

I 果実成長に及ぼす環境要因の影響

1 はじめに

省エネルギーの方法の1つに、暖房設定気温を下げる事が挙げられるが、これは時に生育速度の低下や収穫時期の遅れなどをもたらす。ハウスミカンにおいては、詳細な調査に基づく省エネルギー栽培管理技術が未確立で、また既往の報告は、一定の果実成長や品質に必要な最低温度にまでは言及していない。

露地ウンシュウミカンにおける既往の基礎的な形態的・組織学的観察では、砂じょうは開花期頃より発生し、砂じょう形成に関係した細胞分裂は満開後40-60日頃まで続くとみられている(倉岡・菊池⁸⁹⁾、1961)。菊池ら⁷⁴⁾(1961)によると、ウンシュウミカン(早生ウンシュウ)の果実生育段階は、細胞分裂期(およそ満開後0-30日; stage I)、細胞容積増大期(およそ満開後30-120日; stage II)、および成熟期(およそ満開後120-150日; stage III)の3期に分割される。

温度がウンシュウミカン果実生育・品質に及ぼす影響を見た既往の基礎研究の多くは、露地栽培の秋期と冬期を想定し、収穫前の満開後90-180日(stage IIおよびIII)についてであり、また材料に成木を使用した報告は少なく(宇都宮ら¹⁵¹⁾、1982)、多くはポットが用いられ、グロースキャビネットにて試験されている(栗原⁹⁰⁻⁹¹⁾、1969、1971; Kobayashi et al.⁸¹⁾、1968; 新居ら¹¹⁴⁾、1970; 井上・銭⁶⁴⁾、1988)。これらの報告により、収穫前の果実生育期における高品質果実生産の適温は20-25℃とされている。しかし、ハウスミカンにおいて、果実成長を大きく損なわず、果実

品質・収量にほとんど影響しない許容低温はまだ明らかにされていない。

本章では、夜温や他の環境要因が果実成長と品質に及ぼす影響について、複数年の調査結果を解析し、合理的な栽培管理技術確立の一助とする。

2 材料および方法

材料:2010年から2013年において、大分県農林水産研究指導センター果樹グループ(国東市)の加温ハウスで栽培されたウンシュウミカン(*Citrus unshiu* Marc.)を用いた。樹齢は、18-19年生(表1-1の処理No.1-9)もしくは10年生(表1-1の処理No.10-12)であった。処理期間中(満開後60-120日)の環境条件を表1-1に示す。各処理の反復は3樹以上であった。加温は満開後120日まで行い、満開後120-180日はハウスを開放し夜間は自然状態に等しかった。表1-1で示した処理区の樹は全て満開後180日に果実を収穫した。

日中の光条件:遮光処理は、50%遮光のシルバーポリエチレンフィルムを用い、高さ2.5-3.7mの内張アーチに展帳した。補光処理は、6:00-18:00にメタルハライドランプ(MF1000L、TOSHIBA Lighting & Technology Co., LTD., Japan)を用いて行った。

環境および生体計測:気温は、小型防水気温計測データロガー(RTR-53、T&D Co., LTD., Japan)を用い、ハウス内の放射は、日射計(Solar Mini PCM-01、Prede Co., LTD., Japan)を用いて両者とも10分間隔で計測した。夜明け前の木部水ポテンシャルは、プレッシャーチャンバー(DKT-7000、Daiki Rika Kogyo Co., LTD., Japan)を用いて10日間隔で調査した。果実体積は、果実を楕円と仮定してデジタルノギスで

表1-1 処理期間中(満開後60-120日)の環境条件

処理No.	凡例	設定温度 (昼/夜, °C)	日中の光条件	積算放射 (MJ・m ⁻²)	満開日
1	●	25/23	Natural	469	Jan. 5, 2010
2	○	25/13	Natural	469	Jan. 5, 2010
3	▲	25/23	50% shading	234	Jan. 5, 2010
4	△	25/13	50% shading	234	Jan. 5, 2010
5	▼	35/13	Natural	537	Jan. 22, 2011
6	▽	35/13	Supplemental lighting	727 ¹⁾	Jan. 22, 2011
7	■	25/13	Natural	534	Jan. 22, 2011
8	□	25/25	Natural	430	Dec. 14, 2012
9	◆	25/15	Natural	425	Dec. 17, 2012
10	◇	25/17→25→17 ²⁾	Natural	676	Jan. 26, 2013
11	×	25/20	Natural	676	Jan. 26, 2013
12	+	25/25→17→17 ²⁾	Natural	676	Jan. 26, 2013

