昇させ、Ⅱ相で停滞から微減、Ⅲ相で再び上昇することを報告している。これを本研究の結果と合わせると、Ⅰ相は7月中旬～8月中下旬で、増糖効果が高いことから、乾燥ストレスを付与する期間、Ⅱ相は8月下旬～9月中下旬で、減酸を促すとともに肥大を促進するために乾燥ストレスを弱める期間、Ⅲ相は10月～収穫期で、糖度と酸度を目標に近づけるために乾燥ストレスを調整する期間と捉えられ、一般に高品質果実といわれる高糖度で適度な酸の中玉果を作る合理的な方法と推論される。

以上より、積算水分ストレス法を用いて、高品質果実生産に対する月別の乾燥ストレスの効果を量的に解明できた。これにより、目標とする果実品質に合わせた効果的な水管理を行うことが可能になると考えられる。

第2節．‘不知火’の乾燥ストレスが果実品質に及ぼす影響

緒言

‘不知火’（‘清見’（*Citrus unshiu* Marcow. × *C. sinensis* (L) Osbeck）× ‘中野3号ポンカン’（*C. reticulata* Blanco））は、（独）農業・食品産業技術総合研究機構果樹研究所で育成された中晩生カンキツ品種で、平成22年の出荷量は、中晩生カンキツの中ではイヨカンに次ぐ第2位の約4万2千トンである（農林水産省、2012b）。糖度13度以上で酸度1.0%以下の品質基準に適合する果実は、‘デコポン’の名称を用いて高価格で販売され、大玉な果実ほど商品性が高い。この品質に適合する果実を生産するため、果実の糖度、酸度および果実肥大と関係のある乾燥ストレスの影響を時期別に解明することは重要である。また、近年の露地栽培は、収穫直前の水腐れ症、鳥害、寒害等を回避する目的で、通常の実期である2月中旬～3月上旬より早期に収穫されることが多い。そのため、果実の糖の蓄積は十分ではなく、‘デコポン’の品質基準に満たない低品質の果実が散見される。そこで、積算水分ストレス法を用いて時期別の水分ストレスと果実品質の関係を明らかにし、‘デコポン’の基準に適合する水管理方法を検討する。

材料および方法

1. 供試樹と処理区の作成方法

2008、2009 および 2010 年に、果樹研究所口之津拠点植栽の9年生カラタチ台‘不知火’（2008年時点）を供試した。2008年は、10月～収穫期に乾燥処理を行った秋冬乾燥区と、対照の湿潤区を設定した。2009年は、8～9月に乾燥処理を行った夏乾燥区、8～11月に乾燥処理を行った夏秋乾燥区および対照に湿潤区を設定した。2010年は、8月に乾燥処理を行った8月乾燥区、1月～収穫期まで乾燥処理を行った冬乾燥区および対照に湿潤区を設定した。乾燥ストレスの付与方法は、いずれの年も第1節のウンシュウミカンと同様にシートマルチによる方法を用いて行い、傾斜によって根圏部に雨水の流入がみられる植列は明渠を作成した。灌水は、水平散水式の灌水チューブ（ミストエース 20 サイテキ 04L-03、住化農業資材社製）

を植栽列に対して2列設置し行った。湿潤処理期間中の灌水は、約150 L／樹（降雨にして約20 mm）を夏秋季は週2～3回、冬季は週1回の間隔で行い、乾燥処理期間中の水分ストレスの強度は、湿潤区に比べ葉内最大水ポテンシャル（以降 ϕ_{\max} ）で0.2～0.5 MPa低い水準を目安に設定した。摘果はいずれの年も6月下旬～7月上旬に行い、収穫時の果実は樹冠容積で1 m³当たり11～13果（葉果比にして100程度）とした。

ϕ_{\max} はプレッシャーチャンバー（Model 1000, PMS社製）を用いて測定し、処理区当たりの調査樹数と1樹当たりのサンプル数は、以下の測定項目を含めて第4表にまとめた。測定間隔は、週に1回とした。

第4表 測定項目別の処理区当たりの調査樹数と1樹当たりのサンプル数

調査年	ϕ_{\max}	Brix% ^z	酸度 ^z	果実横径
	樹（葉）	樹（果）	樹（果）	樹（果）
2008	3（2）	4（2）	4（2）	4（3）
2009	4（2）	8（2）	8（2）	4（3）
2010	4（2）	6（2）	6（2）	6（3）

^z収穫時のサンプル数は1樹当たり5果とした

項目間の調査樹は、重複するように設定した

括弧内の数値は1樹当たりのサンプル数を示す

果実品質は、果汁Brix%，果汁酸度および果実横径について調査した。Brix%および酸度は、酸糖度分析装置（NH-2000，堀場製作所社製）を用いて週1回の間隔で調査した。果実横径は、樹上にラベルした同一果実をノギスで週1回測定し、収穫時の横径が処理区内の外れ値（5%水準）と認められたサンプルは除外した。また、収穫時のみ簡易型分光色差計（NF333，日本電色工業社製）を用いて果皮色を測定し、そのサンプルはBrix%および酸度の測定に供した果実を用いた。

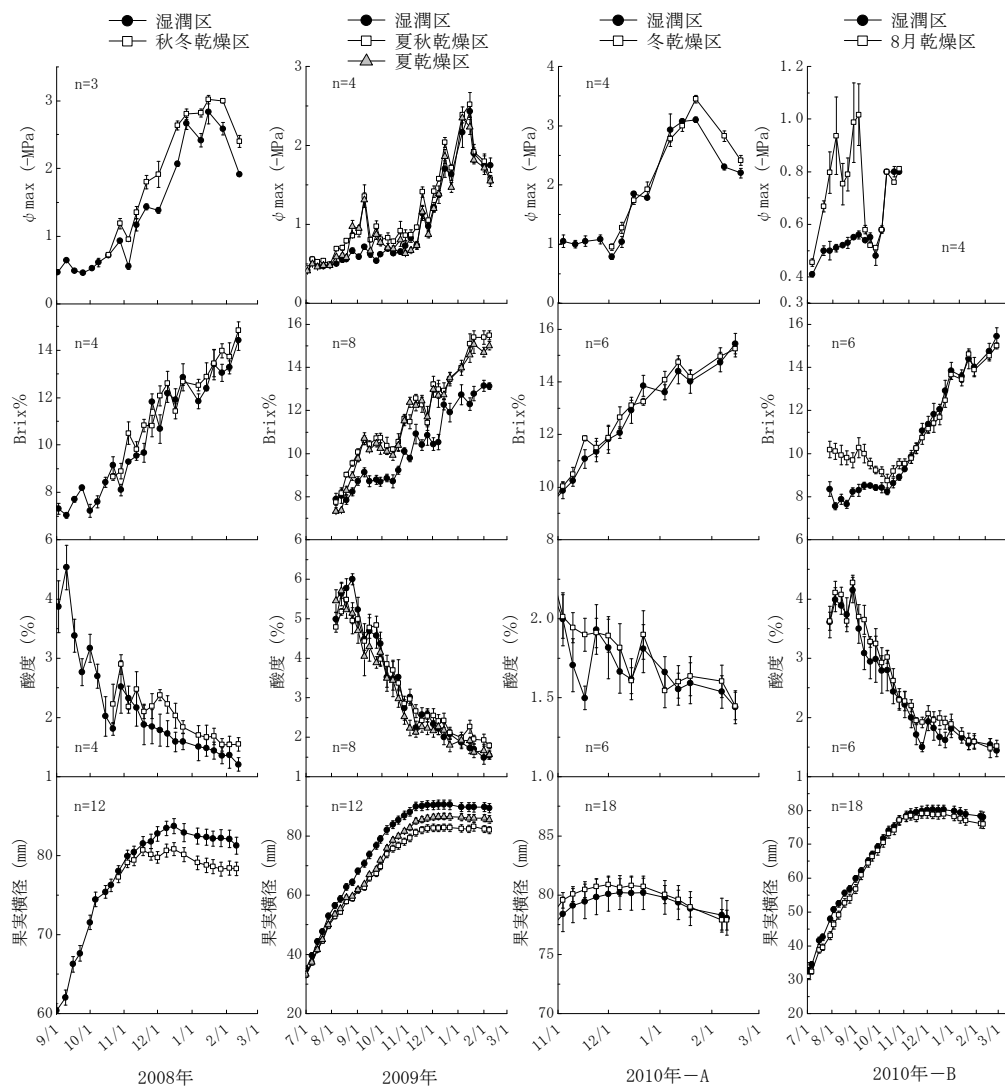
2. 時期別の積算水分ストレスと果実品質の算出法

積算水分ストレスと果実品質との関係を明らかにするため、Myers(1988)の積算水分ストレス法を一部修正して用い、 ϕ_{\max} を積算水分ストレス値（ $S\phi$ ）に変換し、8月から収穫期までを2か月間隔で果実品質との相関分析を行った（第1節参照）。

結果

1. 水分ストレスによる果実品質の推移と収穫期の果実品質

秋冬乾燥区の ϕ_{\max} は、湿潤区に比べ10月下旬以降0.2～0.6 MPa低い値を推移した（第5図，2008年）。Brix%は、果実発育期間中および収穫期の処理区間に差は認められなかった（第5表，2008年）。酸度は、12月上旬から秋冬乾燥区が高く推移し、収穫期は湿潤区に比べて0.34%高かった。果実横



第5図 ‘不知火’の時期別の水分ストレスが果実品質に及ぼす影響

図中の縦棒は標準誤差を示す

2010年は、乾燥処理時期が異なるためグラフを分別した

径は，湿潤区が12月中旬まで肥大したが，秋冬乾燥区は11月中旬に肥大が停止したことから，収穫期には3.0 mm小さかった。

夏秋乾燥区の ϕ maxは，8月上旬～11月中旬まで湿潤区に比べて0.2～0.6 MPa低く推移し，夏乾燥区は8月下旬～9月下旬まで0.2～0.6 MPa低く推移した（第5図，2009年）。Brix%は，湿潤区に比べて夏秋乾燥区は8月中旬～9月中旬の間増加，夏乾燥区は8月下旬～9月中旬の間増加し，その差は収穫期まで縮まらなかった。収穫期のBrix%は，湿潤区に比べて夏秋乾燥区で2.4度，夏乾燥区で1.9度高かった（第5表，2009年）。酸度は，夏秋乾燥区が湿潤区に比べて12月中旬以降高く推移し，収穫期で0.25%高かった。果実横径は，夏秋乾燥区と夏乾燥区が湿潤区に比べて8月中旬以降低く推移し，さらに10月中旬以降は夏秋乾燥区が夏乾燥区に比べて低く推移した。収穫期の果実横径は，夏秋乾燥区と夏乾燥区が湿潤区に比べてそれぞれ7.3，3.8 mm小さく，果実重についても64.1，53.6 g軽かった。収穫期の果皮色は，夏秋乾燥区と夏乾燥区が湿潤区に比べて紅色の濃い果実となった。

第5表 ‘不知火’における時期別の水分ストレスが収穫時の果実品質に及ぼす影響

	処理区	果実重 (g)	果実横径 (mm)	Brix%	酸度 (%)	果皮色 (a*)
2008	湿潤区	286.4	81.3	14.4	1.21	24.93
	秋冬乾燥区	261.7	78.3 *	14.9	1.55 *	24.18
2009	湿潤区	347.8	89.3	13.1	1.54	20.68
	夏秋乾燥区	283.7 **	82.0 **	15.5 **	1.79 *	23.21 **
	夏乾燥区	294.2 **	85.5 *	15.0 **	1.56	22.23 *
2010	湿潤区	226.4	78.1	15.5	1.44	24.48
	冬乾燥区	246.8	77.9	15.3	1.45	25.68
	8月乾燥区	228.5	75.9	15.0	1.52	23.61

*は5%水準で有意差あり，**は1%水準で有意差あり

（2008年はt検定，2009年と2010年は湿潤区をコントロールとしたDunnettの多重比較検定を用いた）

反復数は第5表の調査樹に対応し，果実重と果皮色はBrix%と酸度に供した果実を用いた

収穫日 2008年：2月12日，2009年：2月8日，2010年：2月15日

冬乾燥区の ϕ maxは，湿潤区に比べ1月下旬～収穫期まで0.2～0.5 MPa低く推移した（第5図，2010年-A）。一方，Brix%，酸度および果実横径は，果実発育期間中および収穫期の処理区間に差はなかった（第5表，2010年）。

8月乾燥区の ϕ_{\max} は、7月下旬～9月上旬の間、湿潤区に比べ0.2～0.5 MPa低く推移した（第5図，2010年-B）。Brix%は、8月乾燥区が果汁蓄積初期の7月下旬から湿潤区に比べ約2度高く推移したが、乾燥処理を終了した9月上旬以降ではその差は縮小し、10月以降の差はなくなった（第5表，2010年）。酸度は、11月中旬を除き処理区間の差はなく、収穫期の違いもなかった。果実横径は、7月下旬～8月上旬で8月乾燥区が湿潤区に比べて約4 mm小さかったが、収穫期において差はなかった。

2. 時期別の水分ストレスと果実品質の相関関係

$S\phi$ は、8～9月で増糖量と正の相関があり、減酸量と肥大量に負の相関があった（第6表）。また、10～11月はいずれの果実品質とも相関関係はみられず、12月以降は肥大量と負の相関があった。

第6表 ‘不知火’における2か月ごとの積算水分ストレスと果実品質の相関関係

期間 ^z		期間増糖量	期間減酸量	期間肥大量
8～9月	$S\phi_{8-9}$	0.876 **	-0.576 *	-0.820 **
10～11月	$S\phi_{10-11}$	-0.361	0.327	0.166
12月以降	$S\phi_{12-}$	0.239	0.027	-0.509 *

表中の値はPearsonの相関係数を示し、*は5%、**は1%水準で有意である

^z8～9月と10～11月は2009年のデータ (n=12)、12月以降は2008、2009および2010年のデータ (n=32) を使用

考察

‘不知火’における水分ストレスが果実品質に及ぼす影響

平山（1994）は、7～10月の乾燥ストレスは糖度が向上し、7月上旬～10月下旬の灌水と11～12月の少水分管理が、減酸を促進すると推察している。本研究では、8～9月の積算水分ストレスは増糖量と高い相関関係があり、2009年の8～9月に乾燥ストレスを付与した夏乾燥区は、湿潤区に比べ収穫時の糖度は1.9度高かった（第5および6表）。しかし、2010年の8月乾燥区では糖度の上昇はみられたものの、処理後の湿潤状態により糖度は低下し、10

月には湿潤区との差がみられなくなった。澤野ら（2001）は、ウンシュウミカンにおいて夏秋季の1か月間の乾燥ストレスは、果汁の糖度、クエン酸濃度を一時的に高めるが、収穫時の品質向上は期待できないことを報告している。本研究の‘不知火’も同様に、果実発育前期の乾燥ストレスは増糖効果があるものの、1か月程度の短期間の乾燥ストレスは、収穫期の糖度上昇につながらないと考えられる。酸度について、佐藤ら（2006）は、満開後90～150日の無灌水処理が減酸を抑制し、収穫期に高酸な果実になると報告している。本研究でも同様に、積算水分ストレスと酸度は8～9月に中程度の負の相関がみられた。一方、収穫時の酸度について、湿潤区に比べて高い処理区は、2008年の秋冬乾燥区と2009年の夏秋乾燥区であった。2010年の冬乾燥区は酸度に影響がみられなかったことから、10～11月の秋季の乾燥ストレスが減酸を抑制させる可能性がある。果実肥大については、8～9月と12月以降で積算水分ストレスと負の相関があり、10～11月は相関がなかった。しかし、10月下旬以降の乾燥ストレスを付与した秋冬乾燥区についても、収穫期の果実は湿潤区に比べ小玉化したことから、果実発育期間中は時期に限らず乾燥ストレスにより肥大速度は低下すると推察される。

露地栽培の‘不知火’は収穫期前の温暖な条件下の降雨により、樹上および貯蔵中の果実に水腐れ症が生じる（河瀬，1999）。水腐れ症は、生理障害の一つで、成熟期の表皮細胞が、雨や露で長時間濡れると、内圧に耐えられず亀裂を起こし、水浸状または、その後乾燥して褐変化する症状であり、その商品価値は著しく低下する。2009年の本試験地における無袋栽培の水腐れ症の発症率は、通常収穫期の2月17日で約25%だったのに対し、早期収穫の1月14日は0%だった。また、鳥害についても、2月17日は約34%に対して、1月14日は約2%だった。2009年の夏乾燥区は、積算水分ストレスにより増糖効果の認められる8～9月に乾燥ストレスを付与した処理区で、早期収穫期に当たる1月14日の糖度は14.6度で、湿潤区の12.3度に比べて有意に高く、酸度の影響は無かった。しかし、果実横径は夏乾燥区が85.9 mmに対して、湿潤区は89.7 mmで有意に小さかった。これらのことから、8～9月の乾燥ストレスは、早期収穫時においても糖度は高く、水腐れ症や鳥害を回避できると考えられる。一方、果実肥大の低下は避けることができず、酸度の高い果実

となる可能性もあることから、果実肥大に関連の高い摘果の技術や、減酸促進に効果のある貯蔵技術を組み合わせることにより、早期収穫による水腐れ症を回避するとともに品質を低下させない栽培体系を確立する必要がある。

第3節．‘はれひめ’の乾燥ストレスが果実品質に及ぼす影響

緒言

‘はれひめ’（（‘清見’×‘オセオラ’）×‘宮川早生’）は、（独）農業・食品産業技術総合研究機構果樹研究所で育成されたマンダリンタイプの中晩生カンキツで、熟期を12月上旬とし、剥皮は容易でじょうのう膜も薄く、種が無いことから食べやすい品種である（吉田ら，2005）。しかし、食べやすさに優れている一方で、通常の栽培ではBrix%が10～11度となり、同時期の他のカンキツに比べて、やや低い値となる（吉田ら，2005）。この対策として、一部の産地は、シートマルチ栽培を用いて樹体に乾燥ストレスを付与することで、高糖度果実生産を行っている。しかし、効果的な乾燥ストレスの付与時期や強度は分かっていないことから、シートマルチ栽培の効果が十分に発揮されていない。そこで、積算水分ストレス法を用いて効果的な乾燥ストレスの付与時期を明らかにすることで、適切な水管理方法を検討する。また、乾燥ストレスが果汁内糖，有機酸およびアミノ酸の各成分に及ぼす影響を明らかにした。

材料および方法

1. 処理区の作成

2009～2010年の間、果樹研究所カンキツ研究口之津拠点圃場に栽植された10年生カラタチ台‘はれひめ’（2009年時点）を供試した。2009年の試験区は、灌水程度の異なる湿潤区と乾燥区の2区を作成し、7月31日より処理を開始し、収穫日の12月9日まで継続した。処理区の反復数は1区当たり7樹とした。湿潤区は3～7日の間隔で約70 L／樹の灌水を灌水チューブ（ミストエース20サイテキ04L-03，住化農業資材社製）にて行い、 ϕ_{max} で-0.6 MPa以上を基準に行った。乾燥区は透湿性シートマルチ（タイベック，ソフト，幅3 m，デュポン社製）を使用し、降雨を遮断した。乾燥区は、前述の灌水チューブを用いて ϕ_{max} で湿潤区に比べ-0.5 MPa程度低く推移するように調節した。2010年の試験区は、果実発育期間を前半（8～9月）と後半（10月～収穫期）に分け、前半乾燥区と後半乾燥区および対照として湿潤区を作成した。処理

区の反復数は1区当たり4樹とし、湿潤および乾燥ストレスの処理方法とストレスレベルの目安は2009年と同様とした。

2. 処理期間中の樹体水分と果実品質

ϕ_{\max} の測定は、プレッシャーチャンバー（Model 1000, PMS社製）を用いて夜明け前に行い、サンプル葉は樹冠赤道部周辺の発育枝の春葉を供試し、測定間隔は週1回とした。調査樹数と1樹当たりのサンプル数は以下の調査項目と合わせて第7表に示した。果実品質の果汁Brix%, 酸度および果実肥大の測定は週1回行った。果汁Brix%と酸度は、酸糖度分析装置（NH-2000, 堀場製作所社製）を用いて測定し、赤道部周辺の外なり果を供試した。果実肥大はノギスを使用し、果実発育期間を通して同一果実の横径を測定した。栽培管理について、摘果は7月中旬に行い、着果量は約30果・m⁻³とした。肥培管理を含むその他の管理は、慣行の方法に従い、すべて同一とした。

第7表 測定項目別の処理区当たりの調査樹数と1樹当たりのサンプル数

調査年	ϕ_{\max}	Brix% ^z	酸度 ^z	果実横径
	樹 (葉)	樹 (果)	樹 (果)	樹 (果)
2009	4 (2)	7 (3)	7 (3)	4 (3)
2010	3 (2)	5 (2)	5 (2)	5 (3)

^z収穫時のサンプル数は1樹当たり5果とした
項目間の調査樹は、重複するように設定した
括弧内の数値は1樹当たりのサンプル数を示す

3. 時期別の積算水分ストレスと果実品質の算出法

積算水分ストレスと果実品質との関係を明らかにするため、Myers(1988)の積算水分ストレス法を一部修正して用い、 ϕ_{\max} を積算水分ストレス値($S\phi$)に変換し、8月から収穫期までを月毎に果実品質との相関分析を行った(第1節参照)。

4. 収穫時の果実品質と果汁内成分

2009年12月9日に、果実品質調査に供した果実をハンドジュースャーで搾汁し、その果汁を0.45 μm のメンブレンフィルターでろ過したサンプル液を用いて糖、有機酸およびアミノ酸をHPLC(LC-10A, 島津製作所社製)にて定量

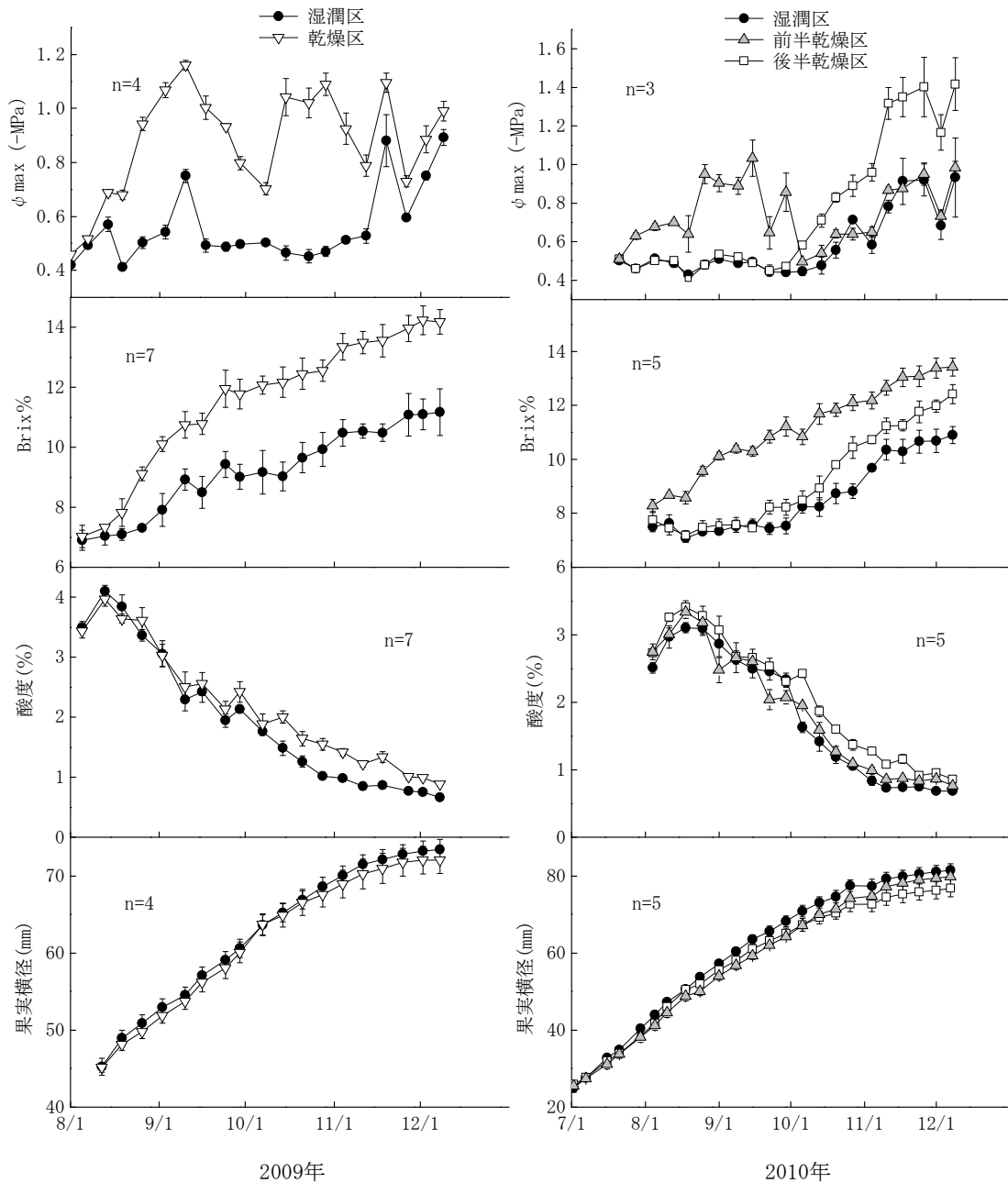
した。糖はサンプル液を純水で10倍希釈し、カラムはYMC-Pack-Polyamine-II (YMC社製)、検出器は示差屈折計 (RID-6A, 島津製作所社製)、移動相は75%アセトニトリル溶液を使用し、流量 $1.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 、カラム温度 35°C の条件で測定を行った。有機酸はサンプルを希釈せず、上記と同型のHPLCを使用し、ポストカラムpH緩衝化-電気伝導度検出法を用いた (島津製作所, 1992a)。カラムはshim-pack-SCR-102H (島津製作所社製) にガードカラム (SCR-102H, 島津製作所) を付け、検出器は電気伝導度計 (CDD-6A, 島津製作所社製) を用いた。移動相は、p-トルエンスルホン酸水溶液を使用し、流量 $0.8 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 、カラム温度 40°C の条件で、緩衝液はp-トルエンスルホン酸およびEDTAを含むBis-tris水溶液を用いた。アミノ酸はサンプルを純水で10倍希釈後、上記と同型のHPLCを使用し、ポストカラム蛍光検出法によりアスパラギン、グルタミンおよびフェニルアラニンは生体アミノ酸分析、それ以外のアミノ酸は加水分解アミノ酸分析で行った (島津製作所, 1992b)。生体アミノ酸分析は、Shim-Pack ISC-30/S0504Li (島津製作所社製) カラムを使用し、移動相は、クエン酸三リチウムとメチルセロソルブおよび過塩素酸を含む水溶液とクエン酸三リチウムとホウ酸および水酸化リチウムを含む液をグラジエントし、再生液は水酸化リチウム水溶液を用いた。流量は $0.6 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ で、カラム温度は 39°C の条件で行った。反応液は、次亜塩素酸ナトリウムを含む炭酸-ホウ酸緩衝液とオルトフタルアルデヒド、エタノール、ポリオキシエチレンラウリルエーテルおよびN-アセチルシステインを含む炭酸-ホウ酸緩衝液を用いた。加水分解アミノ酸分析はShim-Pack ISC-30/S0504Na (島津製作所社製) カラムを使用し、移動相は、クエン酸三ナトリウムとエタノールおよび過塩素酸を含む水溶液とクエン酸三ナトリウムとホウ酸および水酸化ナトリウムを含む液をグラジエントし、再生液は水酸化ナトリウム水溶液を用いた。流量は $0.4 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ で、カラム温度は 60°C の条件で行った。反応液は、生体アミノ酸分析と同一のものを使用した。検出器は、両分析とも蛍光検出器 (RF-10A, 島津製作所社製) を用いた。

なお、すべての統計処理は、統計ソフト (JMP ver. 5.0.1a, SAS Institute) を用いて行った。

結果

1. 処理期間中の樹体水分と果実品質

2009年について、 ϕ_{\max} は処理前で両区とも $-0.4 \sim -0.5$ MPaで推移した（第6図，2009）。乾燥区は8月中旬以降、 $-0.7 \sim -1.0$ MPaで推移した。湿潤区は



第6図 ‘はれひめ’の時期別・強度別の水分ストレスが果実品質に及ぼす影響
図中の縦棒は標準誤差を示す

処理後～11月中旬まで概ね $-0.4 \sim -0.5$ MPaで推移し、その後は $-0.6 \sim -0.9$ MPaで推移した。処理区間差は、11月中旬と収穫直前を除き処理期間中みられた。果実品質については、Brix%は両区とも処理開始直後は7度程度であったが、8月下旬以降より差がみられ、10月上旬では乾燥区が2.9度高かった。収穫時には湿潤区の11.2度に対し、乾燥区は14.2度で有意に高かった。酸度は両区とも8月中旬をピークに減少し、10月中旬以降で乾燥区が湿潤区に比べて高かった。収穫時には、湿潤区が0.66%に対し、乾燥区は0.89%で、0.26%の違いがあった。果実横径は処理開始時では、両区とも40 mm程度で、その後11月上旬まで直線的に上昇し、11月中旬以降は緩やかな上昇となった。収穫時の横径は湿潤区が73.4 mm、乾燥区が72.1 mmで1.3 mmの差があった。

2010年について、湿潤区の ϕ_{\max} は処理開始から10月上旬まで $-0.4 \sim -0.5$ MPaを推移し、その後の値は徐々に低下し収穫時には約 -0.9 MPaであった（第6図，2010）。前半乾燥区は8～9月の間、 $-0.7 \sim -1.0$ MPaを推移し、その後は湿潤区と同様に推移した。後半乾燥区は9月末まで湿潤区と同様に推移し、10月以降は湿潤区に比べ $0.3 \sim 0.5$ MPa低く推移した。果実品質について、Brix%は全区とも処理開始直後は8度程度であったが、前半乾燥区は8～9月、後半乾燥区は10月以降に糖度の明らかな上昇がみられ、収穫時の前半乾燥区は13.4度、後半乾燥区は12.4度で、湿潤区の10.9度に比べて有意に高かった。酸度は全区とも8月中旬をピークに減少し、10月以降は後半乾燥区が他の処理区に比べ高く推移した。収穫期の酸度は、湿潤区は0.68%、前半乾燥区は0.76%、後半乾燥区は0.86%で、後半乾燥区が湿潤区に比べ有意に高かった。果実横径は、前半乾燥区と後半乾燥区ともに乾燥処理期間中は湿潤区に比べ肥大が抑制され、収穫時には、湿潤区は78.1 mm、前半乾燥区は76.5 mm、後半乾燥区は74.3 mmで、後半乾燥区が湿潤区に比べて有意に高かった。

2. 時期別の水分ストレスと果実品質の相関関係

$S\phi$ は、8～10月に増糖量と正の相関があり、10月以降に減酸量と負の相関があった。また、肥大量とは10月に負の相関があった（第8表）。

第8表 ‘はれひめ’における月別の積算水分ストレスと果実品質の相関関係

期間 ^z		月増糖量	月減酸量	月肥大量
8月	$S\phi_8$	0.836 **	-0.012	-0.165
9月	$S\phi_9$	0.542 *	-0.181	-0.157
10月	$S\phi_{10}$	0.855 **	-0.662 *	-0.509 *
11月以降	$S\phi_{11-}$	0.467	-0.524 *	-0.110

表中の値はPearsonの相関係数を示し，*は5%，**は1%水準で有意である

^z8および9月は2009および2010年のデータ (n=17)，10月以降は2010年のデータ (n=9) を使用

3. 乾燥ストレス付与による収穫時の果汁内成分の影響

糖はグルコース，フルクトースおよびスクロースが検出され，成分比は両処理区とも約2:2:6であった（第9表）。いずれの成分も乾燥区が高く，全糖含量は乾燥区が12.77 g・100 mL⁻¹で，湿潤区の7.96 g・100 mL⁻¹に対して約1.6倍だった。

第9表 水分ストレスの違いが果汁内糖含量に及ぼす影響

	グルコース (g・100 mL ⁻¹)	フルクトース (g・100 mL ⁻¹)	スクロース (g・100 mL ⁻¹)	全糖含量 (g・100 mL ⁻¹)
湿潤区	1.45	1.42	5.09	7.96
乾燥区	2.43	2.73	7.61	12.77
有意性 ^z	**	**	**	**

^z t検定により，**は1%水準で有意差あり (n=7)

第10表 水分ストレスの違いが果汁内有機酸含量に及ぼす影響

	クエン酸 (mg・100 mL ⁻¹)	リンゴ酸 (mg・100 mL ⁻¹)	α -ケトグルタル酸 (mg・100 mL ⁻¹)	全酸含量 (mg・100 mL ⁻¹)
湿潤区	843.3	206.9	13.3	1063.5
乾燥区	1117.9	151.1	19.8	1288.8
有意性 ^z	*	*	*	NS

^z t検定により，*は5%水準で有意差あり，NSは有意差なし (n=7)

有機酸はクエン酸，リンゴ酸および α -ケトグルタル酸が検出され，成分比は湿潤区でクエン酸が79.3%，リンゴ酸19.5%および α -ケトグルタル酸が1.2%であった（第10表）。一方，乾燥区はクエン酸86.7%，リンゴ酸11.7%および α -ケトグルタル酸が1.6%で，クエン酸の割合が高かった。乾燥区のクエン酸含量は湿潤区に比べ約1.3倍， α -ケトグルタル酸含量は約1.5倍に対して，リンゴ酸含量は湿潤区が乾燥区に比べ約1.4倍であった。全酸含量は，処理区間で有意な差は認められなかった。

アミノ酸は，アスパラギン酸，トレオニン，セリン，アスパラギン，グルタミン酸，グルタミン，プロリン，グリシン，アラニン，バリン，フェニルアラニン， γ -アミノ酪酸，リシンおよびアルギニンの計14種類が検出された（第11表）。両処理区ともアルギニンが最も多く，全アミノ酸含量の23%程度を占め，次いでプロリンが約20%程度だった。乾燥区は，アスパラギン，グルタミン，グリシン，バリンおよびフェニルアラニンを除く9種類のアミノ酸が湿潤区より有意に高かった。特にアスパラギン酸含量は乾燥区が湿潤区の約3倍，グルタミン酸含量は約2.1倍，プロリン含量は約1.7倍となった。全アミノ酸含量は湿潤区の134.36 mg・100 mL⁻¹に対し，乾燥区は206.54 mg・100 mL⁻¹で，乾燥区が湿潤区に比べ約1.5倍だった。

第11表 水分ストレスの違いが果汁内アミノ酸含量に及ぼす影響

	ASP	THR	SER	ASN	GLU	GLN	PRO	GLY	ALA	VAL	PH-ALA	γ -ABA	LYS	ARG	全アミノ酸含量
湿潤区	7.46	10.03	3.33	25.93	4.25	4.50	24.90	0.44	4.27	0.24	1.29	15.15	2.49	30.08	134.36
乾燥区	21.70	15.43	5.42	25.15	9.12	4.36	42.32	0.95	6.27	0.25	1.13	23.29	3.41	47.73	206.54
有意性 ^z	**	**	**	NS	**	NS	**	NS	*	NS	NS	**	*	**	**

^z t検定により，*は5%，**は1%水準で有意差あり，NSは有意差なし（n=7）

表中のアルファベットについて，ASPはアスパラギン酸，THRはトレオニン，SERはセリン，ASNはアスパラギン，GLUはグルタミン酸，GLNはグルタミン，PROはプロリン，GLYはグリシン，ALAはアラニン，VALはバリン，PH-ALAはフェニルアラニン， γ -ABAは γ -アミノ酪酸，LYSはリシン，ARGはアルギニンを示す

表中の全ての数値の単位はmg・100 mL⁻¹である

考察

1. 高品質果実生産に適した乾燥ストレスレベルと時期

‘はれひめ’のBrix%は，通常10～11度でやや低いことから，一部の産地ではシートマルチ栽培を用いた12度以上の果実をブランド品として販売し

ている。乾燥ストレスレベルについて、2009年の乾燥区の ϕ_{\max} は、8月中旬以降 $-0.7 \sim -1.0$ MPaを推移し、収穫時の果汁内Brix%は14.2度で湿潤区に比べ3度高かった（第6図，2009年）。貝原ら（2006）は、極早生温州において ϕ_{\max} を7月中下旬から収穫まで -1.0 MPa程度に維持することで、高糖度果実を生産できるとしている。‘はれひめ’についても、高糖度果実に適した乾燥ストレスの強度は、ウンシュウミカンと同様の $-0.7 \sim -1.0$ MPa程度であると考えられる。一方、2009年の乾燥区は長期間の乾燥ストレスにより、酸度は湿潤区に比べ0.26%高く、このような高酸果実は商品価値の低下につながる。第8表の積算水分ストレスと果実品質の相関より、乾燥ストレスによる増糖効果は8～10月にあり、10～11月は減酸を抑制することが明らかとなった。さらに、積算水分ストレスと月増糖量の回帰直線の傾きは、増糖効果の強度を示し、8月の回帰直線の傾きは10月の傾きに比べて有意に高かった。これらのことから、果実発育期前半は乾燥ストレスによる増糖効果が高く、減酸の抑制に影響の少ない時期と考えられる。2010年の前半乾燥区は、8～9月に $-0.7 \sim -1.0$ MPaの乾燥ストレスを付与した処理区で、収穫期の糖度は湿潤区に比べ2.5度高い13.4度で、酸度は0.08%高いが有意差は無かった（第6図，2010年）。これらのことから、‘はれひめ’の高品質果実に効果的な乾燥ストレス時期は果実発育期前半の8～9月で、そのストレスレベルは ϕ_{\max} で $-0.7 \sim -1.0$ MPa程度であると示唆される。

2. 収穫時の果実品質と果汁内成分

水分ストレスによる糖および酸含量の変化について、坂本・奥地（1970）は果肉中の水分減少による濃縮の影響とし、Kadoya（1973）は水分の供給不足に基づく物理的な濃縮以外に、乾燥下では果実に転流した光合成産物の多糖類への生合成系が抑制されること、また果実中の細胞壁構成多糖類が加水分解されることも糖含量を上昇させる一因としている。本研究の果実重は乾燥区が1割程度小さくなったが、グルコース、フルクトースおよびスクロースのいずれにおいても乾燥区が1.5～1.9倍となり、水分減少による濃縮のみではないものと考えられる。また、食味に及ぼす影響は、一般にスクロースの甘味度を1とすると、グルコースは0.74、フルクトースは1.73となること

から（岩田，1960），乾燥区の甘味は湿潤区に比べて約1.64倍高くなる。

坂本・奥地（1970）は，ウンシュウミカンの酸について，土壌の乾燥は，果肉中の酸代謝抑制と，果実肥大の抑制による濃縮の影響によって，酸濃度が高くなることを報告している。本試験のクエン酸は，湿潤区 $843.3 \text{ mg} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ に対して乾燥区は $1117.9 \text{ mg} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ で，1果の平均果汁量は，湿潤区 99.8 mL に対し乾燥区 89.3 mL だった。よって，濃縮による影響のみを考慮すれば，乾燥区は $942.7 \text{ mg} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ になると推定され，湿潤区との差分である $99.4 \text{ mg} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ が濃縮による影響，残りの $175.2 \text{ mg} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ が酸の代謝抑制による影響と考えられる。一方，リンゴ酸については，湿潤区が乾燥区に比べて高い値を示した。小林（1975）は，有機酸含量は環境条件によって変化し，温度による影響が著しく，夜間の低温は酸の生成を促し，反対に 30°C 以上の高温は酸の呼吸代謝を促進し，酸を減少させることを報告している。その中でも，リンゴ酸は，呼吸に利用される温度域が低く，一般に暖地産の果実中にはリンゴ酸の含量が少なく，また，冷涼な年に比べ，温暖な年の果実はリンゴ酸の含量が少なくなるとしている。本研究の乾燥区は乾燥ストレス処理のため，白色のシートマルチを敷設した。予備試験より，夏秋季に白色シートマルチを敷設した樹冠内の最高気温は，露地に比べて $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ 高かったことから，気温の上昇によって呼吸代謝が促進されたと推察される。

大東・富永（1981）は，ウンシュウミカンのアミノ酸についてプロリン含量が最も多く，次いでアルギニン，アラニン，グルタミン酸，アスパラギン酸が多いことを報告している。‘はれひめ’では，アルギニンが最も多く，次いでプロリン， γ -アミノ酪酸，アスパラギン酸が多く含まれており，ウンシュウミカンと一部異なる成分比となった。処理区間では，アスパラギン，グルタミン，グリシン，バリンおよびフェニルアラニンを除く9種類のアミノ酸で乾燥区が湿潤区に比べ有意に高かった。Levy（1980）はレモン，鈴木ら（1981）はウンシュウミカン，圖師ら（2005）はトマトにおいて水分ストレスでプロリン含量が増加することを明らかにしている。また，山田ら（1987）はウンシュウミカンの土壌乾燥処理により葉，茎および根のプロリン含量が増加することを明らかにしている。本研究においても，プロリンは乾燥区が湿潤区の約1.7倍増加し，全アミノ酸含量においても約1.5倍増加した。アミ

ノ酸は、各成分で呈味質（味の質的な印象）が異なり、グリシン、アラニン、セリン、トレオニンは甘味を呈し、高糖度ではうま味を呈する場合がある（河合，2003）。バリン，メチオニンおよびシステインは苦みと甘味を呈する。ロイシン，イソロイシン，フェニルアラニン，トリプトファンは単純な苦みを呈し，グルタミン酸およびアスパラギン酸は酸味が強い。グルタミンとアスパラギンは高濃度ではうま味を呈し，リジン，ヒスチジンおよびアルギニンは苦味中心の複雑な呈味質である。プロリンは単純な苦味を呈する。このように，各アミノ酸によって，呈味質は異なり，さらに，ヒトが感じる呈味強度も各アミノ酸によって異なる。例えば，グルタミン酸やアスパラギン酸は数mMで味を感じるのに対しグリシン，トレオニン，プロリンなどは100 mM以上でようやく味を感じる。Fuke・Konosu（1991）は，トマト果実の場合はグルタミン酸が少ないと，トマトらしい味を示さないとする。本研究の中で，アルギニンとプロリンが比較的濃度が高かったが，モル単位で示すと数mMで，味として感じる濃度では無い。呈味強度の低いアスパラギン酸とグルタミン酸は，乾燥区で1.6 mMと0.6 mMだったことから，アスパラギン酸が弱く感じる程度かもしれない。

以上の結果より，‘はれひめ’の高品質果実生産には，果実発育期前半の8～9月に ϕ_{max} で-0.7～-1.0 MPa程度の乾燥ストレス付与が適していると考えられる。このような果実は，多くの果汁内成分の濃度が上昇するが，特に糖成分の上昇が食味に好影響をもたらし，商品性が向上されると示唆される。

第 2 章 カンキツにおける TDR 水分計を用いた枝内水分測定法の開発

第 1 節. TDR 枝内水分測定法の確立

緒言

カンキツ樹の乾燥ストレスと果実品質に関する試験は、ストレスの指標にプレッシャーチャンバーを用いた葉内水ポテンシャルを用いることが多い。特に深夜から未明に測定される葉内最大水ポテンシャル（以降 ϕ_{\max} ）は、蒸散が停止した状態の安定した水ポテンシャルを測定できことから、乾燥ストレスと果実品質との関連性を示す報告に用いられている（東ら，2004；Hutton ら，2007；貝原ら，2006；間苧谷・町田，1980；中里・岸野，1999）。しかし，この方法は，簡易に園地で測定できないことから，研究用としての利用に限定される。

近年，樹体の枝内体積含水率（以降 VWC）を測定する方法として TDR (Time Domain Reflectometry) 法の利用が報告されている（Constantz and Murphy, 1990；Holbrook ら，1992；Irvine and Grace, 1997；小林・田中，2001；Wullschlegel ら，1996）。TDR 法は，物質の誘電率とその物質中の水分含量により変動することを利用し，高周波の電磁波の反射時間から誘電率を測定することで水分含量を推定する。TDR 法による樹木の VWC 測定は，2～3 本のステンレス製センサーロッドを幹や枝の伸長方向に沿って埋め込み，ロッド周辺の枝内水分含量の変化を把握する方法である。しかし，幹や枝にロッドを挿入することは容易でなく，取り付けたセンサーは取り外しができないことから，多点計測はできない。そこで，平岡ら（2005）は，携帯型 TDR 水分計のセンサー部をあらかじめ枝に挿入したセンサープローブ（ステンレス釘）に接触させることで簡単に多点計測する方法を報告した。TDR 法による枝の VWC は，水の移動する力を示す水ポテンシャルとは異なり測定部位の水分含量を表すが，園地で簡単に測定できるため，樹体内水分指標として水管理に用いる利点は大きいと考えられる。

そこで，本節では，樹体の水分状態を表す枝の VWC を TDR 法で測定し，水管理に対してタイムリーな変化をするか検証するとともに，果実品質と

の関係をあわせて検証する。

材料および方法

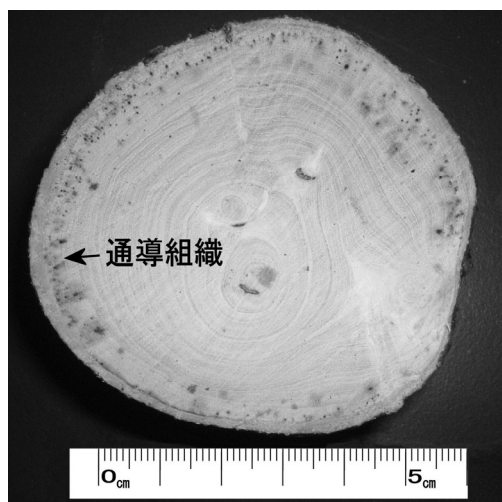
果樹研究所口之津拠点の北東に面した傾斜地園に、ほぼ北西から南東の向きに平行に植栽されたカラタチ (*Poncirus trifoliata* (L.) Raf.) 台‘興津早生’ (*Citrus unshiu* Marcow.) 35 年生 (2005), 2 列 (14 樹/列) 28 樹を供試した。水管理の変化に対する VWC の反応を調査するために一列を灌水→マルチ区に、もう一列をマルチ→灌水区に割り当てた。各列の 3 樹を TDR 法による枝 (主幹と側枝) の VWC 測定に、全樹を果実品質分析用に供した。