¹⁾補光と自然光の合計 ²⁾18:00-22:00, 22:00-2:00, および2:00-6:00で夜間変温

計測した縦径と横径から算出した。相対果実肥大速度 (GRF_{St} ; $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$) は次式で求めた。

$$GRF_{St} = (V_{t_1} - V_{t_0}) / [V_{t_0} (t_1 - t_0)] \quad (1-1)$$

ここで、 V は果実体積、 t_0 は果実体積の起算日、 t_1 は果実体積の終了日を示す。本章では、果実生育ステージをyoung stage (満開後60-90日; stage IIの中間期)、middle stage (満開後90-120日; stage IIの後半期)、およびmature stage (満開後120-180日; stage III) の3つに分けた (図1-1)。

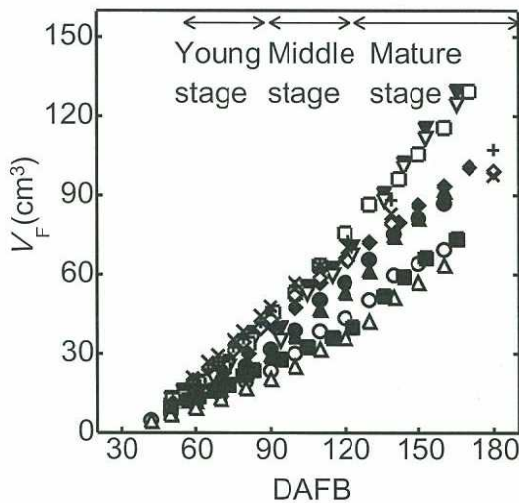


図1-1 満開後日数 (DAFB) に対する果実体積 (V_F) の推移。凡例は表1-1のとおり。

果実品質: 果実品質指標は、3樹以上の反復で満開後90、120、および180日に調査した。果汁の可溶性糖含量はデジタル糖度計 (PR-101、ATAGO Co., Ltd.) を用い、酸含量は滴定法で調査した。

3 結果

果実体積と相対果実肥大速度の推移: 図1-1に果実体積の推移を示す。いずれの生育ステージにおいても、処理区間で果実体積の大きな変動が認められた (図1-1)。露地ウンシュウミカンの果実成長は、気温と日射量の低下に伴い増加速度が減少し、成熟期 (満開後80-150日) に最大に達するシグモイド型を示す (新居¹¹⁾、1998)。しかし、ハウスミカンの果実成長は、シグモイド型を示さない場合もあった (図1-1)。図1-2にyoung stage、middle stageおよびmature stageにおける GRF_{St} の推移を示す。ほとんどの区では、果実成長に伴い GRF_{St} は減少した。

気温の影響: 本章においては $P < 0.05$ で有意な相関のみ各図に示した。young stageにおいて、 GRF_{St} と昼温 (T_{ad}) との間に二次式で回帰できる有意な相関

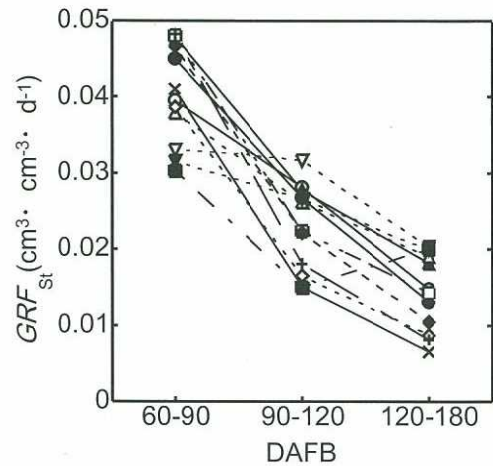


図1-2 満開後日数 (DAFB) に対する相対果実肥大速度 (GRF_{St}) の推移。凡例は表1-1のとおり。

($P < 0.01$) が認められ、その回帰式では $T_{ad} = 25^\circ\text{C}$ で GRF_{St} が最大となった (図1-3A)。また、 GRF_{St} と夜温 (T_{an}) との間に有意な正の相関 ($P < 0.01$) が認められた (図1-4A)。しかし、middle stage、およびmature stageでは、 GRF_{St} と気温 (T_{ad} 、 T_{an} 、および日平均気温 (T_{am})) との間に有意な相関は認められなかった (図1-3-5A)。果実品質においては、young stageの滴定酸度 (TA) と T_{ad} との間のみ有意な負の相関 ($P < 0.01$) が認められた (図3C)。なお、図1-3で昼温 25°C 以下のプロットがあるが、これは昼温の制御法が原因で、 25°C 以上の場合に換気扇が作動し、 25°C 以下の場合には暖房機は作動せず成り行きとしたことによる。
光条件の影響: GRF_{St} と積算放射 (ΣR) とにおいては、middle stageで両者に有意な負の相関 ($P < 0.01$) が認められた (図1-6A)。

果実品質では、young stageにおいて、TAと ΣR は負の相関 ($P < 0.05$) を示したが、mature stageでは両者は正の相関 ($P < 0.05$) を示した (図1-6C)。また、同じくmature stageでは可溶性糖含量 (SSC) と ΣR との間に正の相関 ($P < 0.01$) が認められた (図1-6B)。

木部水ポテンシャルの影響: 夜明け前の木部水ポテンシャル (Ψ_{xy}) は主に果実品質に影響していた。young stageでは Ψ_{xy} とTAとの間に負の相関 ($P < 0.05$) (図1-7C)、middle stageでは Ψ_{xy} とSSCとの間に負の相関 ($P < 0.01$) (図1-7B) が認められた。mature stageでは、 GRF_{St} と Ψ_{xy} との間に正の相関 ($P < 0.01$) (図1-7A)、SSCと Ψ_{xy} との間に負の相関 ($P < 0.01$) (図1-7B) がそれぞれ認められた。

果実収量に影響する要因: 葉面積あたり果実収量と満

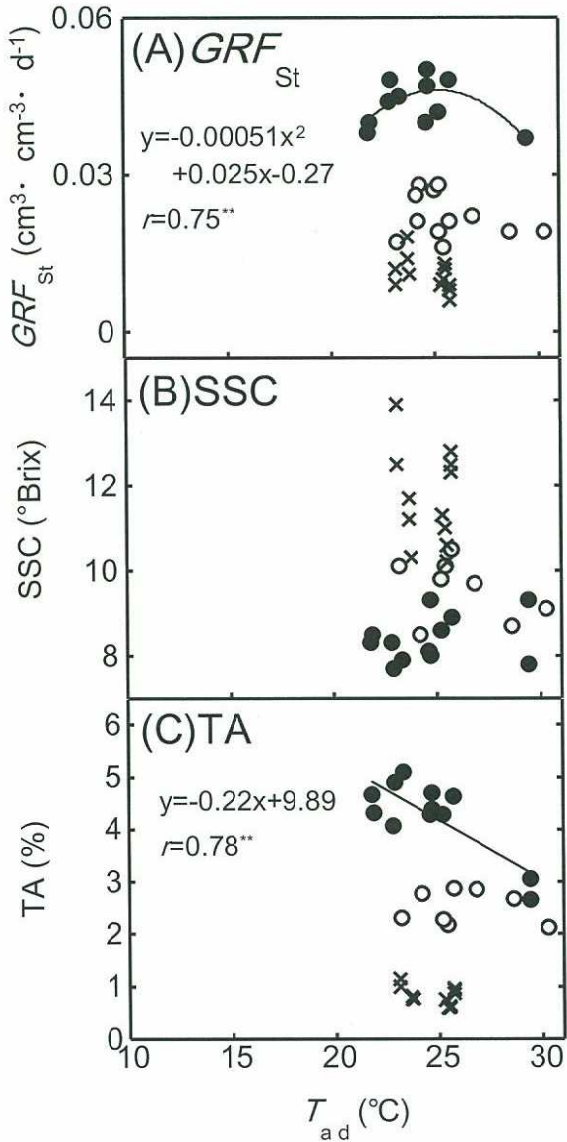


図1-3 昼温 (T_{ad}) と相対果実肥大速度 (GRF_{St}) (A), T_{ad} と果実糖含量 (SSC) (B), および果実滴定酸度 (TA) (C) との関係。凡例は, ●, young stage; ○, middle stage; および ×, mature stage. 図には $P < 0.05$ で有意な相関のみ示した。