1. 処理区の水管理

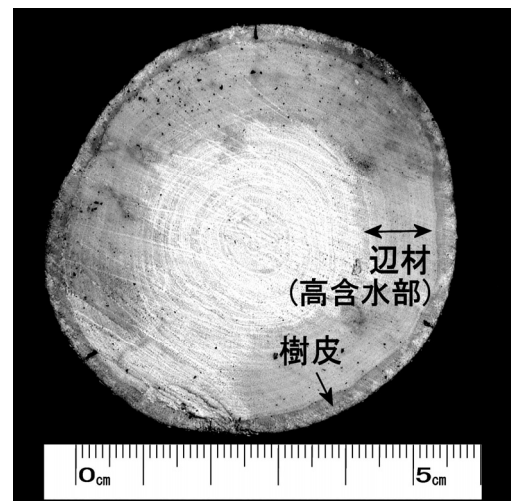
灌水・乾燥・降雨などによる主幹と側枝の VWC の変化を時系列で知るために、5 月 20 日から 6 月 24 日までシートマルチにより乾燥処理し、6 月 25 日から 7 月 27 日まで灌水する処理区 (マルチ→乾燥区: 14 樹) と 6 月 24 日まで灌水し 6 月 25 日からシートマルチにより乾燥処理する区 (灌水→マルチ区: 14 樹) を設定した。7 月 28 日以降は両処理区とも収穫期までシートマルチによる乾燥処理を行った。ただし、外観から樹体への強い乾燥ストレスが確認された 8 月 19 日および 10 月 29 日には灌水した。なお、処理期間中の灌水方法は手灌水で月、金曜日の週 2 回行い、1 回の灌水量は 1 樹当たりおよそ 100 L とした。また、摘果は荒摘果を 6 月下旬、仕上げ摘果を 9 月上旬に行い、葉果比がおよそ 20 になるように行った。防除、施肥等の園地管理は慣行に従った。マルチには、透湿性シート (タイベック, ソフトタイプ, 幅 3 m, デュポン社製) を使用し、樹冠下全面に敷設した。

2. 主幹・側枝の体積含水率（VWC）測定

各樹の地際から約 20 cm 離れた主幹（直径約 70 mm）の基部および着葉数が 300 枚程度で果実を 15 果程成らせた新葉率 50% 程度の側枝（直径 30 mm）の側面に 32 mm の間隔で市販のステンレス製釘（主幹：太さ 1.6 mm，長さ 25 mm，側枝：太さ 1.7 mm，長さ 19 mm，頭部：平頭，胴部：スムーズ，尖端：角先，SUS304，八幡ねじ社製）2 本を枝・幹の伸長方向に打ち込み，センサープローブとした。プローブの挿入深について，予備実験において，主幹では 10，15，20 mm，側枝では 5，10 mm の各深さにプローブを打ち込み，土壌水分を変えた際の測定値の変化量を調査したところ，主幹では 10，15 mm，側枝では 10 mm の変化が大きく，また，主幹の測定値のバラツキは 15 mm で小さかった。また，直径約 70 mm の主枝を切断し，染色液で切断面を浸漬することで導管を染色したところ，通導組織は，樹皮の内側約 10 mm に分布し，導管の配列は散孔材に分類される（第 7 図）。さらに，同様の主枝を切断したときに湿り気を帯びた部位は，樹皮の内側約 15～20 mm で（第 8 図），心材と辺材の色の区別は無いものの，この部分が辺材と考えられる。瀧澤ら（1996）は，一般に幹の含水率は，辺材で季節的な変化がみられ，散孔材のタムシバでは，蒸散により体積含水率の変化する幹断面の部分は，辺材全体であることを報告している。これらのことから，プロ

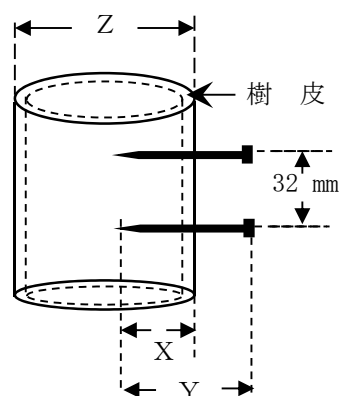


第 7 図 導管染色を行った主枝部の横断面（染色液：メチルレッド-メチレンブルー溶液）



第 8 図 主枝部の切断直後の湿潤部位

ープの深さは主幹で 15 mm，側枝で 10 mm が樹体の水分状態を反映する
と
考え，挿入深として設定した（第 9 図）。測定間隔は，2005 年 5 月 20 日
より
土日，降雨日を除くほぼ連日の 13～14 時に行った。測定には藤原製作所
社製
の TDR 水分計（TDR-341F，ロッド数 2 本，ロッド径 3.2 mm，ロッド長
300
mm，ロッド間隔 32 mm）を用い，2 本のセンサーロッドをそれぞれプロ
ー
ブと接触させることで（TDR-341F のロッド基部から 200 mm のところを
プロ
ーブとの接点とした）測定し，VWC を後述する検量線に基づき算出し
た（第 10 図）。



X・・・	主幹	15 mm	側枝	10 mm
Y・・・	主幹	25 mm	側枝	19 mm
Z・・・	主幹	70 mm	側枝	30 mm

第9図 測定用ステンレス釘の配置



第 10 図 TDR 枝内水分測定の様子

なお，予備試験で，主幹の VWC の日変化と方位間差について調査した結
果，VWC の昼夜間ならびに 8 方位間の含水率に大差ないことを確認した。
また，平岡ら（2005）は樹皮の厚さの違いが測定値に影響することを述べ
ているが，本節では測定部位の直径を揃えることにより樹皮の厚さは同じ
と仮定した。

3. 検量線作成

TDR 水分計の測定値から枝の VWC を算出するため，主幹，側枝それぞれ
について検量線を作成した。園地で継続測定する枝と同程度の径の枝にあ

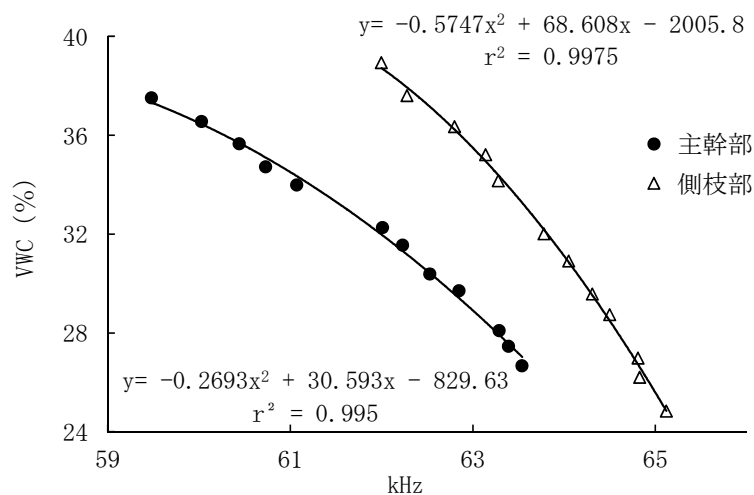
らかじめ伸長方向に沿って2本のプローブを32 mmの間隔で所定の深さ(主幹で15 mm, 側枝で10 mm)打ち込み, プローブを中心に長さ70 mm切り出した。切り出した枝サンプルの径と長さをノギスで測定し体積を算出した後に, 室内で徐々に乾燥させながら生重量(W_{sample})と測定値を得た。その後, 枝サンプルを3日間80℃の恒温器に入れて乾燥させ, 乾燥重量(W_{dry})を秤量した。枝サンプルのVWC(θ)は以下の式から決定した。

$$\theta = (W_{\text{sample}} - W_{\text{dry}}) / (\rho_{\text{water}} \times V_{\text{sample}}) \times 100$$

ここで, ρ_{water} : 水の密度, V_{sample} : 測定開始時の枝サンプルの体積である。

4. 果実品質

6月21日から11月8日まで1~2週間間隔で, 各樹から5果をサンプリングし, 果実の糖・酸含量を分析した。果汁の糖は屈折糖度計で測定し, 酸はNaOH水溶液による滴定により評価しクエン酸%で表した。



第11図 体積含水率 (VWC) とTDR水分計測定値の関係

結果および考察

1. 体積含水率（VWC）と水分計測定値の関係

実測による VWC (y) と測定値 (x) の間の回帰式は、側枝で $y = -0.5747x^2 + 68.608x - 2005.8$ ($r^2 = 0.9975$)、主幹では $y = -0.2693x^2 + 30.593x - 829.63$ ($r^2 = 0.995$) となった (第 11 図)。園地における測定期間を通じた側枝の VWC の変動範囲は 32~40%，主幹は 34~38% で、概ね回帰式の範囲を含んでいたため、それぞれの回帰式を検量線として、側枝と主幹の体積含水率を算出した。いずれの部位についても、決定係数は 0.995 以上で高く、TDR 計による測定より VWC を算出できると考えられる。検量線が側枝と主幹で大きく異なる要因は、使用したプローブの形状と挿入深が異なるためと考えられる。

2. 主幹・側枝の体積含水率（VWC）の変化

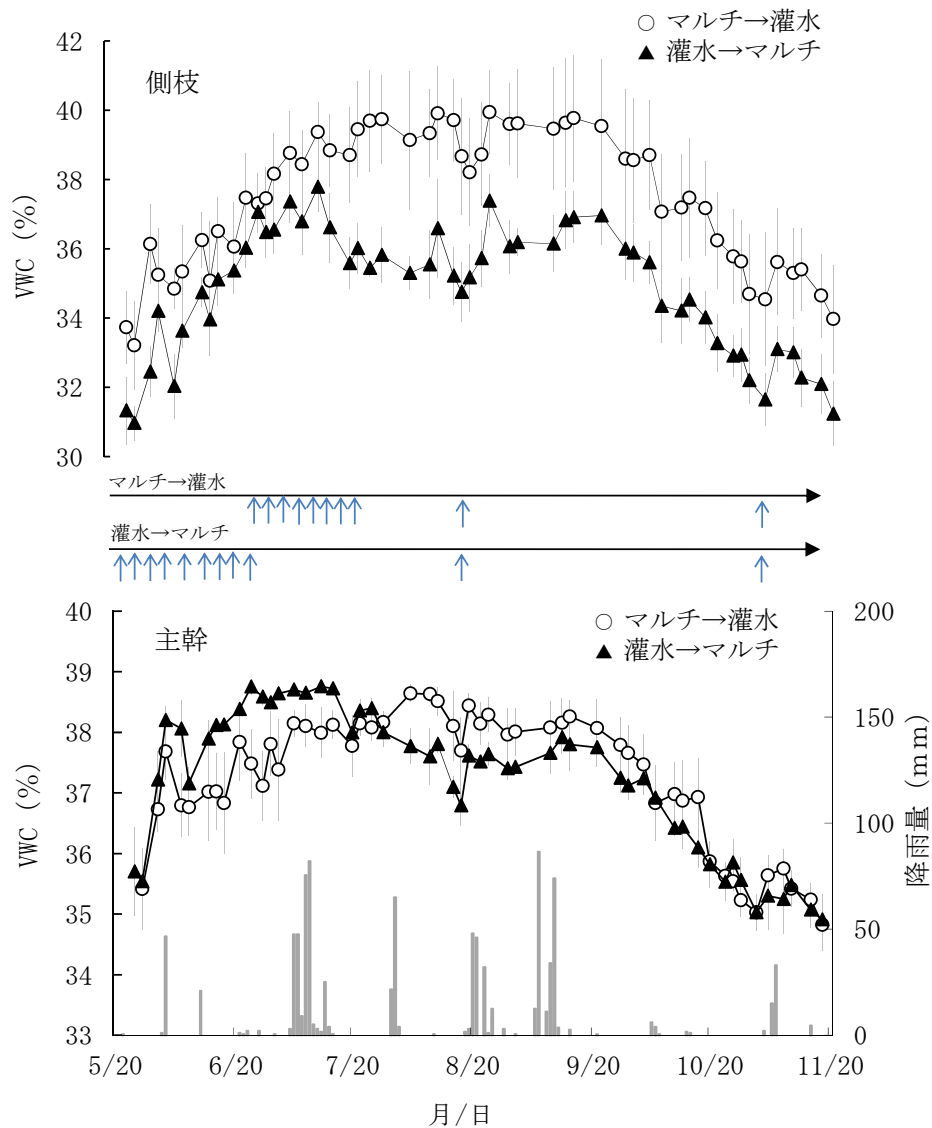
1) 主幹における VWC の変化 (第 12 図下)

測定開始時 (5 月 20 日) の VWC は 35~36% で、灌水→マルチ区とマルチ→灌水区の差はほとんどなかった。その後、6 月上旬にかけて両区とも VWC の上昇がみられた。しかし、処理を変えた 6 月 24 日以降、灌水→マルチ区では灌水を中止したにもかかわらず VWC は緩やかに上昇し 7 月中旬には 39% 近くに達した。これに対し、マルチ→灌水区では灌水開始後に VWC の明らかな上昇がみられた。

灌水→マルチ区で徐々に VWC が低下しはじめたのは、シートマルチによる乾燥処理後約 3 週目からであった。ただし、7 月はじめから半ばにかけて降雨が多かったことから、雨の影響を無視できず、VWC 低下に要する時間は 3 週間より短かったかもしれない。一方、マルチ→灌水区では、VWC は灌水後緩やかに上昇し、水管理を換えてから約 4 週後の 7 月下旬に、灌水→マルチ区の VWC より高くなった。

処理区間の VWC が逆転した 7 月下旬以降、灌水→マルチ区の VWC は低下を続け、8 月中旬には 37% を下回った。この頃、葉の萎れ、退色が目立ったため、8 月 19 日に灌水を行った。灌水後、VWC は直ちに 37.5% 付近まで上昇し、9 月中旬まで 37.3~38% を推移した。一方、マルチ→灌水区は 7

月下旬～9月中旬まで概ね 38% 台で推移し，8月上中旬の VWC の低下に対しては，8月19日の灌水によって，VWC の回復がみられた。9月中旬以降，VWC はいずれの区でも低下し，10月下旬以降，両区の差は縮小し，ともに約 35% で安定した。



第12図 主幹・側枝の体積含水率 (VWC) の変化
 図中の縦棒は標準誤差 (n=3) を示す
 図中の横矢印はシートマルチ被覆期間を示す
 図中の縦矢印は灌水日を示す

2) 側枝における VWC の変化 (第 12 図上)

測定開始時(5月20日)の灌水→マルチ区の VWC は約 31%, マルチ→灌水区は約 33%と異なり, 7月中旬まで主幹と異なる推移を示した。この要因には, 枝の位置や角度などで側枝周辺の環境に違いがあったと考えられる。TDR 法では, 温度依存性の高い誘電率を測定しているために測定値への温度の影響は大きく, 予備試験の結果, 気温 5℃の上昇により VWC は側枝部で 0.4%程度高く推移することを認めている。同様の側枝を供して翌年に測定した側枝の温度差は最大で 5℃程度みられたため, 測定した側枝に温度環境の差があったと推定される。

測定開始後, 両区とも VWC は上昇したが, マルチ→灌水区の VWC の上昇率は灌水→マルチ区よりやや劣った。そのため, 水管理を反転した後の 7月はじめには, 当初みられた処理間差はほぼ解消された。その後, 灌水→マルチ区の VWC は, 7月中旬の 37%をピークに低下に転じ, 8月中旬には 35%を下回った。一方, マルチ→灌水区の VWC は, 上昇をつづけたが, 灌水を停止した 7月 28日以降は約 40%で推移した後, 8月中旬に乾燥のため一時的に 38%程度にまで低下した。

8月 19日の灌水後, 両区の VWC は上昇し, マルチ→灌水区で 39%以上, 灌水→マルチ区では約 37%で 9月末まで推移した。その後, 両区の VWC は 2~3%の差を維持しながら低下し, 10月下旬以降ほぼ一定になった。外観から過度の水分ストレス状態と判断し, 11月 1日に灌水した後の VWC の変化は 8月 19日の場合と概ね同様であった。

3) 主幹・側枝体積含水率 (VWC) の変動特性

水管理に伴う側枝と主幹の VWC の変化から, 側枝・主幹の VWC はともに上昇期(~7月上中旬), 安定期(7月上中旬~9月中旬), 下降期(9月中旬~)からなる季節変化を示すこと, マルチ, 灌水・降雨により一時的に上昇, 低下することが明らかになった。また, 樹体に乾燥ストレスが付与された状態であった 8月 19日の灌水により, 主幹では翌日に VWC の上昇がみられたのに対し, 側枝では 3日後にピークがみられた。このように側枝の VWC が主幹より何日か遅れて変化することは, 灌水後, 導管を通して供給された水が, 各組織に分配されるために時間がかかるためと考えられる。

VWC は、測定期間中側枝で 6~7%，主幹で 4% 変化し、側枝の VWC は主幹より灌水制限処理による変化が大きかった。しかし、側枝は、周辺環境の変化による影響を受けやすくバラツキが大きい。予備試験で、1 樹内の側枝、垂主枝、主枝および主幹の各部位をそれぞれ測定した場合、主枝と主幹は直射日光の影響を受けないことから、側枝と垂主枝に比べて、バラツキが小さかった。よって、変動は小さいものの、安定して測定できる主幹、主枝が測定部位として適当であると思われる。

TDR 法で測定する際に影響する要因として温度および EC がある。平岡ら（2005）は、樹体の VWC 測定では樹液の EC の影響は無視できると報告している。しかし、温度の影響は無視できない。一般に TDR 水分計では、センサー、水分計本体の温度が高いと VWC は実際より高く評価される（Campbell Scientific, Inc., 1996）。本研究で用いた検量線は室温環境下で作成し、全測定期間にわたって気温に基づく温度補正はしていない。従って、実際の気温を用いた補正方法を次節で検討した。さらに、TDR 計を用いた枝内水分の測定で、平岡ら（2007）は、樹皮の厚さと測定値の関係について報告している。この報告によると、同一の体積含水率の枝であっても、樹皮が厚い枝の場合、体積含水率の高い樹皮が測定部に占める割合が大きくなり、測定値は大きくなることを明らかにしている。このことから、測定誤差は樹皮厚によっても生じると考えられる。

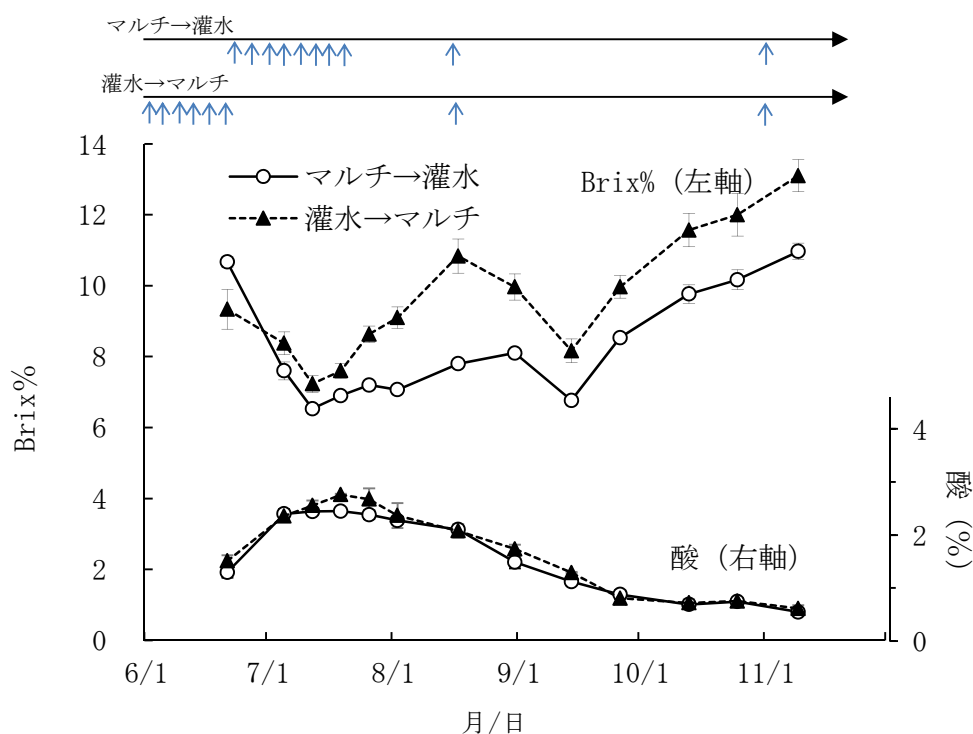
3. 果実品質（第 13 図）

糖：果汁が採取可能になった 6 月 21 日の Brix% は、約 10 でマルチ→灌水区が灌水→マルチ区よりやや高かった。その後、両区の Brix% は 7 月中旬まで低下した。この間、マルチ→灌水区の Brix% の低下は、灌水→マルチ区より著しかった。7 月下旬以降、灌水→マルチ区の Brix% は、マルチ→灌水区より顕著に上昇した。7 月末に主幹の VWC はマルチ→灌水区より低下し 8 月 19 日にかけて晴天日が多かったことも加わり Brix% の差は拡大を続けた。しかし、8 月 19 日の灌水とその後の降雨により灌水→マルチ区の VWC は急激に回復し、それに伴い Brix% は顕著に低下した。9 月中旬以降、再び Brix% は増加し、収穫期の 11 月 8 日には灌水→マルチ区で約

13, マルチ→灌水区で約 11 に達した。なお, VWC 測定に供した 3 樹とそれ以外の 11 樹の果実品質について差異はみられなかった。

酸: 6 月 21 日の酸は, 1.9~2.2% で, その後 7 月上旬にかけて急速に上昇し, 両区とも 7 月中は 3.5% 以上で推移した。7 月にマルチされていた灌水→マルチ区の酸は 4.1% とマルチ→灌水区より高かった。減酸は 7 月末から始まり, 灌水→マルチ区の酸は, 9 月下旬まではマルチ→灌水区より高かったものの, それ以降は差がなくなり, 11 月 8 日には両区とも 1% 以下となった。

以上のことから, 主幹部に挿したステンレス釘をプローブに利用して TDR 水分計で評価した VWC は, 側枝部のそれに比べて安定した値を測定でき, 水管理に応じて変動したその推移は, ウンシュウミカンの果汁成分として重要な Brix% と関連することが明らかになった。



第13図 果実品質の変化

図中の縦棒は標準誤差 (n=14) を示す

図中の横矢印はシートマルチ被覆期間を示す

図中の縦矢印は灌水日を示す

第2節．TDR枝内水分測定法の精度向上と自動連続モニタリング

緒言

第1節より，TDR枝内水分測定法は，プローブ設置時における挿入深の誤差，TDR水分計の温度依存性，樹皮の厚さの問題がある。そこで，本法の測定精度の向上のため，以下の点について検討を行った。

温度依存性については，補正式を作成することにより測定精度の向上を試みた。また，プローブの挿入深度の違いや樹皮厚の違いが測定値に及ぼす影響は，樹体水分が安定する時期のTDR測定値を基準点とし，その値を基準とした推移を相対的な値（以降相対値）として観測することにより軽減できると考えられる。そこで，相対値を用いた場合の基準日の設定について検討した。また，第1章で得られた効果的な水管理を診断するためには，葉内最大水ポテンシャル（以降 ϕ_{\max} ）とTDR水分計による枝内水分との関係を明らかにする必要がある。そこで，温度補正と相対値化による精度向上の効果を ϕ_{\max} との相関により検証するとともに，乾燥ストレスや低温に対するTDR測定値と ϕ_{\max} の反応の違いを，季節推移より検証した。

また，本方法を自動連続モニタリングすることは，樹体の水分動態を詳細に把握することを可能とし，自動灌水技術にもつながる。そこで，データロガーを用いた自動連続モニタリングを試み，灌水方法の異なる樹の水分状態を把握することで，その有用性を検証した。

材料および方法

1. 温度依存性の影響と補正式の作成（実験1）

2006年7月17日に，果樹研究所カンキツ研究口之津拠点植栽の16年生カラタチ台‘原口早生’を3樹供試し，本章第1節の方法に従って，主枝部にプローブ（ステンレス製釘，太さ1.6 mm，長さ25 mm，SUS304，八幡ねじ社製）をロッドの間隔と同じ32 mmの間隔で伸長方向に沿って15 mmの深さで挿入した。7月20日にプローブを中心に伸長方向に70 mm切り出し，切り出した木片を乾燥させないようにすぐにビニール袋で密封した。その後，グロースキャビネット（MLR-350HT，三洋電機社製）で気温を5～35℃まで5℃間隔で変化

させながら、枝内温度とTDR水分計（TDR-341F，ロッド長300 mm，藤原製作所社製）による測定を行い，測定物の温度に対するTDR測定値の影響を調査した。TDR測定法のロッドとプローブの接触方法は，ロッド基部から100 mmの部位（第1節では，200 mmの部位だが，プローブとの接触が不安定で，数値が振れることから変更した）でプローブを挟むように行った。枝内温度の測定は温度計（TR-52S，ティアンドデイ社製）のセンサー部を木片に挿入し，エアコン配管用不乾性充填材で密閉した。センサーの挿入方法は，電動ドリルでセンサーと同じ直径2 mmの穴をあけ，プローブの挿入深と同じ深さにセンサーを配した。

また，簡便化を目的に，気温から枝内温度の推定を試みた。供試樹は前述と同じ16年生‘原口早生’を用いて，枝内温度と樹冠内の気温を測定した。枝内温度は前述と同様の方法で温度計のセンサー部を主枝部に挿入することにより測定し，気温はセンサー部を遮光し，樹冠内部に設置した。測定期間は2006年3月10日～2007年9月25日とした。調査時刻は13～14時とし，調査の間隔は週に2回とした。以上より，測定時の気温から枝内温度を推定し，TDR測定値の温度依存性について補正式を作成した。

2. TDR相対値の基準点の設定（実験2）

TDR水分計を用いた枝内水分の変化を精度良く表すために，年間の安定する時期から基準点を設定し，そのときの環境条件とTDR測定値の関係を検証した。TDR水分計を用いた年間の枝内水分の変化は，果樹研究所口之津拠点植栽のカラタチ台‘原口早生’を供試し，2006，2007および2008年の3か年調査した（2006年；15年生，n=19，2007年；16年生，n=5，2008年；17年生，n=4）。2006年は3月13日～11月28日，2007年は6月7日～11月13日，2008年は7月4日～2009年5月20日まで調査した。TDR枝内水分測定法は，本章第1節の方法に従った。測定位置は直径45～60 mmの主枝部とし，1樹当たり1か所とした。TDR水分計による測定間隔は週に1～2回とした。土壌は湿潤状態を維持するよう定期的に灌水した。灌水は，2006年は手灌水，2007および2008年は点滴灌水チューブ（ラム17，ネタフィム社製）を植栽列と平行して主幹部近傍に1列設置して行った。2007および2008年は，根域部の地表面に透湿

性シートマルチ（タイベック，ソフトタイプ，幅3 m，デュポン社製）を敷設した。灌水は週2回とし，1回の灌水量は約100 L／樹とした。その他の管理は慣行に従った。

気温とTDR値の関係は，2008年7月4日～2009年5月20日のTDR水分計による測定と同時刻の気温について検証した。気温は実験1で使用した温度計を使用し，センサー部を樹冠内部に設置した。

3. ψ_{\max} とTDR相対値の関係（実験3）

17年生カラタチ台‘原口早生’を供試し，2007年7月～収穫期まで，枝内水分の異なる樹を設定するため，灌水量の異なる処理区を3区（多灌水区，中灌水区および少灌水区， $n=6$ ）設置した。TDR水分計による調査樹は各区5樹， ψ_{\max} の調査樹は各区3樹とした。灌水は，前述の点滴灌水チューブを主幹部近傍に植栽列と平行に設置して行った。また，降雨による影響をなくするため，実験2と同様の透湿性シートマルチを6月27日に全面被覆した。灌水は7月6日より開始し，1回の灌水量は約100 L／樹とし，多灌水区は週に2回，中灌水区は10日に1回，少灌水区は20日に1回とした。葉果比は20葉当たり1果とし，その他の管理は慣行に従った。 ψ_{\max} との相関分析は，TDR水分計により得られた温度補正後周波数（以降 F_{rev} ，相対値化なし），温度補正前相対値（以降 R_{site} ）および温度補正後相対値（以降 R_{rev} ）と行い，温度補正の有無と相対値化による精度向上を検証した。ここで，TDR相対値の基準点の設定には，実験2によって得られた時期とした。 ψ_{\max} はプレッシャーチャンバー（Model1000，PMS社製）法により，葉内最大水ポテンシャルを測定した。サンプル数は，TDR測定は1樹当たり主枝1か所， ψ_{\max} は1樹当たり春葉2枚とした。調査期間は7～11月までとし， ψ_{\max} は週に1回，TDR測定は週に2～3回行った。なお，TDR測定値と ψ_{\max} の相関関係の検証は，それらの調査が重複する7樹を用いて，それぞれの調査日が同日か前後日の値を使用した。統計処理は統計ソフト（JMP ver. 5.0.1a，SAS Institute Inc.）を用いて行った。

4. 自動連続モニタリング（実験4）

2010年6月23日から7月21日の間、ガラス室内の4年生カラタチ台‘不知火’（‘清見’×‘中野3号ポンカン’）の25Lポット樹を用いて、灌水頻度の異なる3樹を作成した。処理樹は、灌水間隔が2日ごとの湿潤樹、4日ごとの半湿潤樹および7日ごとの乾燥樹で、灌水は、土壌が湿潤状態となるまで十分な量を行った。7月21日から8月7日は、全ての樹を2日ごとに灌水し、乾燥ストレスを付与しない状態を維持した。TDRセンサーは、前述のTDR-341Fのセンサー部（CS616, campbell社製）を使用し、測定部位は主幹部とした。相対値の基準日は処理開始の6月23日とし、 R_{rev} に変換後、同日に作成した検量線を用いて体積含水率（以降VWC）に算出した（ $VWC = R_{rev} \times 4.4262 + 35.836$ ）。データロガーはCR10X（campbell社製）を用いて記録した。また、VWCと土壌水分を比較するため、TDR水分計（TDR-341F, 藤原製作所社製）を用いて土壌体積含水率を測定した。土壌体積含水率の変換式は、計測器に内蔵する検量線を用いた。

結果および考察

1. 温度依存性の影響と補正式の作成

TDR水分計を用いた枝内水分測定法は、枝内温度の上昇によりTDR水分計の周波数が低下するという温度依存が認められ、一次回帰式によって強い相関関係（ $F = -0.0559 \times T_{stem} + 61.016$, $r^2 = 0.9969$, F ; TDR計による周波数, T_{stem} ; 枝内温度）が認められた（第14図）。また、枝内温度5℃の上昇により測定値は約0.3 kHz減少した。測定値の標準誤差はやや高い値（ $\pm 0.2 \sim 0.5$ ）であった。この誤差の要因は、前述したプローブの挿入深度による技術的な問題であると考えられる。しかし、サンプルごとの直線の傾きはほぼ等しく、補正式は傾きに対してのみ反映されることから、補正式に及ぼす影響は小さいと思われる。この回帰式を用いて枝内温度を便宜的に25℃に設定した場合の補正係数の算出式は

$$K = 0.0009 \times T_{stem} + 0.9758 \quad (r^2 = 0.9972) \quad \cdots (1)$$

となる。ここで、 K は補正係数、 T_{stem} は枝内温度を示す。

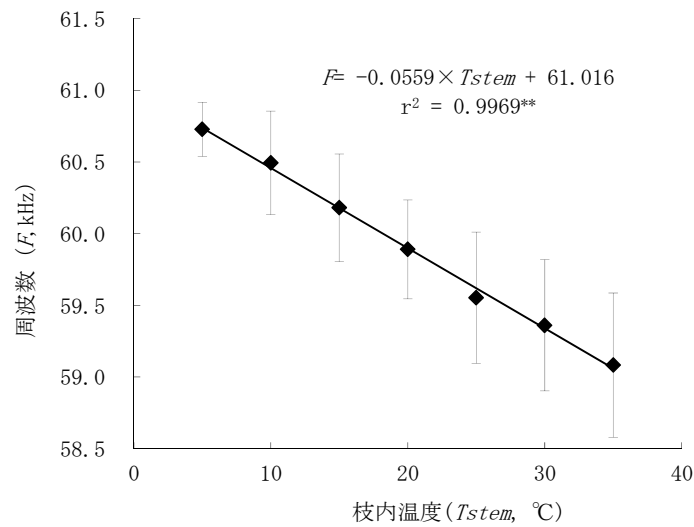
気温からの枝内温度の変換式は

$$T_{stem} = 0.6068 \times Temp + 11.468 \quad (r^2 = 0.8027, \quad Temp; \text{気温}) \cdots (2)$$

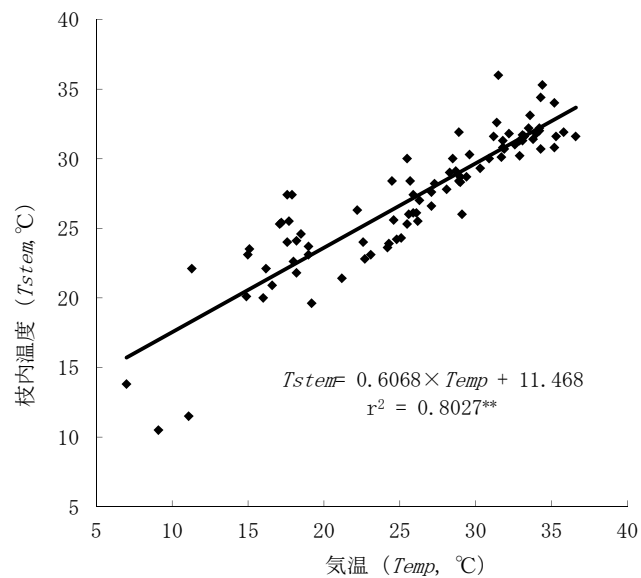
であったことから（第15図）， F_{rev} を気温をもとに算出するには（2）を（1）に代入し，温度補正前TDR周波数（以降 F_{site} ）を乗じることで得られる。つまり，

$$F_{rev}(\text{kHz}) = F_{site}(\text{kHz}) \times (0.0009(0.6068 \times Temp + 11.468) + 0.9758) \cdots (3)$$

となる。



第14図 枝内温度がTDR測定値に及ぼす影響
図中の縦棒は標準誤差を示す（n=3）
**1%水準で有意である



第15図 気温と枝内温度の相関図
**1%水準で有意である

また，以下の試験で行う相対値評価は

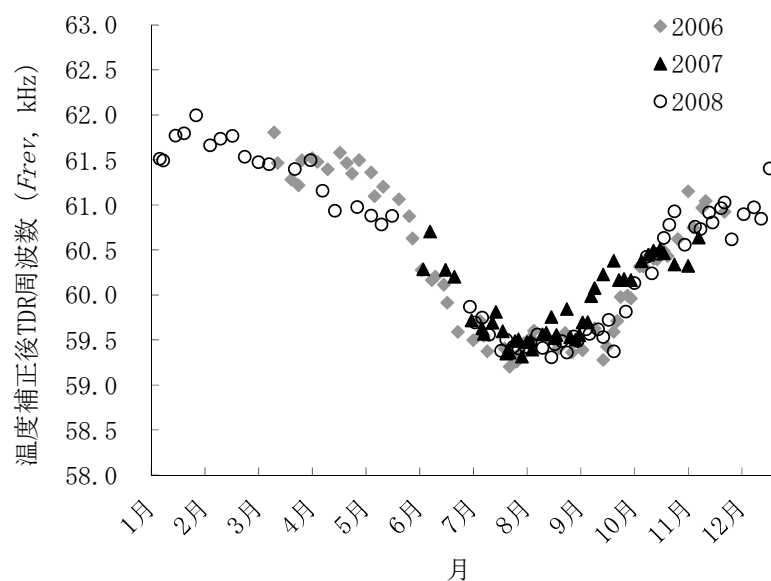
$$R_{rev} = F_{rev} \text{ (kHz)} \div F_{base} \text{ (kHz)}$$

を用いて算出した。ここで， F_{base} は基準日の温度補正後のTDR周波数を表す。

以上の方法により，温度補正と相対値の変換を行った。

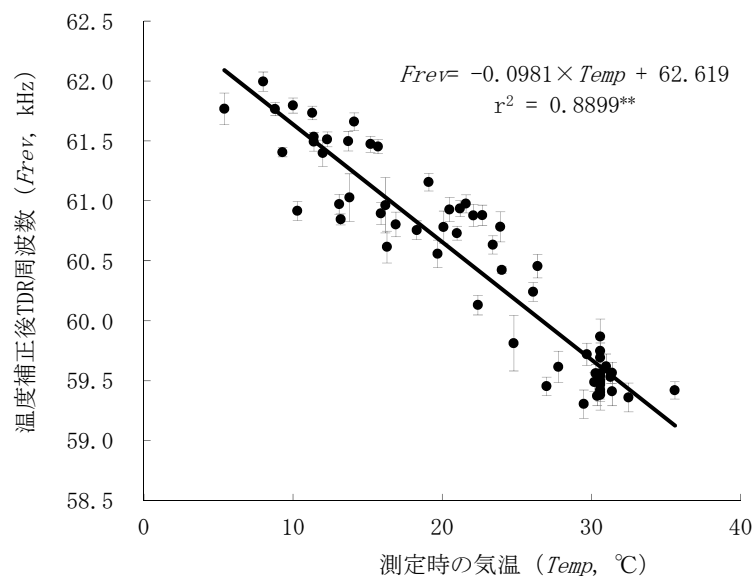
2. 相対値の基準点について

2006年の F_{rev} は3～4月まで約61.5 kHzを推移し，5月以降減少し始め6月下旬には約59.5 kHzとなった（第16図）。9月中下旬まで値は安定し，それ以降は上昇して11月には約61.0 kHzとなった。2007年は6月中旬で約60.5 kHzを示し，以降7月上旬まで減少し，約59.5 kHzで安定した。9月中旬以降から増加し，11月上旬には約60.5 kHzとなった。2008年は測定開始の7月上旬で約59.8 kHzを示し，7月上中旬以降は約59.5 kHzで微増減を繰り返した。9月下旬から上昇し，10月下旬には約61.0 kHzとなった。翌年の1月下旬に年間の最高値である約62.0 kHzを示し，4月上旬以降減少した。2007年の9月は，2006および2008年に比べ値の上昇が20日程度早かった。これは，2007年の8月5日～9月14日の降水量が，まとまった降雨のない86 mmと少なく，日照時間は日平均8.5時間と長かったことから，気象条件に対して灌水が十分でなかったと考えられる。灌水に使用した点滴灌水チューブは点滴孔周辺に細根



第16図 TDR計を用いた枝内水分の年間の推移

を増加させる（草場ら，2004）が，設置後の期間が短いため，点滴孔付近に細根が多く分布していなかったことにより樹体に水分ストレスが付与されたと考えられる。この3年間の推移より，7月上旬から9月下旬の F_{rev} は約59.5 kHzで，安定したTDR測定値を示すことから基準点に適している。測定時の気温と F_{rev} の相関は，一次回帰式で表されることから（ $F_{rev} = -0.0981 \times Temp + 62.619$ ， $r^2 = 0.8899$ ， $Temp$ ；測定時の気温，第17図），枝内水分は基本的に気温に影響されることが分かる。また，安定期の59.5 kHzとなるのは，概ね30℃以上であると認められる。以上より，相対値の基準日は，土壤の湿润状態で測定時の気温が30℃を超える時期が適していると考えられる。緒方・高原（2004）は，‘青島温州’において茎熱収支法により年間の枝内の樹液流量を測定し，気温の高い6～9月の樹液流量は $200 \sim 300 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ で，年間を通して最も高く推移する時期としている。これは，7月上旬～9月下旬に枝内水分の安定期となる本研究の年間推移とほぼ一致する。



第17図 TDR計を用いた測定値とその測定時の気温との関係
 図中の縦棒は標準誤差を示す（ $n=4$ ）
 **1%水準で有意である

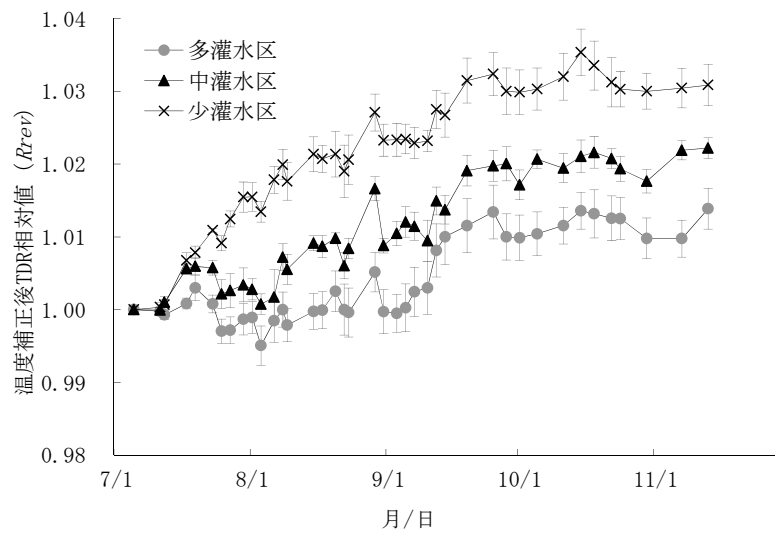
わが国のウンシュウミカンの主な産地である和歌山，愛媛および静岡の気象観測台（和歌山，宇和島および浜松）の過去十年間の気温と降雨について，最高気温30℃を超える初観測日は和歌山，宇和島で概ね6月中下旬にあり，

浜松は6月下旬～7月上旬であった。また、いずれの地点も7月上中旬以降に30℃を超える日がほとんどであった。6月下旬～7月上旬の降雨は梅雨期にあたることから、いずれの地域においても10日間で50 mm以上の降雨が観測されている。西田ら（1977）は、ウンシュウミカンの日消費水量は土壌水分含量と果実肥大の関係より2.9～3.0 mm程度としていることから、10日間で50 mmは十分な降雨量であると推察される。以上をまとめると、降雨または灌水により土壌が湿潤であり、最高気温が30℃を超える7月頃を基準点とすることが妥当であると考ええる。

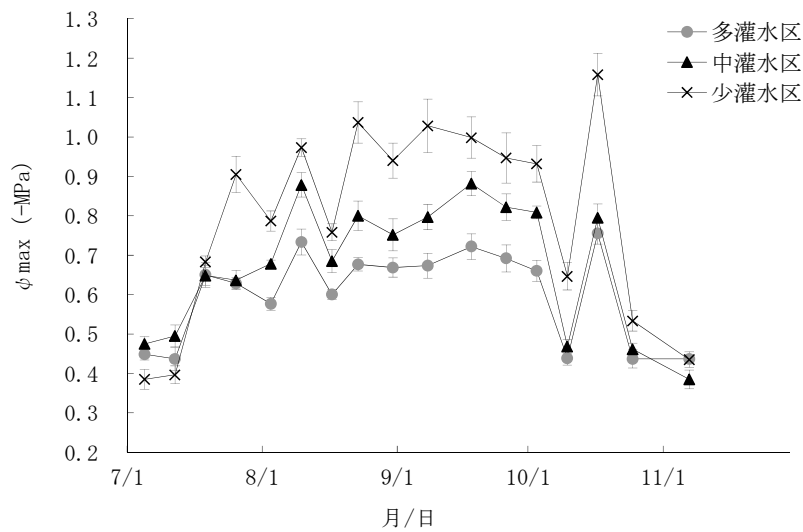
品種間による安定期の違いについては、予備試験を行った結果、本研究で用いた早生ウンシュウミカン‘原口早生’と熟期の異なるウンシュウミカン（極早生系統、普通系統）はほぼ同じ時期であった。しかし、中晩生カンキツ‘不知火’と‘はれひめ’は、ウンシュウミカンと異なり、8月上旬～9月下旬が安定期だったことから、品種によって安定期の条件が多少異なると考えられる。

3. ψ_{\max} とTDR相対値の関係

R_{rev} の季節推移について、多灌水区は基準日とした7月4日～9月上旬まで基準点の1.00前後を推移し、中灌水区は1.00～1.01、少灌水区は上昇して1.023を示した（第18図）。9月上旬以降は各区とも上昇し、10月上旬の多灌水区は1.010、中灌水区は1.020、少灌水区は1.030を示し、収穫期まで同水準を維持した。測定期間を通して多灌水区は少灌水区に比べ約0.02低く、中灌水区に比べ約0.01低く推移した。一方、 ϕ_{\max} の季節推移は各区とも処理前は-0.4～-0.5 MPaを示し、8～9月の多灌水区は-0.6 MPa、中灌水区は-0.7～-0.8 MPa、少灌水区は-0.9～-1.0 MPaを推移した（第19図）。10月上旬は約100 mmの降雨の影響により、11月上旬は灌水により、 ϕ_{\max} は各区とも一時的に高くなった。 ϕ_{\max} と R_{rev} の推移を比較すると、7月中旬～10月の間、 ϕ_{\max} と R_{rev} の各区の推移は類似し、 ϕ_{\max} の多灌水区と少灌水区は0.3～0.4 MPaの差があり、 R_{rev} は0.01～0.02の差がみられた。貝原ら（2006）は、極早生温州において ϕ_{\max} を7月中下旬から収穫まで-1.0 MPa程度を目途に水管理をすることで、高品質果実を生産できるとしている。本研究の少灌水区



第18図 異なる灌水処理区における温度補正後TDR相対値(R_{rev})の季節推移(2007)
図中の縦棒は標準誤差を示す (n=5)



第19図 異なる灌水処理区における ϕ_{\max} の季節推移 (2007)
図中の縦棒は標準誤差を示す (n=3)

の ϕ_{\max} は7月下旬以降 -1.0 MPa程度であり、その間の R_{rev} の値は多灌水区と少灌水区で有意な差がみられることから、 R_{rev} の水管理指標としての有用性が示唆される。一方、10月上旬以降の ϕ_{\max} と R_{rev} の推移は異なる。これは、測定部位が異なることと、測定値の性質が異なることが要因であると考えられる。Nilsen・Orcutt (1996) は、樹木の枝には貯留水と導管水があり、気

温の低下や水分ストレスによって導管内にキャビテーション（空洞化）が生じ、エンボリズム（塞栓症）を引き起こすと報告している。本研究のTDR水分計による枝内水分測定は主枝部を対象とし、体積含水率と相関が高いことから貯留水の量を示す。一方、 ϕ_{\max} は葉内の導管を移動する水の張力を示す。ウンシュウミカンにおいて、10月以降は気温の低下に伴い、樹体の水分状態が変化する時期で、 ϕ_{\max} は気温や地温の低下とともに徐々に低下する（間苧谷・町田，1976）。予備試験より、日最低気温が約13℃以下の場合、 ϕ_{\max} の低下がみられるが、本試験地の10～11月はこれを下回らなかったことから、 ϕ_{\max} の推移は乾燥ストレスによる影響のみと考えられる。一方、貯留水は蒸散量と関係があり、Waringら（1979）は、スコットランドマツを用いて、水収支を評価し、試験木からの蒸散量の30～50％程度は樹幹貯留水の寄与によるものであることを報告している。また、Loustauら（1996）は、蒸散として1日に消費される水の12～25％は樹幹貯留水であると述べている。小林・田中（2001）は、TDR法から求めた樹幹貯留水の変化は、樹液流量から得られた蒸散に対する根系からの吸水不足と一致することを明らかにしている。2008年に行った予備試験より、ウンシュウミカン樹の蒸散速度は、夏季～10月上旬まで $4 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度を推移するが、その後、主に気温の低下に伴い低下し、収穫時期まで $1 \sim 2 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ を推移した。これらのことから、蒸散の低下する10月以降は、根からの吸水量が低下するため、乾燥ストレスに対する R_{rev} の反応も小さくなるとともに、測定部位が主枝であることから貯留水の回復までに時間を要すると推察される。また、10月下旬以降で、 R_{rev} の各処理区の値に差異が継続することは、長期間の乾燥ストレスによって、測定部である木部の柔組織の発達に違いが生じている可能性も考えられる。