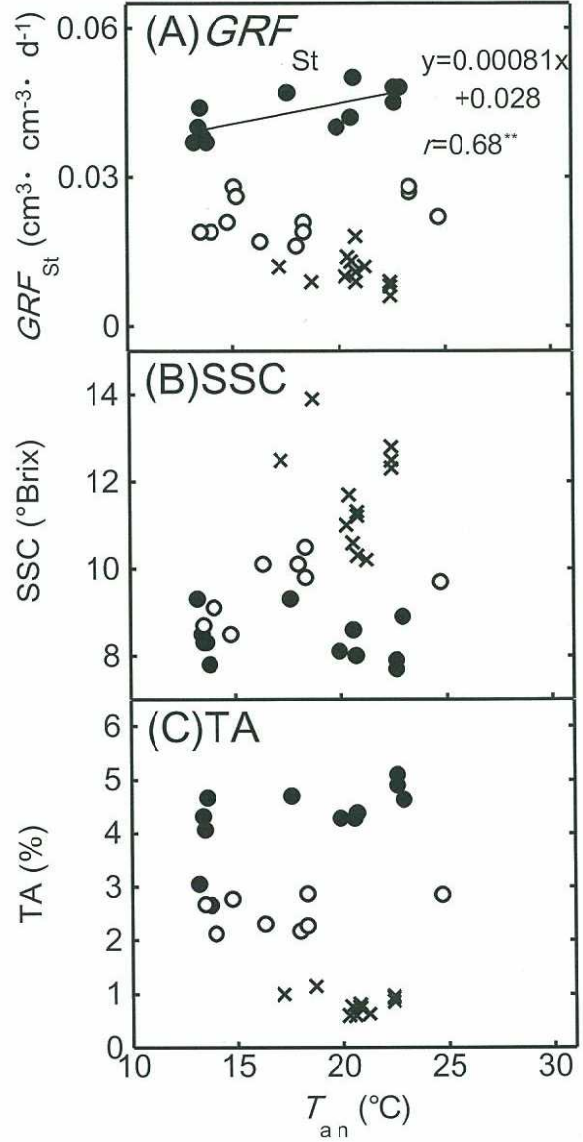


図1-4 夜温 (T_{an}) と相対果実肥大速度 (GRF_{St}) (A), T_{an} と果実糖含量 (SSC) (B), および果実滴定酸度 (TA) (C) との関係。凡例は, ●, young stage; ○, middle stage; および ×, mature stage. 図には $P < 0.05$ で有意な相関のみ示した。

開後60-180日の Ψ_{xy} との間に有意な正の相関 ($P < 0.01$) が認められた (図1-8C)。しかし、この期間における T_{adm} , T_{ad} (データ略), T_{an} (データ略), および ΣR と樹冠葉面積あたり果実収量との間には有意な相関が認められなかった (図1-8AおよびB)。

4 考察

ウンシュウミカンにおける既往の報告では、果実成長適温は20-25°Cで (栗原⁹⁰⁻⁹¹)、1969、1971; Kobayashi et al. ⁸¹)、1968; 新居ら¹¹⁴)、1970; 井上・

銭⁸⁴)、1988)、昼夜は関係ないとされている (新居ら¹¹⁴)、1970)。本研究の本章では、young stageにおいて、14-23°Cの範囲での平均夜温と相対果実肥大速度との間に正の相関が認められた (図1-4A)。しかし、young stageの昼温が約30°Cになると、相対果実肥大速度は明らかに抑制され、果実成長を促進する最適気温は25°Cと算出された (図1-3A)。さらに、middle stageとmature stageでは、気温 (日平均気温、昼温、および夜温) と相対果実肥大速度との有意な相関は認められなかった。これらの結果より、young stageの旺盛