ϕ_{\max} とTDR測定値の月別相関関係について、7月の ϕ_{\max} は R_{rev} と最も相関が高く、その相関係数は0.888で、次に温度補正を行っていない R_{site} が0.832だった（第12表，第20図）。相対値化を行っていない F_{rev} と ϕ_{\max} との相関係数は0.275と低かった。8および9月の ϕ_{\max} と R_{site} 、 R_{rev} の相関係数は、0.7前後とほぼ同程度であった。10月以降は、 ϕ_{\max} と R_{rev} との相関係数は0.435とやや低く、 R_{site} や F_{rev} との相関関係は認められなかった。10月以降

の相関係数の低下は、前述のように、気温の低下に対する ϕ_{\max} と R_{rev} の反応の違いが影響したと考えられる。貝原ら（2008）は、TDR水分計を用いたVWC（温度補正なし、相対値化なし）と ϕ_{\max} との相関関係は十分認められなかった。本研究の相対値化を行っていない F_{rev} と ϕ_{\max} との相関係数は低いですが、相対値化した R_{rev} と R_{site} の相関は高いことから、プローブの挿入深度の誤差や樹皮厚による影響を除いたことで精度が向上したと考えられる。また、 R_{rev} が R_{site} に比べて ϕ_{\max} との相関が、わずかに高かったことから、温度補正による効果も若干認められる。

第12表 温度補正と相対値化によるTDR測定値と葉内最大水ポテンシャルとの相関関係

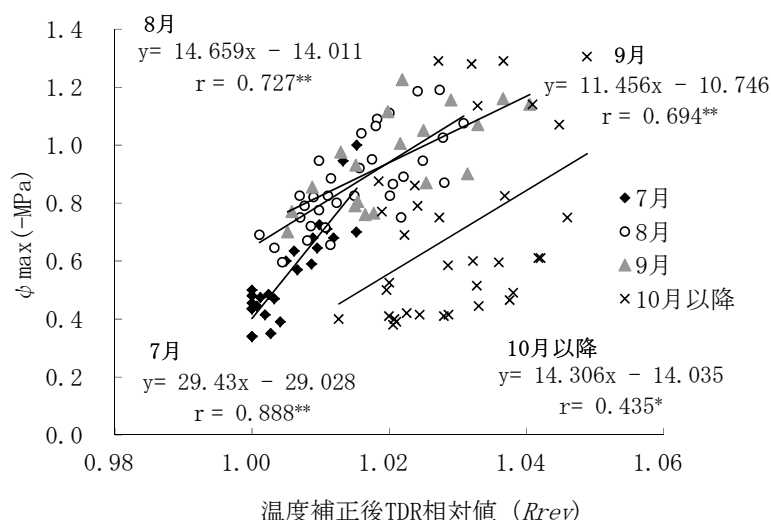
ϕ_{\max}	F_{rev}	R_{site}	R_{rev}	R_{rev} 回帰式
7月	0.275	0.832 **	0.888 **	$y=29.43x-29.03$
8月	0.232	0.705 **	0.727 **	$y=14.66x-14.01$
9月	0.060	0.699 **	0.694 **	$y=11.46x-10.75$
10月以降 ^z	0.084	0.264	0.435 *	$y=14.31x-14.04$

^z収穫直前の11月7日までとした

(n=7, 調査回数は7月は4回, 8月は5回, 9月は3回, 10月以降は5回)

表中の F_{rev} （温度補正あり, 相対値化なし）, R_{site} （温度補正なし, 相対値化あり）および R_{rev} （温度補正あり, 相対値化あり）の数値は相関係数を示し, *は5%, **は1%で有意である

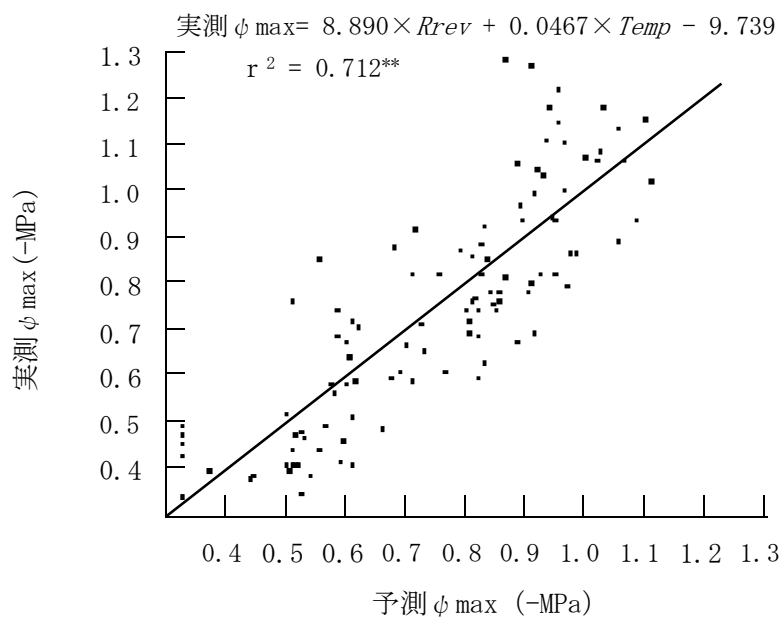
R_{rev} 回帰式のyは ϕ_{\max} , xは R_{rev} を示す



第20図 温度補正後のTDR相対値 (R_{rev}) と ϕ_{\max} との相関図(2007)

*5%水準, **1%水準で有意である

次に、気温による反応が ϕ_{\max} と R_{rev} で異なることから、 R_{rev} とその測定時の気温 ($Temp$) を変数とした重回帰分析による ϕ_{\max} の予測式をもとめた (5% 水準で外れ値と認められた3点は除外した)。その結果、予測式 (実測 $\phi_{\max} = 8.890 \times R_{rev} + 0.0467 \times Temp - 9.739$) の決定係数は0.712と高く (第21図)、 ϕ_{\max} との高い相関が認められた。このことから、第1章で明らかとなった各品種の高品質果実生産に適した ϕ_{\max} の基準をもとに、 R_{rev} を用いて管理できると考えられる。



第21図 温度補正後のTDR相対値 (R_{rev}) と気温 ($Temp$) を用いた ϕ_{\max} の重相関関係 (2007)

**1%水準で有意である

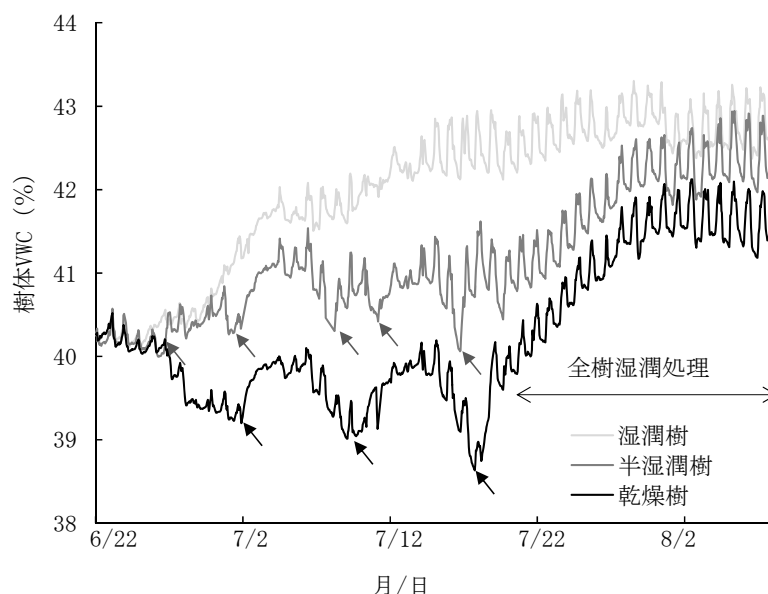
調査期間：7月5日～11月7日

TDR計による枝内水分測定は、現場の水管理指標として利用する場合、簡便な測定を必要することから、VWCに変換する検量線の作成を必要としない R_{rev} が適している。一方、学術的な利用として樹体水分変動等を測定する場合は、 R_{rev} からVWCに変換することで、プローブの挿入深度の誤差や樹皮厚および温度による影響を除いた上で、枝内体積含水率として把握することができる。田中・小林 (1996) は、樹木の各組織における水分状態や水理特性を扱った既往の文献を整理し、各組織の水貯留容量や水分特性を考慮すると、

蒸散量と関連の高い樹幹貯留水分の定量的な評価とその動態を明らかにすることがSPAC (soil-plant-atmosphere continuum, 土壌-植物-大気連続系) の水移動や水収支を理解する上で重要であるとしている。これまで、樹幹貯留水の変化を野外で継続的に測定することは難しく、報告は極めて少ないことから (小林・田中, 2001), このような分野でも利用できると考えられる。

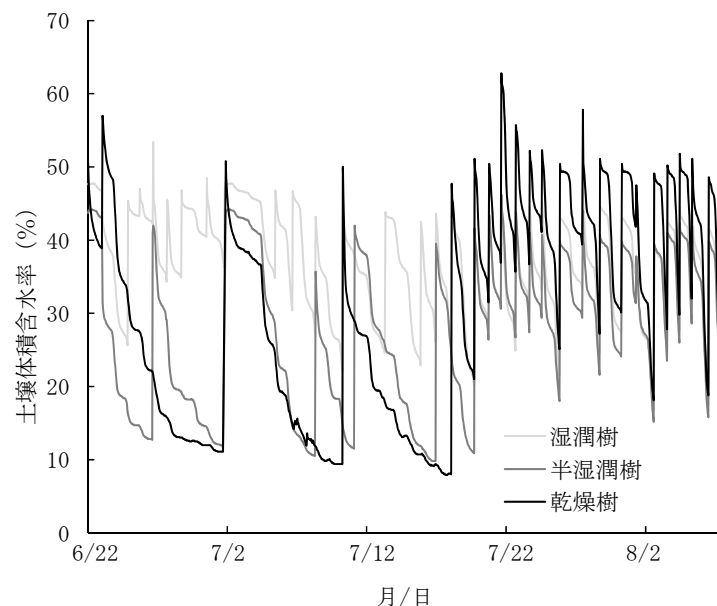
4. 自動連続モニタリング

VWC (体積含水率, $VWC = 4.4262 \times R_{rev} + 35.836$) は、処理開始から約 5 日後の 6 月 27 日から、樹間差がみられ、湿潤樹の VWC は 40.2% から上昇し、7 月中旬以降は 42~43% を維持した (第 22 図)。半湿潤樹の VWC は、処理期間中 40~41% を推移し、4 日ごとの灌水後には VWC の上昇がみられた。乾燥樹の VWC は、処理開始から低下し、39~40% を推移し、7 日ごとの灌水後は明らかな上昇が確認された。この間、湿潤樹の土壌体積含水率は 30~40% 程度を推移し、半湿潤樹および乾燥樹の土壌体積含水率は約 10% 程度まで低下した後、灌水により 40% 程度まで回復するパターンを示した (第 23 図)。これらのことから、TDR 法による VWC は土壌水分状態に



第22図 自動連続測定によるTDR枝内水分測定法を用いた樹体体積含水率の季節推移
矢印は半湿潤樹と乾燥樹の灌水を示す

対して鋭敏に反応することが明らかになり，樹体水分状態を把握できると考えられる。半湿潤樹と乾燥樹の乾燥ストレスを解除した7月21日以降は，それぞれのVWCは上昇し，8月上旬に半湿潤樹は湿潤樹と同程度の42～43%を推移し，乾燥樹はやや低い41～42%を推移した。この結果から，乾燥ストレスを付与した樹のVWCは，湿潤状態のVWCに戻るまで10日程度を要することが明らかとなった。また，細かな波形は日変化を示し，この増減は乾燥ストレスによる影響に比べて小さいことが認められる。以上より，自動連続モニタリングは，VWCの変動を詳細に明らかにできることから自動灌水技術や枝内水分の動態解明に利用できると考えられる。



第23図 異なる灌水処理における土壌水分の季節推移

第3章 高品質果実生産を目的とした台木育成のための選抜指標の開発

台木の枝内水分通導性を利用した樹冠拡大能力の早期予測法

緒言

果樹の栽培において、台木の利用は繁殖目的以外にいくつかの理由で選択される。カンキツの台木は、品種・系統別に耐病性、耐塩性、土壌 pH、樹勢、果実品質などを評価し (Banuls and Primo-Millo, 1995; Forner-Giner ら, 2003; Kawase ら, 1987; Roose ら, 1989; Wutscher, 1979), 生産国はその地域特性や穂木品種に合わせて台木の選択を行っている。日本では、半わい性のカラタチ (*Poncirus trifoliata* (L.) Raf.) がすべてのカンキツ品種に対して利用され、この 1 種類への偏りは世界的にも珍しい (吉田, 1995)。そのため、普通ウンシュウのような樹勢の強い品種に利用した場合、栄養成長が強いことから、省力的とされるコンパクトな樹形を維持することは難しく、果実の糖度も低い。わい化と果実糖度は関連性が高いことから (河瀬, 1972; Hutchison, 1977; 池田ら, 1978), 高品質化を目的にわい性台の‘ヒリュウ’を利用する研究も行われている (米本ら, 2005)。¹ ‘ヒリュウ’は、カラタチの変異系で、枝やトゲは屈曲する特徴があり、Bitters ら (1979) は、台木として利用した場合、樹が小型化することを明らかにした。しかし、‘ヒリュウ’のわい化効果は強く、生育不良や低収量の問題があることから、利用は限定的とされる。そこで、穂木品種に合わせた樹勢の台木を作出することは、同時に高品質果実生産に適した台木の育成に繋がると考え、カラタチや‘ヒリュウ’とは異なる樹冠拡大能力を有する台木の作出を目標としている。しかし、台木の育種は、樹冠拡大能力を確認するまで、長期間を要し、その間多大な労力と圃場を必要とする。そこで、効率的な台木の作出を目的として、台木の樹冠拡大能力を早期に選抜する技術の開発を試みた。

Syvertsen (1981) はカンキツの台木において、4 品種の 6 か月齢実生の根水分通導性を測定し、強勢台のラフレモンがサワーオレンジやクレオパトラマンダリンより高い水分通導性であることを明らかにした。水分通導

性と樹の生育の関係はリンゴ (Atkinson ら, 2003), キウイフルーツ (Clearwater ら, 2004), オリーブ (Nardini ら, 2006), モモ (Nakano ら, 2004) においても研究され, Muramatsu・Hiraoka (2008) はブドウとキウイフルーツが主要な温帯性の果樹 19 種の中で最も高い通導性を示すことを明らかにした。しかし, これまで台木用の多数の交雑系統を用いた樹体生育と台木通導性の関係を明らかにした報告はなく, 樹冠拡大能力の早期選抜手法の開発を目的とした報告もない。そこで, 交雑した 11 系統と対照品種の 4 品種 (系統) を用いて, それらを台木として用いた 7 年生樹の樹冠拡大と 5 か月齢の水分通導性を含む台木実生特性の関係を明らかにすることで, 早期選抜技術として利用可能な技術を検討した。

第13表 供試台木の品種 (系統) 名とウンシュウミカンに接いだ樹の反復数

台木品種 (系統) の略語	台木 (系統) 品種名	反復樹
交雑種		
A	‘サンキツ’ × ‘ルビドー’ w-1	5
B	‘サンキツ’ × ‘ルビドー’ w-2	3
C	‘サンキツ’ × ‘ルビドー’ w-3	5
D	‘サンキツ’ × ‘ルビドー’ w-8	5
E	‘サンキツ’ × ‘ルビドー’ w-9	5
F	‘サンキツ’ × ‘ルビドー’ w-19	6
G	‘サンキツ’ × ‘ルビドー’ w-21	4
H	‘サンキツ’ × ‘ルビドー’ w-23	4
I	‘サンキツ’ × ‘ルビドー’ w-28	4
J	‘サンキツ’ × ‘ルビドー’ w-30	3
K	‘シクワサー’ × ‘ルビドー’ No. 4	5
コントロール品種		
P	普通系カラタチ	9
Pm	‘ボメロイ’	6
Sc	‘スイングル’ シトルメロ	3
Us	‘USDA’	5
FD ^z	‘ヒリュウ’	—

^z 5か月齢の台木実生の特性調査にのみ供試した

材料および方法

供試材料

1990 年に，果樹研究所興津拠点で‘サンキツ’(*Citrus sunki* (Hayata) hort. Ex Tanaka)にカラタチ系統の‘ルビドー’を交配した 10 系統と‘シクワーサー’(*C. depressa* Hayata)に‘ルビドー’を交配した 1 系統を，台木としての基本特性（CTV 抵抗性，種子獲得性，多胚性等）を有することから選抜し供試した。また，対照品種として‘スィングル’シトルメロ(*C. paradise* Macfad×*P. trifoliata* (L.) Raf.)と 3 種のカラタチ系統（普通系，‘USDA’，‘ポメロイ’）およびカラタチの変異系‘ヒリュウ’を用いた。普通系カラタチは，日本で一般的に用いられている系統で，ウンシュウミカンの台木として利用した場合，‘ルビドー’台，‘USDA’台および‘ポメロイ’台の葉は，普通系カラタチ台の葉に比べて，光合成速度が速く，樹体生育は‘ルビドー’が旺盛で，‘USDA’と‘ポメロイ’は普通系カラタチにやや劣る（Morinaga・Ikeda, 1990）。

1. 台木として使用した樹の管理方法と台木実生の栽培方法

台木として使用した樹の栽培について，1999 年に‘ヒリュウ’を除く前述の 15 品種・系統を播種し，2001 年に‘させば温州’(*C. unshiu* Marcow.)を接ぎ木した。それらの 1 年生苗は，1 品種・系統当たり 3～9 樹を果樹研究所口之津拠点の圃場に無作為抽出法を用いてランダムに定植した（第 13 表）。植栽間隔は 2 m×6 m とし，整枝法は 3 本主枝の開心自然形とした。着果は 4 年生から葉果比で 25 に調整し，7 年生までの生育を評価した。その他の管理は，慣行の方法に従った。

台木実生の栽培方法について，2009 年 3 月 30 日に‘ヒリュウ’を含む前述の 16 品種の種子を鹿沼土に播いた。播種後は，暗室で気温 25℃の高温環境下で発芽を促した。実生はポットに植え換え，生育期間中は気温 35℃以下のガラス室内で管理した。肥料は 1 か月に 1 回行い，病虫害の防除は適宜行った。腋芽が出る場合は芽かきを行い，単幹に仕立てた（第 24 図）。実生の特性評価は，5 か月齢の時点で行った。

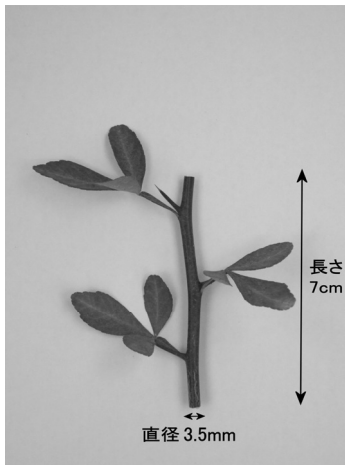


第 24 図 5 か月 齢 の 台 木 実 生

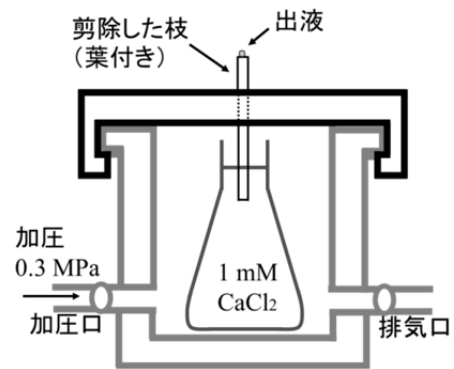
2. 台木として使用した樹の生育評価と台木実生の特性評価

台木として使用した樹の生育評価について，幹周，樹冠容積および樹高を，1～7 年生の間，毎年の冬に測定した。幹周は接ぎ木部から 10 cm 上部を測定し，樹冠容積は樹を半球体として樹高と樹幅から算出した。

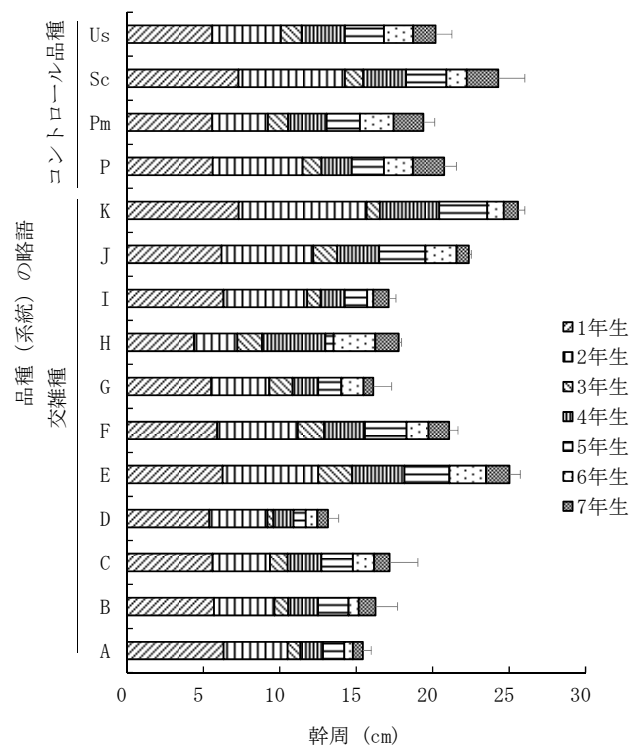
5 か月 齢 の 台 木 実 生 の 特 性 評 価 に つ い て ， 枝 内 水 分 通 導 性 は 2009 年 8 月 25～28 日に測定し，Syvertsen (1981) の方法を参考とした。水分ストレス，気温および光条件による水分通導性の影響を排除するため，測定前日にポット樹に十分量の灌水を行った後，25℃の暗室に入れた。測定当日，それらの実生を枝径 3.5 mm の部位で水切りを行い，その上部 7 cm で枝を剪除した（第 25 図）。この枝片をプレッシャーチャンバー（Model 600, PMS 社製）に設置し，1 mM CaCl_2 溶液を入れたチャンバー内のフラスコに枝片の下端部をその溶液に浸漬するように設置した（第 26 図）。加圧は 0.3 MPa とし，加圧後の 30 秒間は枝内の気泡を排出させた。その後，同圧で 3 分間，枝からの出液をろ紙に吸水させた。吸水後，ろ紙の重量変化から単位時間当たりの出液量を算出し，枝内水分通導性の値とした。なお，1 mM CaCl_2 の比重は 1 として計算した。その他の生育特性評価として，地表面から第一葉の間の幹径，樹高および地上部と地下部の乾物重を測定した。全ての調査において，品種・系統当たりの反復数は 4 樹とした。



第 25 図 枝内水分通導性の測定
サンプル



第26図 枝内水分通導性の測定方法



第27図 異なる台木に接いだウンシュウミカン樹の幹周の年次変化
品種 (系統) の略語は第13表に対応する
図中の横棒は標準誤差を示す (n=3-9)

結果

1. 異なる台木に接いだウンシュウミカン樹の生育

K (第 13 表 参照) は 7 年生時で最も幹周が大きく、強勢台の対照品種で

ある Sc と同程度で、最も小さい台木は D だった（第 27 図）。カラタチの 3 品種（P, Us, Pm）は同程度の幹周で、全体の台木の中では中間の大きさ示した。1 年生から 7 年生までの幹周の増加パターンは台木間でほぼ同様であったが、H のみ 3 年生時は最も低い幹周であったものの、7 年生時は 9 番目の太さとなった。樹高は E が最も高く、対照品種の 4 種はこれと同程度で、最も低い台木は D だった（第 14 表）。樹冠容積は E, K が Sc と同程度で大きく、A, D, G, I は小さかった。

第14表 異なる台木に接ぎ木した7年生ウンシュウミカン樹の樹高と樹冠容積

台木品種（系統） の略語 ^z	樹高（cm）	樹幹容積（m ³ ）
交雑種		
A	112 cd ^y	1.49 de
B	122 bcd	2.50 cde
C	132 abc	3.25 bcd
D	106 d	1.18 e
E	157 a	6.20 a
F	143 ab	4.58 abc
G	114 cd	2.00 de
H	138 abc	2.81 cde
I	110 cd	1.60 de
J	147 ab	4.42 abc
K	149 ab	5.48 a
コントロール品種		
P	152 a	4.80 ab
Pm	145 ab	4.53 abc
Sc	152 ab	5.64 a
Us	150 ab	4.42 abc

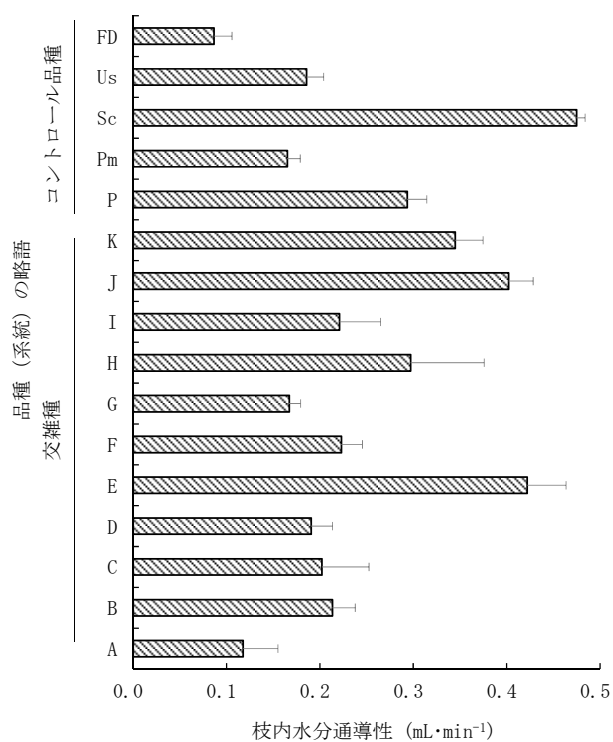
^z 品種（系統）の略語は第13表に対応する

^y 異なるアルファベットはTukey-Kramerの多重検定により5%水準で有意差あり

2. 異なる台木実生の特性

枝内水分通導性について、強勢台の Sc は最も高く 0.475 mL・min⁻¹ で、半わい性台の P は 6 番目に高い 0.294, Pm と Us はそれより低く約 0.17 だった（第 28 図）。わい性台の FD は最も低く 0.087 だった。幹径について、Sc は最も太く 5.89 mm で、P の 4.74 mm がそれに次いだ（第 15 表）。また、

わい性台の FD は K に次いで 4 番目の太さで，C と F は最も細かった。樹高は P が最も高く，Sc は比較的 low かった。地上部の乾物重は，P と Sc は他の品種に比べ高い値を示し，A，C，Pm の値は低かった。細根乾物重は，P と Sc の値が高く，太根乾物重は，Sc の値が最も高く，K と P がこれに次いだ。TR 率は，B と F が K と Sc に比べ高かった。



第28図 5か月齢の台木実生の枝内水分通導性
品種（系統）の略語は第13表に対応する
図中の横棒は標準誤差を示す (n=4)

第15表 5か月齢の台木実生の生育特性

品種（系統） の略語 ^z	幹径 (mm)	樹高 (cm)	地上部乾物重 (g)	細根乾物重 ^y (g)	太根乾物重 ^x (g)	T-R率
交雑種						
A	4.04 bcd ^w	52 de	3.15 cd	0.31 d	0.60 c	3.56 abc
B	4.01 bcd	67 abcd	3.86 bcd	0.41 bcd	0.52 c	4.19 a
C	3.65 d	51 e	3.17 cd	0.34 cd	0.57 c	3.52 abc
D	3.96 bcd	64 abcde	3.81 bcd	0.56 bcd	0.71 bc	3.08 abc
E	4.36 bcd	65 abcde	4.55 abcd	0.67 bc	0.73 bc	3.25 abc
F	3.62 d	70 abc	4.12 abcd	0.50 bcd	0.53 c	4.15 a
G	3.93 bcd	61 bcde	3.78 bcd	0.46 bcd	0.65 c	3.39 abc
H	4.55 bc	74 ab	4.69 abcd	0.59 bcd	0.72 bc	3.74 ab
I	4.13 bcd	67 abc	4.48 abcd	0.64 bcd	0.59 c	3.70 ab
J	4.39 bcd	76 ab	5.32 ab	0.75 ab	0.80 bc	3.49 abc
K	4.72 b	62 bcde	4.95 abc	0.62 bcd	1.15 ab	2.80 bc
コントロール品種						
P	4.74 b	80 a	6.07 a	1.04 a	0.98 abc	3.04 abc
Pm	3.77 cd	59 cde	3.00 d	0.42 bcd	0.51 c	3.25 abc
Sc	5.89 a	56 cde	5.65 ab	1.07 a	1.38 a	2.31 c
Us	4.00 bcd	69 abc	3.76 bcd	0.64 bcd	0.58 c	3.09 abc
FD	4.63 bc	63 bcde	3.88 abcd	0.45 bcd	0.85 bc	3.10 abc

^z 品種（系統）の略語は第13表に対応する^y 細根<直径2mm^x 太根>2 mm^w 異なるアルファベットは Tukey-Kramerの多重検定により5%水準で有意差あり

3. 異なる台木に接いだウンシュウミカン樹の生育とそれに対応した台木実生特性との関係

7年生樹の生育と5か月齢の台木実生特性の関係について、最も高い相関を示したのは、枝内水分通導性（5か月齢実生）と幹周（7年生樹）で、その回帰直線の決定係数は0.633だった（第16表）。さらに、対照品種は概ねその回帰直線上にあった（第29図）。その他の関係については、地上部と地下部の乾物重が、7年生樹の幹周と相関があり、決定係数は0.355と0.395だった（第16表）。5か月齢の実生の幹径と樹高は、7年生樹の幹

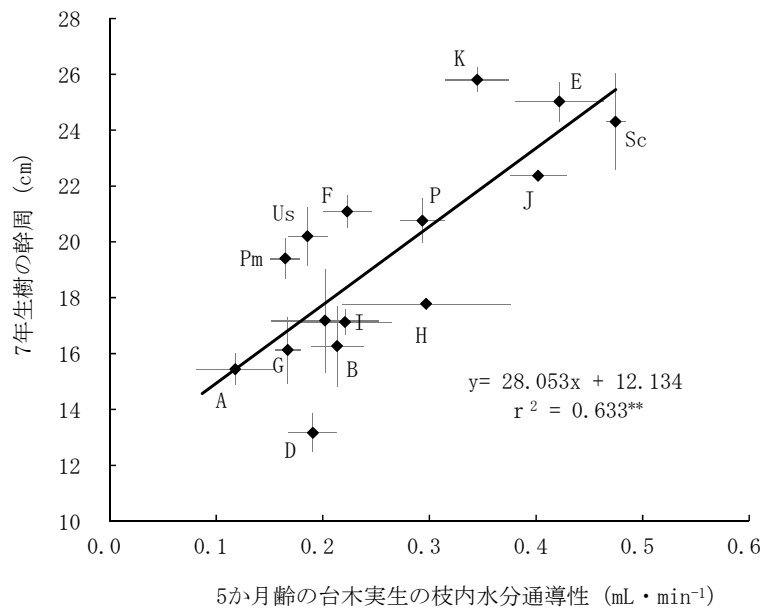
周との間で相関はみられなかった。また、7年生樹の樹高および樹冠容積は、5か月齢の枝内水分通導性を含む全ての特性との間に相関はほとんどみられなかった（データ省略）。これらの結果から、5か月齢の実生の枝内水分通導性が最も精度良く台木として利用した場合の樹の生育を評価できることが示された。

第16表 異なる台木を用いた7年生ウンシュウミカン樹の幹周とそれに対応した台木実生の生育特性との相関

	5か月齢の実生				
	枝内水分通導性	幹径	樹高	地上部乾物重	地下部乾物重
7年生幹周	0.633**	0.313	0.027	0.355*	0.395*

表中の値は決定係数を示す

* 5%, ** 1%で有意である (n = 15)



第29図 7年生ウンシュウミカン樹の幹周と5か月齢の台木実生の枝内水分通導性との相関関係

**1%水準で有意である

図中の縦横棒は標準誤差を示す（縦棒：n=3-9，横棒：n=4）

図中のアルファベットは第13表に対応する

考察

1. 異なる台木に接いだウンシュウミカン樹の生育

樹冠拡大の評価は、樹冠容積と幹周を用いる報告が多い (Castle ら, 2010; Constantin ら, 1979; Kawase ら, 1987; Roose ら, 1989)。本研究における樹冠容積は、反復樹の標準誤差が幹周に比べて大きく、複雑な樹形を正確に評価するには課題を残す。一方、幹周は、標準誤差も小さく、Shinozaki ら (1964a, 1964b) による、一定の太さの枝には一定の葉が着生するパイプモデルの観点からも妥当な評価方法と考えられる。

Wheaton ら (1991) は ‘スィングル’ シトルメロ台が ‘ハムリン’ オレンジ, ‘バレンシア’ オレンジ, ‘マーコット’ タンゴールおよび ‘レッドブッシュ’ グレープフルーツに対し半強勢台であるとし, ‘ヒリュウ’ をわい性台とした。野田ら (2001) は極早生温州ミカン ‘山川’ において, ‘スィングル’ シトルメロ台がカラタチ台と ‘ヒリュウ’ 台に比べ強勢であることを報告している。本研究についても, カラタチの系統である普通系カラタチ, ‘USDA’ および ‘ポメロイ’ は ‘スィングル’ シトルメロ台に比べて幹周の肥大は緩慢であった (第 27 図)。よって, 本研究で用いたウンシュウミカン樹の幹周は, 台木の違いによる樹冠拡大を適切に反映した考えられる。

2. 実生の枝内水分通導性

Syvertsen (1981) は, 台木として使用される 4 品種の根水分通導性を測定し, 強勢台の ‘ラフレモン’ が ‘サワーオレンジ’ や ‘クレオパトラ’ マンダリンに比べ高い通導性であることを明らかにした。本研究では, 強勢台の ‘スィングル’ シトルメロが最も高い水分通導性を示し, 半わい性台のカラタチ 3 品種はそれより低く, わい性台の ‘ヒリュウ’ は最も低かった。このことから, 本研究で用いた 5 つの対照品種の枝内水分通導性はわい化程度に明確に反映していたと考えられる。Yonemoto ら (2004) は, ‘ヒリュウ’ を台木としたウンシュウミカン樹における, 果実発育期間中の枝内樹液流量が, カラタチ台のそれに比べて低いこと明らかにした。本研究で, ‘ヒリュウ’ の枝内水分通導性は他の品種に比べて最も低かったこ

とから、低い水分通導性により樹液流量が低下することが、わい化の一因と推察される。

3. 枝内水分通導性による樹冠拡大能力の予測

緒方ら（1999）は、皮接ぎ法による樹冠拡大を予測する方法を開発し、10年生の‘大谷’イヨの地上部乾物重を寄与率61%の精度で説明できるとした。皮接ぎ法は、台木実生の主幹に別の台木の樹皮を皮接ぎすると、相対的に樹勢の弱い台木の樹皮を接いだ部分が太くなる現象を利用した方法である。この皮接ぎ法による判定は、台木種子を播いた後3年以上を要し、皮接ぎ用苗の育成や皮接ぎの技術を必要とする。一方、本研究で行った枝内水分通導性は、樹冠拡大を皮接ぎ法とほぼ同程度の寄与率63%で説明でき、操作も簡便で交配種子の獲得から1年以内の短期間に選抜することができる。また、水分通導性による選抜法は1サンプル当たり約5分で測定できることから、年間数百個体の判別を行うことができ、皮接ぎ法がこれまで数十個体であったのに比べると、飛躍的にサンプル数を増やすことができる。有望な台木の作出には、サンプルの母数の大きさが重要であることから、本法によって選抜が加速できると期待される。

実際の枝内水分通導性を用いた台木の選抜では、樹冠拡大能力が既知の対照品種（普通系カラタチ、‘スィングル’シトルメロおよび‘ヒリュウ’等）を用いて、相対的に判断することで利用できると考えられる。

本研究で水分通導性の低かったヒリュウは、‘あまか’、‘天草’およびウンシュウミカンでカラタチ台に比べ高糖度の果実を生産する（矢羽田ら、2003；米本ら、2005）。今後は、水分通導性を用いて高品質果実生産に適した台木の作出を行うとともに、水分通導性と果実品質の関係を詳細に明らかにすることが望まれる。

総合考察

カンキツの消費拡大には、消費者のニーズに合わせた糖度の高い果実を生産することが、方策の一つとしてあげられる。増糖技術には、乾燥ストレス付与、着果負担の利用、環状剥皮処理、わい性台木の利用、エチクロゼート剤の利用がある（平井，1992；Hodgson and Eggers，1938；井上ら，2002；禿・平井，1982；間苧谷・町田，1980；鈴木ら，1977；Verreynneら，2001）。乾燥ストレス付与は、シートマルチ栽培，根域制限栽培，高畝栽培などの栽培方法があり，着果負担を利用した後期重点摘果，わい性台木の利用，エチクロゼートの利用も乾燥ストレスがかかりやすい状態となる（井上ら，2005；真子・広部，1984；矢羽田ら，2003）。これらの増糖技術は，樹体の水分生理と密接に関係し，適切な乾燥ストレス付与によって高糖度果実生産が行われる。乾燥ストレスによる増糖効果は，果実の小玉化による濃縮効果，果実内成分（じょうのう膜・果皮など）の糖化および果実のシンク活性の上昇に伴う光合成産物の分配率の上昇によって生じることが報告されている（Kadoya，1973；坂本・奥地，1970；Yakushiji ら，1996；Yakushiji ら，1998）。本研究は，主に糖度に着目した高品質果実の安定生産技術の開発を目的とし，先進的な生産者向けの技術であるシートマルチ栽培による乾燥ストレスの制御について，第1章で乾燥ストレスの効果的な水管理方法の解明，第2章で乾燥ストレスの診断技術の開発を行った。また，カンキツ類全般の糖度を底上げするための技術として，第3章で高品質果実生産に適した台木の作出を目的とする台木選抜技術の開発を行った。

第1章では，高品質果実生産のための水管理方法の検討を行った。乾燥ストレスは，果実の増糖効果があるものの，減酸や果実肥大を抑制することから，効果的なストレス時期を特定する必要がある。そこで，Myers(1988)による積算水分ストレス法を応用し，葉内最大水ポテンシャル（以降 ϕ_{max} ）の積算水分ストレス（以降 $S\phi$ ）を用いて月別あるいは期間別の糖度，酸度，果実肥大との関係解明を試みた。

第1節の早生ウンシュウミカンでは，7～9月で $S\phi$ と増糖量に正の相関があった。また，10月以降についても，長期間乾燥ストレスを付与した処

理区を除くことで、増糖効果が確認された。予備試験で、 ϕ_{\max} を -1.0 MPa に維持した場合、見かけの光合成速度は 2~5 割低下することから、長期間の乾燥ストレスは、慢性的な光合成能力の低下を引き起こし、同化産物の減少によって増糖効果が相殺されたと推察される。よって、10 月以降についても、増糖効果があると考えられる。次に、増糖効果の強度は、 $S\phi$ と月増糖量との回帰直線の傾きとして表われ、二つの回帰直線の傾きの検定(川端, 1978) より統計的に強弱を判別できる。7 月中下旬~10 月以降 (10 月以降のデータは 2010 年のみを利用) の $S\phi$ と増糖量の回帰直線の傾きを検定した結果、7 月中下旬と 8 月の回帰直線の傾きは、10 月の傾きに比べ有意に高かった。このことから、果実発育期の前半の方が増糖効果は高いことが認められる。以上より、積算水分ストレス法を用いて、乾燥ストレスによる増糖効果のある時期と強度を定量的に判断することができた。

$S\phi$ と酸との相関は、認められなかった。これは、乾燥ストレスによる変化量の大きさと果実間のサンプル誤差が関係していると考ええる。相関係数が明確に表われる増糖量の場合は、乾燥ストレスによる 1 か月当たりの変化量が最大で約 2 度程度に対して、果実間の標準誤差は約 0.2 度である。一方、減酸量と同変化量は最大で約 0.2% に対して、果実間の標準誤差は、約 0.1% である。つまり、果実サンプル間の標準誤差に対して乾燥ストレスによる変化量の大きい糖度の場合は、相関関係が明確に表われるのに対して、酸は果実間の標準誤差に比べて乾燥ストレスの変化量が小さいため、乾燥ストレスの影響がマスキングされる。よって、酸のような形質は、相関係数が中程度の場合でも、乾燥ストレスによる影響がある可能性は高いと考えられる。実際に、処理区の季節推移より、2007 年の強乾燥区は、9 月中旬以降より弱乾燥区と差が生じ、2010 年の後半乾燥区は通期乾燥区と同程度の酸の高い果実となり、10 月以降の積算水分ストレスと月減酸量との相関係数は -0.459 だった。このことから、9 月あるいは 10 月以降に与える乾燥ストレスは、収穫時の果実を高酸にすると推測される。

$S\phi$ と果実肥大との関係について 7 月中旬~9 月は高い相関があったが、10 月以降の相関は認められなかった。2010 年の各区の果実横径の推移より、10 月以降についても乾燥ストレスと果実肥大に対応関係があると推量さ

れる。そこで、2007 年と 2010 年の相関分析を別々に行ったところ、2010 年の相関係数は-0.73 で有意な相関がみられたが、2007 年に相関関係は認められなかった。これには二つの要因があると考えられる。一つは、乾燥ストレス中あるいはストレス後の果実が、灌水や降雨によって急激に肥大することがあり（間苧谷・町田，1977），このようなサンプルを含む場合は、相関図のプロットが乱れることで相関係数は低下する。二つ目は、果実肥大は、日射量や果実周辺部の温度によって肥大速度が異なることから（富永・大東，1982；宇都宮ら，1982），複数年の結果を解析した場合、年毎で異なる直線性を示す可能性があり、相関係数が低下することが考えられる。つまり、2007 年は 10 月下旬以降に湿潤状態となったことから、中乾燥区と強乾燥区の肥大が促進されたことと、2007 年の弱乾燥区の 10 月から 11 月 12 日までの肥大量が 6 mm に対して、2010 年の同様の条件である湿潤区は 9 mm で、肥大速度に異なりがあったことが要因と考えられる。以上のことから、果実発育期間中の乾燥ストレスは時期に限らず果実を小玉化させると推察される。

以上をまとめると、高品質果実生産に適した乾燥ストレス時期は、増糖効果が高く、減酸の抑制も小さいと思われる 7 月中旬～8 月だった。本試験地における、7 月中旬の早生ウンシュウミカンの果実横径は約 35mm で、果汁が蓄積し始める時期に相当することから、この生育ステージより約 2 か月程度が効果的な乾燥ストレス時期と認められる。2010 年の前半乾燥区は、この条件とほぼ同時期に乾燥ストレスを付与した処理区であり、収穫時期の果実品質は、湿潤区に比べ糖度は 2.8 度高く、酸度は 0.16% 高いものの有意な差ではなかった。このことから、早生ウンシュウミカンにおける高品質果実生産に適した乾燥ストレス時期が明らかとなった。但し、果実肥大は抑制されることから、小玉による商品の低下が見込まれる場合は、着果量を調節することで対応できると考えられる。

積算水分ストレス法を用いた果実形質との時期別の相関分析は、定量的にその関係を明らかにすることができる。特に、糖度との相関は、増糖効果のある時期を明確に判別でき、その回帰直線の傾きは増糖効果の強さを表すことから、効果的な増糖時期を明らかにすることができる。しかし、

その利用の際、乾燥ストレスに対する対象形質の特性や、乾燥ストレスによる対象形質の変化量とサンプル誤差との関係を把握した上で使う必要があると考えられる。

第2節の‘不知火’は、8～9月の $S\phi$ と増糖量との間に正の相関があり、2009年の8～9月に乾燥ストレスを付与した夏乾燥区は、湿潤区に比べ収穫時の糖度は1.9度高くなった。2010年の8月乾燥区は一時的に糖度が上昇したものの、処理後の湿潤状態によって糖度は低下し、湿潤区との差は無くなった。このことから、果実発育前期の8～9月の乾燥ストレスは増糖効果が認められるものの、1か月程度の乾燥ストレスは収穫期の果実の糖度上昇につながらないことが明らかとなった。酸度について、8～9月に $S\phi$ と減酸量との間に負の相関があった。また、収穫時の酸度について、湿潤区に比べて高い処理区は、2008年の秋冬乾燥区と2009年の夏秋乾燥区で、2010年の冬乾燥区は酸度に影響がみられなかったことから、10～11月の秋季の乾燥ストレスについても減酸を抑制させると推察される。果実肥大について、8～9月と12月以降に $S\phi$ と肥大量との間に負の相関があった。10～11月についても、10月下旬以降の乾燥ストレスを付与した秋冬乾燥区の果実は湿潤区に比べ小玉化したことから、果実肥大期間中は時期に限らず乾燥ストレスにより、肥大速度は低下すると考えられる。

露地栽培の‘不知火’は収穫直前の水腐れ症、鳥害、寒害等を回避する目的で、早期に収穫されることが多い。そのため、糖度が基準に満たない低品質の果実が散見されている。2009年の本試験地における無袋栽培の水腐れ症の発症率は、通常収穫期の2月17日で約25%だったのに対し、早期収穫の1月14日は0%だった。また、鳥害についても、2月17日は約34%に対して、1月14日は約2%だった。2009年の夏乾燥区は、積算水分ストレスにより増糖効果の認められる8～9月に乾燥ストレスを付与した処理区で、早期収穫期に当たる1月14日の糖度は基準値を上回る14.6度で、湿潤区の12.3度に比べて有意に高く、酸度の影響は無かった。本試験地における8月上旬の‘不知火’の果実横径は、約50 mmで、果汁の蓄積し始める時期に相当することから、このステージより2か月程度の乾燥ストレスは、早期収穫時においても糖度は高く、水腐れ症や鳥害を回避でき

ると考えられる。一方で、果実横径は夏乾燥区が 85.9 mm に対して、湿潤区は 89.7 mm で有意に小さかったことから、果実肥大の低下は避けることができない。また、酸度が高くなる可能性もあることから、果実肥大に関連の高い摘果の技術や、収穫後の減酸促進に効果のある貯蔵温度の設定を組み合わせ、早期収穫による水腐れ症を回避するとともに品質を低下させない栽培体系を確立する必要がある。