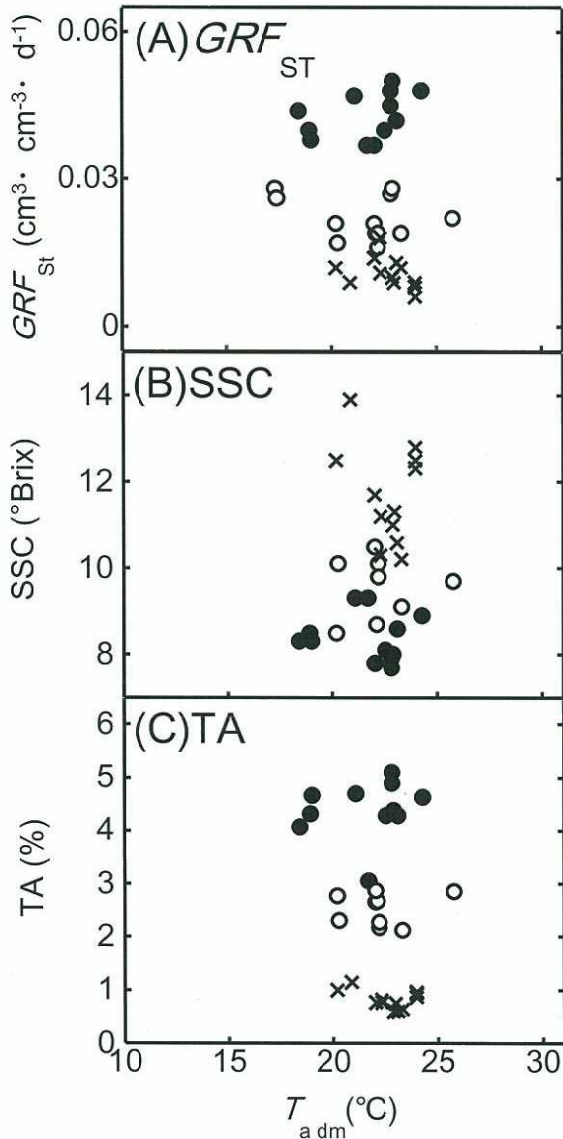


図1-5 日平均気温($T_{a\ dm}$)と相対果実肥大速度(GRF_{St}) (A), $T_{a\ dm}$ と果実糖含量 (SSC) (B), および果実滴定酸度 (TA) (C) との関係。凡例は, ●, young stage; ○, middle stage; および ×, mature stage. 図には $P < 0.05$ で有意な相関のみ示した。

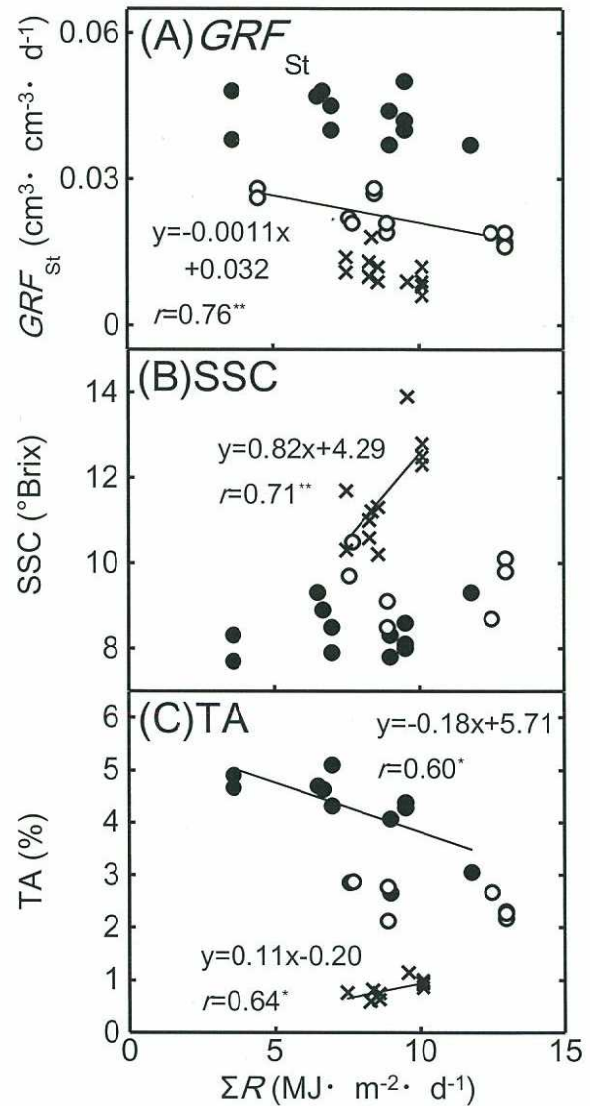


図1-6 積算放射 (ΣR) と相対果実肥大速度 (GRF_{St}) (A), $T_{a\ dm}$ と果実糖含量 (SSC) (B), および果実滴定酸度 (TA) (C) との関係。凡例は, ●, young stage; ○, middle stage; および ×, mature stage. 図には $P < 0.05$ で有意な相関のみ示した。

な果実成長には、昼温を25℃とし、夜温はやや高め
の20-23℃とする必要性が示唆された。また、middle
stageやmature stageの果実成長には、20-23℃といっ
た高い夜温は必要ない可能性も考えられた。