第 3 節の‘はれひめ’は、ウンシュウミカンと同様に、通常の管理では果実の糖度が低いことから、乾燥ストレスによる効果的な増糖時期の解明を必要とされている。 $S\phi$ と増糖量との相関関係より、増糖効果は 8～10 月にあり、その強度は 8 月が 10 月に比べて有意に高かった。また、酸度について、10～11 月の $S\phi$ と減酸量との間に、負の相関があり、果実肥大は、10 月に $S\phi$ との間に負の相関があった。本試験地における 8 月上旬の‘はれひめ’の果実横径は、約 40 mm で、果汁の蓄積し始める時期に相当することから、このステージより 2 か月程度の乾燥ストレスは、増糖効果が高く、減酸の抑制に影響の少ない時期と考えられる。2010 年の前半乾燥区は、この条件とほぼ同時期に ϕ_{\max} で $-0.7 \sim -1.0$ MPa の乾燥ストレスを付与した処理区で、乾燥ストレスを付与しない湿潤区に比べ、収穫期の果実糖度は 2.5 度高い 13.4 度で、酸度は 0.08% 高いが有意な差では無かった。このことから、‘はれひめ’における高品質果実生産に効果的な乾燥ストレス時期と強度が明らかになった。

水分ストレスによる糖および酸含量の変化について、坂本・奥地 (1970) は果肉中の水分減少による濃縮の影響とし、Kadoya (1973) は水分の供給不足に基づく物理的な濃縮以外に、乾燥下では果実に転流した光合成産物の多糖類への生合成系が抑制されること、また果実中の細胞壁構成多糖類が加水分解されることも糖含量を上昇させる一因としている。また、Yakushiji ら (1996, 1998) は、果実のシンク活性の上昇に伴う光合成産物の分配率の上昇によって、糖含量が上昇することを明らかにしている。本研究の果実重は乾燥区が 1 割程度小さくなったが、グルコース、フルクトースおよびスクロースのいずれにおいても乾燥区が 1.5～1.9 倍だったことから、水分減少による濃縮のみではないと考えられる。この点につい

ては、それぞれの要因がどの程度糖含量に影響するか、今後の研究が必要である。食味に及ぼす影響は、一般にスクロースの甘味度を1とすると、グルコースは0.74、フルクトースは1.73となることから（岩田，1960），乾燥区の甘味は湿潤区に比べて約1.64倍高くなった。

坂本・奥地（1970）は、ウンシュウミカンの酸について、土壌の乾燥は、果肉中の酸代謝抑制と、果実肥大の抑制による濃縮の影響によって、酸濃度が高くなることを報告している。本試験のクエン酸は、湿潤区 $843.3 \text{ mg} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ に対して乾燥区は $1117.9 \text{ mg} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ で、1果の平均果汁量は、湿潤区99.8 mLに対し乾燥区89.3 mLだった。よって、濃縮による影響のみを考慮すれば、乾燥区は $942.7 \text{ mg} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ になると推定され、湿潤区との差分である $99.4 \text{ mg} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ が濃縮による影響、残りの $175.2 \text{ mg} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ が酸の代謝抑制による影響と考えられる。一方、リンゴ酸については、湿潤区が乾燥区に比べて高い値を示した。小林（1975）は、有機酸含量は環境条件によって変化し、温度による影響が著しく、夜間の低温は酸の生成を促し、反対に 30°C 以上の高温は酸の呼吸代謝を促進し、酸を減少させることを報告している。その中でも、リンゴ酸は、呼吸に利用される温度域が低く、一般に暖地産の果実中にはリンゴ酸の含量が少なく、また、冷涼な年に比べ、温暖な年の果実はリンゴ酸の含量が少なくなるとしている。本研究の乾燥区は乾燥ストレス処理のため、白色のシートマルチを敷設した。予備試験より、夏秋季に白色シートマルチを敷設した樹冠内の最高気温は、露地に比べて $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ 高かったことから、気温の上昇によって呼吸代謝が促進されたと推察される。

大東・富永（1981）は、ウンシュウミカンのアミノ酸についてプロリン含量が最も多く、次いでアルギニン、アラニン、グルタミン酸、アスパラギン酸が多いことを報告している。‘はれひめ’では、アルギニンが最も多く、次いでプロリン、 γ -アミノ酪酸、アスパラギン酸が多く含まれており、ウンシュウミカンと一部異なる成分比となった。処理区間では、アスパラギン、グルタミン、グリシン、バリンおよびフェニルアラニンを除く9種類のアミノ酸で乾燥区が湿潤区に比べ有意に高かった。Levy（1980）はレモン、鈴木ら（1981）はウンシュウミカン、圖師ら（2005）はトマトにおいて水分ストレスでプロリン含量が増加することを明らかにしている。また、山田ら（1987）

はウンシュウミカンの土壌乾燥処理により葉、茎および根のプロリン含量が増加することを明らかにしている。本研究においても、プロリンは乾燥区が湿潤区の約1.7倍増加し、全アミノ酸含量においても約1.5倍増加した。アミノ酸は、各成分で呈味質（味の質的な印象）が異なり、グリシン、アラニン、セリン、トレオニンは甘味を呈し、高糖度ではうま味を呈する場合がある（河合，2003）。バリン、メチオニンおよびシステインは苦みと甘味を呈する。ロイシン、イソロイシン、フェニルアラニン、トリプトファンは単純な苦みを呈し、グルタミン酸およびアスパラギン酸は酸味が強い。グルタミンとアスパラギンは高濃度ではうま味を呈し、リジン、ヒスチジンおよびアルギニンは苦味中心の複雑な呈味質である。プロリンは単純な苦味を呈する。このように、各アミノ酸によって、呈味質は異なり、さらに、ヒトが感じる呈味強度も各アミノ酸によって異なる。例えば、グルタミン酸やアスパラギン酸は数mMで味を感じるのに対しグリシン、トレオニン、プロリンなどは100 mM以上でようやく味を感じる。Fuke・Konosu（1991）は、トマト果実は、グルタミン酸が少ないと、トマトらしい味を示さないとする。本研究の中で、アルギニンとプロリンが比較的濃度が高かったが、モル単位で示すと数mMで、味として感じる濃度では無い。呈味強度の低いアスパラギン酸とグルタミン酸は、乾燥区で1.6 mMと0.6 mMだったことから、アスパラギン酸が弱く感じる程度かもしれない。

以上の結果より、‘はれひめ’の高品質果実生産には、果汁蓄積期の初期から約2か月程度の間、 ϕ_{max} で-0.7~-1.0 MPa程度の乾燥ストレス付与が適していると考えられる。また、このような果実は、多くの果汁内成分の濃度が上昇するが、特に糖成分の上昇が食味に好影響をもたらし、商品性が向上されると示唆される。

第2章第1節では、TDR水分計を用いて、カンキツ樹の水分状態を把握することを試みた。まず、TDR水分計による測定値は、実測による枝体積含水率（以降VWC）と高い相関関係（ $r^2 \geq 0.995$ ）にあることを明らかにした。次に、乾燥ストレスの変動に適切に反応する部位を明らかにするため、異なる乾燥処理下による主幹部と側枝の変動特性を検証した。その結果、側枝部は主幹部に比べ、乾燥に対する反応が大きかった。これは、葉に近

い側枝部は、蒸散による水分変動が大きいことが影響したと考えられる。しかし、側枝部は、主幹部に比べて処理区内の値にバラツキが大きかった。TDR 法は測定物の温度に影響され、側枝は直射日光を受けることから温度が変化しやすい。このことから、水分変動は側枝部に比べ小さいものの、安定した値を測定できる樹冠内部の主幹あるいは主枝が適当であると思われる。次に、その測定値は、果実品質の糖度と対応した関係がみられたことから、乾燥ストレスの診断技術としての可能性が示唆された。

第 2 節では、測定精度の向上のため、プローブとして利用するステンレス釘の挿入誤差、TDR 水分計の温度依存性、樹皮厚の違いによる測定の影響（平岡ら，2007）を補正または修正することを試みた。温度依存性については、気温から枝内温度を推定し、TDR 計による測定値を補正する式を作成した。また、プローブの挿入誤差と樹皮厚の違いによる影響は、樹体水分が安定する時期の TDR 測定値を基準点とする相対値化を試みた。相対値化の基準日の設定には、土壌の湿潤状態と測定時の気温が 30℃を超える時期が年間で最も樹体水分の高い安定した状態であったことから、この条件が適当であると考えられた。なお、国内の主要なカンキツ産地では、最高気温 30℃を超える時期は概ね 7～9 月にあたることから、ウンシュウミカンの灌水指標として用いる場合であれば、効果的な乾燥ストレス時期の前であたる 7 月上中旬頃を基準点とすることが妥当と考えられる。温度補正と相対値化による精度向上の効果について、 ϕ_{\max} と F_{rev} （温度補正あり，相対値化なし）， R_{site} （温度補正なし，相対値化あり）， R_{rev} （温度補正あり，相対値化あり）との相関分析を，7 月から収穫期まで月別に行った結果，相対値化によって相関係数は高くなり，温度補正についても若干上昇した。 ϕ_{\max} と TDR 測定値の関係について，7～9 月は相関が高く同様の推移を示したが，10 月以降の ϕ_{\max} と R_{rev} の相関はやや低く，季節推移も異なった。これは，測定部位が異なることと，測定値の性質が異なることが要因であると考えられる。Nilsen・Orcutt（1996）は，樹木の枝には貯留水と導管水があり，気温の低下や水分ストレスによって導管内にキャビテーションが生じ，エンボリズムを引き起こすと報告している。本研究の TDR 水分計による枝内水分測定は主枝部を対象とし，体積含水率と相関

が高いことから貯留水の量を示す。一方、 ϕ_{\max} は葉内の導管水の張力を示す。ウンシュウミカンにおいて、10月以降は気温の低下に伴い、樹体の水分状態が変化する時期で、 ϕ_{\max} は気温や地温の低下とともに徐々に低下する（間苧谷・町田，1976）。予備試験より、日最低気温が13～14℃以下の場合、 ϕ_{\max} の低下がみられるが、本試験地の10～11月はこれを下回らなかったことから、気温による ϕ_{\max} の影響は無かったと考えられる。一方、貯留水は蒸散量と関係があり、Waringら（1979）は、スコットランドマツを用いて、水収支を評価し、試験木からの蒸散量の30～50%程度は樹幹貯留水の寄与によるものであることを報告し、Loustauら（1996）は、蒸散として1日に消費される水の12～25%は樹幹貯留水であると述べている。小林・田中（2001）は、樹幹貯留水の変化は、樹液流量から得られた蒸散に対する根系からの吸水不足と一致することを明らかにしている。2008年に行った予備試験より、ウンシュウミカン樹の蒸散速度は、夏季～10月上旬まで $4\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度を推移するが、その後、主に気温の低下に伴い低下し、収穫時期まで $1\sim 2\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ を推移した。これらのことから、蒸散の低下する10月以降は、根からの吸水量が低下するため、乾燥ストレスに対する R_{rev} の反応も小さくなるとともに、測定部位が主枝であることから貯留水の回復までに時間を要すると推察される。また、10月下旬以降で、 R_{rev} の各処理区の値に差異が継続することは、長期間の乾燥ストレスによって、木部の柔組織の発達に影響が生じている可能性も考えられる。

気温による反応が ϕ_{\max} と R_{rev} で異なることから、 R_{rev} とその測定時の気温（ $Temp$ ）を変数とした重回帰分析による ϕ_{\max} の予測式をもとめた。その結果、予測式（実測 $\phi_{\max}=8.890\times R_{rev}+0.0467\times Temp-9.739$ ）の決定係数は0.712で、 ϕ_{\max} との相関が認められた。このことから、第1章で明らかとなった各品種の高品質果実生産に適した ϕ_{\max} の基準をもとに、 R_{rev} を用いて管理できると考えられる。

次に、異なる灌水処理条件下における、TDR 枝内水分測定法の自動連続測定を試みた。その結果、乾燥処理後の灌水によって明らかなVWCの上昇がみられ、乾燥ストレスにより低下したVWCの回復には10日程度を要する

ことが明らかとなった。また、VWC の日変化の増減は、乾燥ストレスによる増減に比べ小さいことが認められた。以上のことから、自動連続測定は、VWC の変動を詳細に明らかにできることから、自動灌水技術や枝内水分の動態解明に利用できると考えられる。

第3章では、高品質果実生産に適した新しい台木品種の選抜技術の開発を行った。台木の樹冠拡大能力と果実品質は関係があることから（河瀬，1972；Hutchison，1977；池田ら，1978），交配した実生の樹冠拡大能力を早期に予測する技術を開発することで、高品質果実生産に適した台木の選抜方法として利用することを試みた。異なる台木に接いだ成木の樹冠拡大と台木実生の特性を比較した結果、実生の枝内水分通導性は、成木の樹冠拡大を表す幹周と最も相関が高かった（ $r^2=0.633$ ）。緒方ら（1999）は皮接ぎ法による樹冠拡大を予測する方法を報告し、10年生の‘大谷’イヨの地上部乾物重を寄与率61%の精度で説明できるとした。この皮接ぎ法による判定は、台木用の種子を播いた後3年以上を要し、検定用の実生苗の育成や皮接ぎの技術を必要とする。一方、本研究で行った枝内水分通導性は、樹冠拡大を皮接ぎ法とほぼ同程度の寄与率63%で説明でき、操作も簡便で交配種子の獲得から1年以内の短期間に選抜することができる。また、枝内水分通導性による選抜方法は1サンプル当たり約5分で測定できることから、年間数百個体の判別を行うことができ、皮接ぎ法がこれまで数十個体であったのに比べると、飛躍的にサンプル数を増やすことができる。有望な台木の作出には、サンプルの母数の大きさが重要であることから、本法によって選抜が加速すると期待される。Yonemoto ら（2004）は、‘ヒリュウ’を台木としたウンシュウミカンが、カラタチ台に比べ果実発育期間中、低い樹液流量であることを明らかにし、矢羽田ら（2003）と米本ら（2005）は、‘あまか’、‘天草’およびウンシュウミカンで‘ヒリュウ’台がカラタチ台に比べて糖度の高い果実が生産されることを報告している。本研究による‘ヒリュウ’は、対照品種を含むすべての品種・系統に比べて水分通導性が低かったことから、‘ヒリュウ’のような低い水分通導性を示す台木は、樹液流量を低下させることで樹冠拡大が低下すると考えられる。

今後は、水分通導性を用いて高品質果実生産に適した台木の作出を行う

とともに，水分通導性と果実品質の関係を明らかにすることが望まれる。

摘要

カンキツ類の果実糖度は、消費者の求める糖度より低く、増糖技術が必要とされる。そこで、高糖度果実生産の対策として、シートマルチ栽培の技術確立と、新しい台木品種の作出の二つを柱に研究を行った。前者の技術は、資材費や労働の負担があることから、先進的な生産者に限定されるが、増糖効果は高いことから、高単価で取引される所謂ブランド果実を生産することができる。一方、後者は、特別な資材や労力を必要としないことから、生産者を限定しないものの、前者に比べると増糖効果は低いことから、カンキツ類全体の糖度を底上げする技術として位置づけている。本研究は、この二つの増糖技術について、シートマルチ栽培の技術確立は、高糖度果実生産のための効果的な水管理方法の確立と（第1章）、その制御技術の開発を試み（第2章）、台木品種の作出については、高糖度果実生産に適した効率的な台木選抜方法の開発を行った（第3章）。

第1章では、効果的な水管理方法を確立するため、高糖度化を必要とする早生ウンシュウミカン、‘不知火’および‘はれひめ’について、葉内最大水ポテンシャル（以降 ϕ_{max} ）による積算水分ストレス法を用いて、乾燥ストレスと重要果実形質（糖度、酸度、果実肥大）の関係を時期別に解明することを試みた。第2章では、第1章で得られた効果的な水管理を行うため、樹体の水分状態を簡易に診断する技術の開発を行った。第1章で利用した ϕ_{max} は、果実品質との関係は高いものの、現場での利用は難しいことから、これに代わる技術としてTDR枝内水分測定法をカンキツ樹に適用し、技術の確立を試みた。第3章は、高糖度果実生産に適した台木の効率的な選抜方法の開発を目的とした。一般に、おい性台を用いると穂木品種の果実の糖度は高くなることから、台木の有する樹冠拡大能力を早期に判別する技術を開発することで、高糖度果実生産に適した台木の効率的な選抜を図る。

第1章 高品質果実生産のための水管理方法の検討

第1節 早生ウンシュウミカンの乾燥ストレスが果実品質に及ぼす影響

早生ウンシュウミカンは、シートマルチ栽培等で夏秋季に乾燥ストレス

を付与することで，果実の糖度は上昇する。しかし，乾燥ストレスは，減酸や果実肥大を抑制させることから，場合によって商品価値の低下にもつながる。そこで，高品質果実（本研究では，高糖度で適度な酸度の中玉果実を示す）に必要なストレス時期の解明を試みた。 ϕ_{\max} による積算水分ストレス法を用いて，果実発育期の乾燥ストレスと糖度，酸度および果実肥大との関係を月別に検証した。その結果，積算水分ストレス（以降 $S\phi$ ）は，7月中旬～9月の増糖量との間に正の相関があり，10月以降についても，長期間の乾燥ストレスによる光合成能力の低下した処理区を除けば，正の相関があった。増糖効果の強度は，7月中旬～8月が10月以降に比べて高かった。酸度について， $S\phi$ と減酸量との間に，相関は認められなかった。但し，2007年の強乾燥区は，9月中旬以降より弱乾燥区に比べ高く推移し，2010年の後半乾燥区は通期乾燥区と同程度の酸度の高い果実だった。このことから，9月以降に与える乾燥ストレスは，収穫時の果実を高酸にすると推測される。果実肥大について， $S\phi$ は7月中旬～9月で月肥大量と負の相関があった。また，10月以降についても，2010年の結果より，負の相関がみられた。よって，果実発育期間中の乾燥ストレスは時期に限らず果実を小玉化させると推察される。以上より，積算水分ストレス法は，これまで漠然としていた乾燥ストレスと果実品質との関係を詳細に明らかにすることができる。また，増糖効果が認められ始める7月中旬は果汁蓄積初期に相当し，この時期から約2か月間， ϕ_{\max} で $-0.7 \sim -1.0$ MPaを維持した処理区（2010年-前半乾燥区）は，湿潤区に比べて収穫時の果実糖度は2.8度高く，酸度は0.16%高いものの有意な差ではなく，高品質果実が生産された。

第2節．‘不知火’の乾燥ストレスが果実品質に及ぼす影響

‘不知火’は，通常の収穫期前に生じる水腐れ症や鳥害，寒害を回避するため，早期に収穫するケースが散見される。そのため，成熟前の果実は糖度が不十分なことが多い。そこで，果実発育期の乾燥ストレスと果実品質の関係を積算水分ストレス法を用いて，時期別に明らかにすることで，対策を検討した。その結果，8～9月で $S\phi$ と増糖量との間に正の相関がみ

られ、2009 年の 8～9 月に乾燥ストレスを付与した夏乾燥区は、湿潤区に比べ収穫時の糖度は 1.9 度高くなった。しかし、2010 年の 8 月乾燥区は一時的に糖度が上昇したものの、処理後の湿潤状態によって糖度は低下し、湿潤区との差は無くなった。このことから、果実発育期前半の 8～9 月の乾燥ストレス付与は、増糖効果があるものの、1 か月程度の乾燥ストレスは収穫期の果実糖度の上昇につながらないことが明らかとなった。酸度について、8～9 月に $S\phi$ と減酸量との間に負の相関があった。また、収穫期の酸度について、秋冬乾燥区と夏秋乾燥区が湿潤区に比べ高く、夏乾燥区と冬乾燥区は湿潤区と同程度であった。よって、秋季である 10～11 月の乾燥についても減酸を抑制する可能性があるかと推察される。果実肥大について、8～9 月と 12 月以降に $S\phi$ と肥大量に負の相関があった。また、10 月下旬以降の乾燥ストレスを付与した秋冬乾燥区についても、収穫期の果実は湿潤区に比べ小玉化したことから、果実肥大期間中は時期に限らず乾燥ストレスにより肥大速度は低下すると考えられる。以上のことから、8～9 月の乾燥ストレス処理は増糖効果があり、早期収穫時における糖度基準の達成に寄与できると考えられる。

第 3 節．‘はれひめ’の乾燥ストレスが果実品質に及ぼす影響

‘はれひめ’は、通常の管理では果実の糖度が低いことから、シートマルチ栽培を用いた乾燥ストレス付与による高糖度果実生産が図られている。しかし、酸度や果実の大きさを含めた効果的なストレス時期と強度はわかっていない。そこで、積算水分ストレス法を用いて、効果的な乾燥ストレス時期を特定するとともに、高糖度果実生産に適したストレス強度を明らかにした。また、乾燥ストレス付与による食味の影響を果汁内成分の観点から検証した。積算水分ストレスと増糖量との相関分析より、増糖効果のある時期は 8～10 月であり、8 月が 10 月に比べて効果は強かった。また、積算水分ストレスと減酸量との相関分析より、10～11 月に負の相関があることから、高品質とされる高糖度で適正な酸度の果実生産には、8～9 月の乾燥ストレスが適していると考えられた。本試験地の 8 月上旬は、‘はれひめ’の果汁蓄積初期に相当し、この時期より約 2 か月間、 ϕ_{\max} で -0.7～

-1.0 MPa の乾燥ストレスを付与した 2010 年の前半乾燥区は、乾燥ストレスを付与しない湿潤区に比べ、収穫期の果実糖度は 2.5 度高い 13.4 度で、酸度に有意な差は無く、一般的に高品質果実とされる糖度 12 度以上の基準に適合した。収穫時の果汁内糖成分は、処理区間で成分比に変化はみられなかったが、乾燥区的全糖量は湿潤区のそれに比べ約 1.6 倍で、ヒトが感じる甘味は約 1.64 倍になると考えられる。果汁内の有機酸について、乾燥区のクエン酸は湿潤区に比べ約 1.3 倍で、リンゴ酸は約 0.7 倍だった。果汁内のアミノ酸は、乾燥区が湿潤区に比べ 9 種類のアミノ酸で濃度が高いものの、ヒトの食味に影響するアミノ酸はアスパラギン酸のみと考えられる。以上のことから、果汁蓄積初期である 8 月上旬から約 2 か月間、 ϕ_{max} で -0.7 ~ -1.0 MPa の乾燥ストレス付与は、高品質果実が生産され、その果実は、多くの果汁内成分の濃度が上昇するが、特に糖成分の上昇が食味に好影響をもたらし、商品性が向上されると示唆される。

第 2 章 カンキツにおける TDR 水分計を用いた枝内水分測定法の開発

第 1 節 TDR 枝内水分測定法の確立

TDR 枝内水分測定法をカンキツ樹の乾燥ストレス診断技術として利用するため、枝の体積含水率との関係、測定に適した部位の検証、異なる水管理における果実品質との関係を明らかにした。TDR 水分計の測定値は、実測による枝体積含水率（以降 VWC）と高い相関関係（ $r^2 \geq 0.995$ ）にあることから、TDR 計による測定より VWC を算出できると考えられる。乾燥ストレスの変動に適した部位を明らかにするため、異なる乾燥処理下による主幹部と側枝部の変動特性を検証した。その結果、主幹部は、乾燥処理に対して対応した推移を示した。乾燥に対する反応の大きさは、側枝部が主幹部に比べて大きかったが、温度環境の変動を強く受けるため、処理区内のバラツキも大きかった。よって、水分変動は側枝部に比べて小さいものの、安定した値を測定できる主幹（あるいは主枝）が適当であると思われた。次に、この処理条件下における測定値と果実の糖度は、対応した関係がみられたことから、TDR 枝内水分測定法が高品質果実生産のための乾燥ストレス診断技術として利用できると示唆された。

第 2 節． TDR 枝内水分測定法の精度向上と自動連続モニタリング

TDR 枝内水分測定法の精度向上のため，TDR 計の温度依存性，プローブの挿入深度の誤差，樹皮厚の違いによる測定の影響を補正または修正することを試みた。温度依存性は補正式を作成し，プローブの挿入誤差と樹皮厚の違いによる影響は，樹体水分が安定する時期の TDR 測定値を基準点とする相対値化を行うことで精度向上を試みた。枝内温度と TDR 値の間には高い相関が認められ，補正式を導き出した。相対値化は，測定時の気温が 30℃ 以上で土壌が湿潤状態の場合，年間の枝内水分が安定して高い時期であることから，この時期を基準点に用いることにした。温度補正と相対値化による精度向上の効果は， ϕ_{\max} との相関によって検証し，相対値化によって相関係数は高くなり，温度補正についても若干上昇した。次に，TDR 測定値を温度補正し相対値化した R_{rev} とその測定時の気温を変数とした重回帰分析による ϕ_{\max} の予測式の決定係数は 0.712 で有意であった。よって，第 1 章で明らかになった ϕ_{\max} の基準をもとに， R_{rev} を用いて管理できると考えられる。また，本法を用いた自動連続モニタリングは，樹体水分の変動を詳細に明らかにでき，水の動態解明や自動灌水技術に利用できると考えられる。

第 3 章 高品質果実生産を目的とした台木育成のための選抜指標の開発

台木の枝内水分通導性を利用した樹冠拡大能力の早期予測法

高品質果実の生産に適した台木品種を作出するため，早期選抜技術の開発を行った。高品質果実として重要な形質である果実糖度と台木の持つ樹冠拡大能力は関係性が高いことから，交配した実生の樹冠拡大能力を早期に予測する技術の開発を試みた。供試材料は，果樹研究所で交雑した 11 系統と，対照品種にカラタチの 3 系統と‘スィングル’シトルメロを用いた。それらの台木に接いだ 7 年生ウンシュウミカン樹の樹冠拡大と，5 か月齢の実生の特性を比較した。その結果，7 年生の樹冠拡大を表す幹周と実生の枝内水分通導性との間に相関が認められ ($r^2=0.633$)，対照品種はほぼその回帰直性上にあった。このことから，実生の枝内水分通導性で，台

木として利用した場合の樹冠拡大を予測できると考えられる。また、本方法は、交雑種子の獲得から1年以内に検定でき、年間に数百個体を扱うことができることから、高品質果実生産に適した台木の効率的な育成に寄与できると示唆される。

引用文献

- Atkinson, C. J., M. A. Else, L. Taylor and C. J. Dover. 2003. Root and stem hydraulic conductivity as determinants of growth potential in grafted trees of apple (*Malus pumila* Mill.). J. Exp. Bot. 54: 1221-1229.
- Banuls, J. and E. Primo-Millo. 1995. Effects of salinity on some *citrus* scion-rootstock combinations. Ann. Bot. 76: 97-102.
- Bitters, W. P., D. A. Cole and C. D. McCarty. 1979. Facts about dwarf citrus trees. Citrograph 64: 54-56.
- Campbell Scientific, Inc. 1996. Instruction manual. CS616 water content reflectometer. Campbell Scientific, Logan, UT.
- Cantuarias-Aviles, T., F. A. A. Mourao Filho, E. S. Stuchi, S. R. Silva and E. Espinoza-Nunez. 2010. Tree performance and fruit yield and quality of 'Okitsu' satsuma mandarin grafted on 12 rootstocks. Sci. Hortc. 123: 318-322.
- Castle, W. S., J. C. Baldwin and R. P. Muraro. 2010. Performance of 'Valencia' sweet orange trees on 12 rootstocks at two locations and an economic interpretation as a basis for rootstock selection. HortScience 45: 523-533.
- Clearwater, M. J., R. G. Lowe, B. J. Hofstee, C. Barclay, A. J. Mandemaker and P. Blattmann. 2004. Hydraulic conductance and rootstock effects in grafted vines of kiwifruit. J. Exp. Bot. 55: 1371-1382.
- Constantin R. J., R. T. Brown and S. Thibodeaux. 1979. Performance of 'Owari' satsuma mandarin and 'Washington' navel orange on trifoliate orange and citrange in Louisiana. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 104: 120-123.
- Constantz, J. and F. Murphy. 1990. Monitoring moisture storage in trees using time domain reflectometry. J. Hydrol. 119: 31-42.
- 大東 宏・富永茂人. 1981. ウンシュウミカンの異なる樹形における着果部

- 位別の果実品質,特に糖,有機酸およびアミノ酸組成について. 園学雑. 50: 143-156.
- Forner-Giner, M. A., A. Alcaide, E. Primo-Millo and J. B. Forner. 2003. Performance of 'Navelina' orange on 14 rootstocks in Northern Valencia (Spain). Sci. Hortic. 98: 223-232.
- Fuke, S. and S. Konosu. 1991. Taste-active components in some foods: A review of Japanese research. Physiol. Behav. 49: 863-868.
- 東 明弘・西田 学・大倉野 寿. 2004. 極早生温州'かごしま早生'の品質向上のための土壌水分管理法. 九州沖縄農業研究成果情報 19: 283-284.
- 平井康一. 1992. ウンシュウミカンに対するエチクロゼートの利用と作用特性に関する研究. 大阪府立大学学位論文.
- 平岡潔志・村松 昇・瀧下文孝・内田 誠・土田靖久. 2007. TDRによる果樹の枝体積含水率測定における樹皮の影響. 土肥誌. 78: 73-76.
- 平岡潔志・斉藤仁蔵. 2010. インターネットを利用した消費者の嗜好性と消費特性調査-カンキツに関するネットリサーチ-. 近中四農研資. 7: 45-112.
- 平岡潔志・瀧下文孝・村松 昇・内田 誠・土田靖久. 2005. TDR 携帯型水分計による果樹の太枝体積含水率の計測. 土肥誌. 76: 641-644.
- 平山秀文. 1994. 水管理による'不知火'の食味向上. 九州農業研究成果情報 9: 225-226.
- Hodgson, R. W. and E. R. Eggers. 1938. Rootstock influence on the composition of citrus fruits. Cal. Citrograph 23: 499.
- Holbrook, N. M., M. J. Burns and T. R. Sinclair. 1992. Frequency and time-domain dielectric measurements of stem water content in the arborescent palm, *Sabal palmetto*. J. Exp. Bot. 43: 111-119.
- Hutchison, D. J. 1977. Influence of rootstock on the performance of 'Valencia' sweet orange. Proc. Intern. Soc. Citriculture. 2: 523-525.
- Hutton, R. J., J. J. Landsberg and B. G. Sutton. 2007. Timing irrigation

to suit citrus phenology: A means of reducing water use without compromising fruit yield and quality? Aust. J. Exp. Agr. 47: 71-80.

池田 勇・中谷宗一・小林省三. 1978. ネーブルオレンジの台木に関する研究. I. 台木がネーブルオレンジの樹の生育, 耐寒性, ステムピッチングの発生, 収量及び果実の品質に及ぼす影響. 果樹試報. E2: 39-57.

井上久雄・藤井栄一・西山富久. 2002. 着果負担と葉果比の違いが早生ウンシュウミカンの果実品質, 収量, 炭水化物含量ならびに翌年の着花に及ぼす影響. 園学雑. 71 (別 1) : 225.

井上久雄・藤原文孝・西山富久・藤井栄一・三堂博昭. 2005. 後期重点の摘果と開花後の弱せん定は早生ウンシュウの高品質果実連年安定生産を実現. 近畿中国四国農業研究成果情報: 359-360.

Irvine, J and J. Grace. 1997. Non-destructive measurement of stem water content by time domain reflectometry using short probes. J. Exp. Bot. 48: 813-818.

岩田久敬. 1960. 食品化学要説. p.61-63. 養賢堂. 東京.

Kadoya, K. 1973. Studies on the translocation of photosynthates in Satsuma mandarin. III. Effect of water stress on the metabolism of sugars in the fruit. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 42: 210-214.

貝原洋平・宮本輝仁・原口暢朗・池田繁成・新堂高広. 2008. ウンシュウミカン樹における枝体積含水率の年間変動と水分環境および水管理. 園学研. 7: 517-523.

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.

貝原洋平・新堂高広. 2006. 果実肥大測定によるウンシュウミカンの水分ストレス付与程度の簡易診断. 九州沖縄農業研究成果情報 21: 179-180.

禿 泰雄・平井康一. 1982. フィガロンの生理作用と利用開発. 植物の化

学調節 17: 65-70.

香月敏孝・高橋克也. 1995. 温州みかん高品質化生産の動向. 農業総合研究 49: 59-102.

川端幸蔵. 1978. その他の回帰問題. p. 105-114. 奥野忠一編著. 応用統計ハンドブック. 養賢堂. 東京.

河合美佐子. 2003. アミノ酸の味 その2. Ajico News No.209. 味の素株式会社広報部

河瀬憲次. 1972. 温州ミカンの台木選抜とその種類 [1]. 農および園. 47: 317-320.

河瀬憲次. 1999. 生理障害対策と病虫害防除. p. 85-90. 河瀬憲次編著. デコポンをつくりこなす. 農文協. 東京.

Kawase, K., I. Iwagaki, T. Takahara, S. Ono and K. Hirose. 1987. Rootstock studies for citrus varieties in Japan. JARQ 20: 253-259.

小林 章. 1975. 適地生産果樹環境論. p.61-63. 養賢堂. 東京.

小林康志・大野文征・岡田正道・鹿野英士・牧田好高・加々美 裕・井口 功・原 節夫・黒柳栄一・佐々木俊之. 1995. ‘ヒリュウ’台木が‘青島温州’の生育・収量・果実品質に及ぼす影響. 静岡柑試研報. 26: 23-30.

小林義和・田中 正. 2001. TDR法による樹幹貯留水分の測定. 水文・水資源学会誌 14: 207-216.

久保田収治・福井春男・赤尾勝一郎. 1972. 瀬戸内ミカン園の施肥合理化に関する研究 (第9報) 温州ミカン果汁中の糖・有機酸・遊離アミノ酸組成の果実肥大成熟過程における変化. 四国農試報. 24: 73-96.

草場新之助・森永邦久・島崎昌彦・星 典宏・村松 昇. 2004. 周年マルチ点滴同時施肥法で栽培されたウンシュウミカンにおける細根の割合と呼吸活性. 根の研究. 13: 111-115.

Levy, Y. 1980. Field determination of free proline accumulation and water-stress in lemon trees. HortScience 15: 302-303.

Loustau, D., P. Berbigier, P. Roumagnac, C. Arruda-Pacheco, J. S. David, M. I. Ferreira, J. S. Pereira and R. Tavares. 1996. Transpiration of a 64-year-old maritime pine stand in Portugal. 1. Seasonal course

- of water flux through maritime pine. *Oecologia* 107: 33-42.
- 真子正史・広部 誠. 1984. エチクロゼート（フィガロン）がウンシュウミカンの養水分吸収と生育に及ぼす影響. 神奈川園試研報. 31: 10-15.
- 間苧谷 徹・町田 裕. 1976. 果樹の葉内水分不足に関する研究（第5報）. ウンシュウミカンの葉の水ポテンシャル及び葉内水蒸気拡散抵抗の時期別推移について. 園学雑. 45: 261-266.
- 間苧谷 徹・町田 裕. 1977. 果樹の葉内水分不足に関する研究（第7報）. 夏季の葉の水ポテンシャルが温州ミカンの収穫時の果実形質に及ぼす影響について. 園学雑. 46: 145-152.
- 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指標としての葉の水ポテンシャル. 園学雑. 49: 41-48.
- 宮本久美・前田隆昭. 2008. 早生ウンシュウにおける高品質連年生産樹の果実生育パターン. 園学研. 7(別 2): 144.
- Morinaga, K and F. Ikeda. 1990. The effects of several rootstocks on photosynthesis, distribution of photosynthetic product, and growth of young Satsuma mandarin trees. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 59: 29-34.
- Muramatsu, N and K. Hiraoka. 2008. Hydraulic conductance and xylem anatomy in fruit tree shoots. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 77: 122-127.
- Myers, B. J. 1988. Water stress integral - a link between short-term stress and long-term growth. *Tree physiol.* 4: 315-323.
- Nadler, A., E. Raveh, U. Yermiyahu and S. R. Green. 2003. Evaluation of TDR use to monitor water content in stem of lemon trees and soil and their response to water stress. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 437-448.
- Nadler, A., E. Raveh, U. Yermiyahu and S. R. Green. 2006. Stress induced water content variations in mango stem by time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 510-520.
- Nakano, M., T. Tanaka, H. Motosugi and T. Ishii. 2004. Hydraulic

- conductivity of peach cultivars as affected by Nanking cherry (*Prunus tomentosa* Thunb.) rootstock. *Acta Hort.* 636: 111-117.
- 中里 一郎・岸野 功. 1999. ウンシュウミカンのシートマルチ栽培における灌水方法, 時期が減酸と乾燥ストレス軽減に及ぼす影響. 長崎果樹試研報. 6: 1-9.
- Nardini, A., A. Gasco, F. Raimondo, E. Gortan, M. A. LoGullo, T. Caruso and S. Salleo. 2006. Is rootstock-induced dwarfing in olive an effect of reduced plant hydraulic efficiency? *Tree Physiol.* 26: 1137-1144.
- Nilsen, E. T. and D. M. Orcutt. 1996. The physiology of plants under stress (Abiotic factors). p. 278-321. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- 西田 和夫・相沢 博・池宗勝三郎. 1977. 安芸灘地域におけるミカン園の水管理に関する研究 (第3報) 夏季における温州ミカンの水分消費量と灌漑警報器の利用例について. 広島果試報. 3: 1-14.
- 野田 勝二・奥田 均・木原武士・岩垣 功・河瀬憲次. 2001. 各種の台木がウンシュウミカンの極早生系統‘山川早生’の生育および果実品質の及ぼす影響. 園学雑. 70: 78-82.
- 農林水産省. 2012a. 平成22年産果樹生産出荷統計. 農林統計協会. 東京.
- 農林水産省. 2012b. 平成22年産特産果樹生産動態等調査. 農林水産省生産局.
- 緒方達志・高原利雄・藤澤弘幸. 1999. 皮接ぎを利用したカンキツ台木樹勢の早期評価法. 園学雑. 68(別2): 206.
- 緒方達志・高原利雄. 2004. カンキツ樹の木部樹液と樹体生理との関係 (第3報) 蒸散流量及び推定養分輸送量の年間推移. 園学雑. 73(別2): 104.
- Roose, M. L., D. A. Cole, D. Atkin and R. S. Kupper. 1989. Yield and tree size of four citrus cultivars on 21 rootstocks in California. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 114: 678-684.
- 坂本 等・北園邦弥・平山秀文・満田 実・磯部 暁. 2000. 極早生温州の果実品質向上に適した水管理方法. 九州農業研究成果情報 15: 217-218.

- 坂本辰馬・奥地 進. 1970. 温州ミカン果実の酸の消長（集積，稀しゃく，減少）に及ぼす夏秋季の土壌乾湿の影響. 園学雑. 39: 107-114.
- 佐藤祥子・武田有史・川野信壽. 2006. カンキツ‘不知火’における土壌水分が果実品質に与える影響. 九州沖縄農業研究成果情報 21: 193-194.
- 沢村正義・橋永文男・箴島 豊. 1973. ^{14}C トレーサー法によるウンシュウミカンの有機酸と糖の季節的变化に関する研究. 農化誌. 47: 571-576.
- 澤野郁夫・山崎俊弘・杉山和美・谷口哲微. 2001. ウンシュウミカンの根域制限栽培における夏秋季の水ストレスが生育および果実品質に及ぼす影響. 静岡柑試研報. 30: 1-8.
- Sholander, P. F., H. T. Hammel, E. A. Hemmingsen and E. D. Brandstreet. 1964. Hydrostatic pressure and osmotic potential in leaves of mangroves and some other plant. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 52: 119-125.
- 島津製作所. 1992a. High-performance liquid chromatograph organic acid analysis system instruction manual. Shimadzu corporation chromatographic instruments division. 京都.
- 島津製作所. 1992b. アミノ酸分析システム取扱説明書. Shimadzu corporation chromatographic instruments division. 京都.
- Shinozaki, K., K. Yoda., K. Hozumi and T. Kira. 1964a. A quantitative analysis of plant form - The pipe model theory I. Basic analysis. Jap. Jour. Ecol. 14: 97-105.
- Shinozaki, K., K. Yoda., K. Hozumi and T. Kira. 1964b. A quantitative analysis of plant form - The pipe model theory II. Further evidence of the theory and its application in forest ecology. Jap. Jour. Ecol. 14: 133-139.
- 居石知成・新堂高広. 1996. 早生温州ミカンのマルチ処理と注水による高品質果実安定生産技術. 九州農業研究成果情報 11: 205-206.
- 鈴木鉄男・橋爪光一・高木敏彦・岡本 茂. 1981. 温州ミカン樹における水

- ストレスが果実，葉内の糖，有機酸，アミノ酸，ABA含量に及ぼす影響．
静岡大農研報． 31: 9-20.
- 鈴木鉄男・細田新治・吉川 潔． 1977. 温州ミカン幼樹に対する環状剥皮な
どの樹幹処理の影響． 農および園． 52: 807-808.
- Syvertsen, J. P. 1981. Hydraulic conductivity of four commercial
citrus rootstock. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 106: 378-381.
- 高原利雄・緒方達志・河瀬憲次・岩垣 功・村松 昇・小野祐幸・吉永勝
一・広瀬和栄・山田彬雄・高辻豊二・内田 誠． 1994. 大谷伊予柑の
生育と果実品質に及ぼす各種台木の影響． 果樹試報． 26: 39-60.
- 瀧澤英紀・速水啓介・窪田順平・塚本良則． 1996. 蒸散による樹幹の含水
率と水ポテンシャルの変動． 日林誌． 78: 225-230.
- 田中 正・小林義和． 1996. 土壌-植物-大気連続系の水輸送に果たす樹木
の役割に関する研究動向． 筑波大学地球環境変化プロジェクト研究
報告集． 4-1: 78-96.
- 富永茂人・大東 宏． 1982. 異なる樹形のウンシュウミカンの冷夏・寡日
照年における着果部位別果実品質． 園学雑． 51: 9-18.
- 宇都宮直樹・山田 寿・片岡郁雄・苫名 孝． 1982. ウンシュウミカン果
実の成熟に及ぼす果実温度の影響． 園学雑． 51: 135-141.
- Verreynne, J. S., E. Rabe and K. I. Theron. 2001. The effect of combined
deficit irrigation and summer trunk girdling on the internal fruit
quality of 'Marisol' clementines. Sci. Hortic. 91: 25-37.
- Waring, R. H., D. Whitehead and P. G. Jarvis. 1979. The contribution
of stored water to transpiration in Scots pine. Plant, Cell and
Environ. 2: 309-318.
- Wheaton, T. A., W. S. Castle, J. D. Whitney and D. P. H. Tucker. 1991.
Performance of citrus scion cultivars and rootstock in a
high-density planting. Hortscience 26: 837-840.
- Wullschlegel, S.D., P.J. Hanson and D.E. Todd. 1996. Measuring stem
water content in four deciduous hardwoods with a time-domain
refletometer. Tree Physiol. 16: 809-815.

- Wutscher, H. K. 1979. Citrus rootstocks. Hort. Rev. 1: 237-269.
- 矢羽田第二郎・牛島考策・松本和紀. 2003. ‘ヒリュウ’ 台ウンシュウミカン果実の発育・成熟過程における果汁の糖集積の特徴. 園学研. 2: 39-44.
- Yakushiji, H., H. Nonami, T. Fukuyama, S. Ono, N. Takagi and Y. Hashimoto. 1996. Sugar accumulation enhanced by osmoregulation in Satsuma mandarin fruit. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 121: 466-472.
- Yakushiji, H., K. Morinaga and H. Nonami. 1998. Sugar accumulation and partitioning in Satsuma mandarin tree tissues and fruit in response to drought stress. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 123: 719-726.
- 山田 寿・向井啓雄・杉浦 明・苫名 孝. 1987. カンキツの耐寒性に及ぼす水ストレスの影響. 園学雑. 56: 273-279.
- Yonemoto, Y., K. Matsumoto, T. Furukawa, M. Asakawa, H. Okuda and T. Takahara. 2004. Effects of rootstock and crop load on sap flow rate in branches of ‘Shirakawa Satsuma’ mandarin (*Citrus unshin* Marc.). Sci. Hortic. 102: 295-300.
- 米本仁巳・高原利雄・奥田 均・緒方達志. 2005. カラタチとヒリュウ台がカンキツ新品種‘天草’と‘あまか’若齡樹の生育, 収量および果実品質に及ぼす影響. 園学研. 4: 81-84.
- 吉田俊雄. 1995. 第1章カンキツ. 台木用植物の分類と特性. p. 122-138. 河瀬憲次編著. 果樹台木の特性と利用. 農山漁村文化協会. 東京.
- 吉田俊雄・根角博久・吉岡照高・中野睦子・伊藤祐司・村瀬昭治・瀧下文孝. 2005. カンキツ新品種‘はれひめ’. 果樹研報. 4: 37-45.
- 圖師一文・松添直隆・吉田 敏・筑紫二郎. 2005. 水ストレス下および塩ストレス下で栽培したトマトにおける果実内成分の比較. 植物環境工学 17: 128-136.

発表論文リスト

本学位論文は，以下の発表論文を元に構成した。

第 1 章

岩崎光徳・深町 浩・今井 篤・平岡潔志・奥田 均．2012．ウンシュウミカンと‘不知火’における TDR 計を用いた枝内水分測定法の有用性と水管理方法の検討．園学研．11：327-335．

岩崎光徳・深町 浩・今井 篤・野中圭介．2011．中晩生カンキツ‘はれひめ’における夏秋季の水ストレスが果実品質に及ぼす影響．園学研．10：191-196．

第 2 章

奥田 均・岩崎光徳・佐藤景子．2007．水管理の異なるウンシュウミカン樹の TDR 法による枝体積含水率の変化．園学研．6：529-533．

岩崎光徳・深町 浩・佐藤景子・今井 篤・野中圭介・平岡潔志・奥田均．2010．ウンシュウミカンにおける相対値を用いた TDR 枝内水分測定法による水分状態の把握．園学研．9：433-439．

第 3 章

Iwasaki, M., H. Fukamachi, K. Satoh, H. Nesumi and T. Yoshioka. 2011. Development of tree vigor prediction method at an early stage based on stem hydraulic conductance of seedlings in citrus rootstocks. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 80: 390-395.

第 1 表，第 2 表，第 3 表，第 4 表，第 5 表，第 6 表，第 4 図，第 5 図は，「ウンシュウミカンと‘不知火’における TDR 計を用いた枝内水分測定法の有用性と水管理方法の検討」園芸学研究 11 巻 3 号より転載

第 9 表，第 10 表，第 11 表，第 6 図（2009 年）は，「中晩生カンキツ

‘はれひめ’における夏秋季の水ストレスが果実品質に及ぼす影響」園芸学研究 10 巻 2 号より転載

第 9 図，第 11 図，第 12 図，第 13 図は，「水管理の異なるウンシュウミカン樹の TDR 法による枝体積含水率の変化」園芸学研究 6 巻 4 号より転載

第 12 表，第 14 図，第 15 図，第 16 図，第 17 図，第 18 図，第 19 図，第 20 図，第 21 図は，「ウンシュウミカンにおける相対値を用いた TDR 枝内水分測定法による水分状態の把握」園芸学研究 9 巻 4 号より転載

第 13 表，第 14 表，第 15 表，第 16 表，第 26 図，第 27 図，第 28 図，第 29 図は，「Development of tree vigor prediction method at an early stage based on stem hydraulic conductance of seedlings in citrus rootstocks」J. Japan. Soc. Hort. Sci. 80 巻 4 号より転載