気温25℃以上における相対果実肥大速度の抑制は、
生殖成長から栄養成長への転換と関連があるかもしれ
ない。本章において、25℃以上の高温および補光によ
り、新梢の発生量が増大した (図1-9)。

25℃以上の高温条件下では、新梢発生と果実成長が
競合したため、相対果実肥大速度が抑制されたと考え

られる。この25℃以上における果実成長速度の低下
は、ウンシュウミカンに限らず、ニホンナシ (*Pyrus
pyrifolia* Nakai) (杉浦ら¹³⁶⁾, 1995) やトマト (Adams
et al.¹⁾, 2001, Wada et al.¹⁵³⁾, 2013) でも報告さ
れている。さらに、ウンシュウミカンにおいて、シロ
イヌナズナ *FT* (*FLOWERING LOCUS T*) 遺伝子のオル
ソログで花成に関連した *CiFT* の茎での発現は、花
成誘導が認められない25℃条件下や露地栽培の夏期で
はほとんど認められなかった (Nishikawa et al.<sup>116-
117)</sup>, 2007, 2009)。これら結果より、ウンシュウミカ

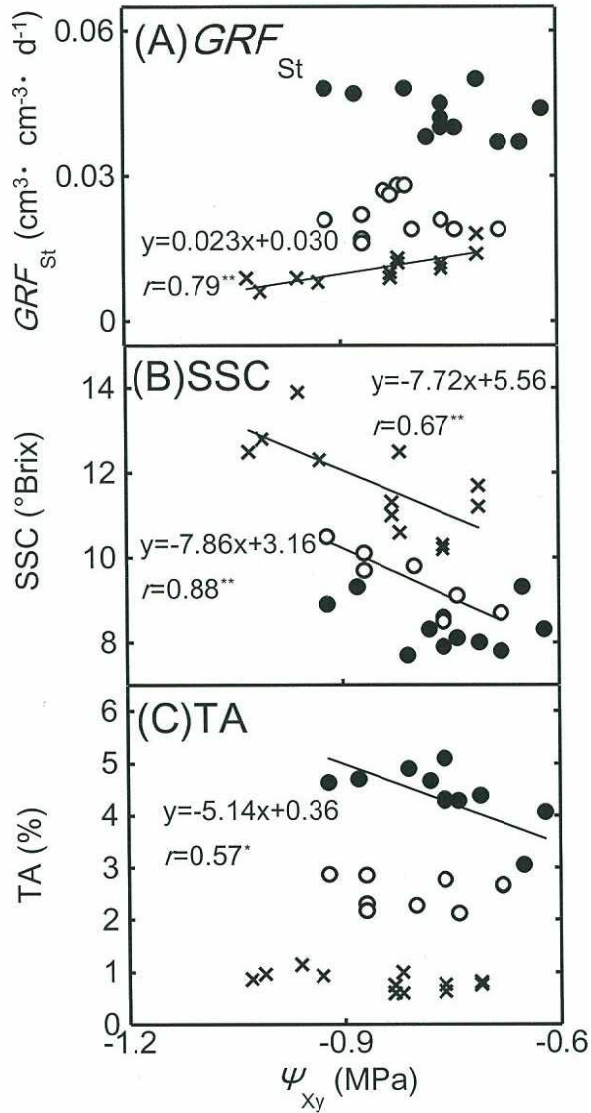


図1-7 夜明け前水ポテンシャル (ψ_{xy}) と相対果実肥大速度 (GRF_{St}) (A), T_{adm} と果実糖含量 (SSC) (B), および果実滴定酸度 (TA) (C) との関係。凡例は, ●, young stage; ○, middle stage; および ×, mature stage. 図には $P < 0.05$ で有意な相関のみ示した。

ンにおける栄養成長と生殖成長との転換温度は概ね 25°C と考えられる。

杉浦ら¹³⁶⁻¹³⁷⁾ (1993, 1995) は、ポットに植栽されたニホンナシの果実成長を様々な温度・日射条件下で解析し、動的な果実成長モデルを構築した。モデルは、果実の成長初期段階となる期間の長さを気温が決定しており、その初期成長段階以降の果実成長は、日射量が大きく左右するものである。本章でも同様の傾向が認められ、young stageの果実成長は低夜温で抑制されていた (図1-4A)。また、middle stageにおけ

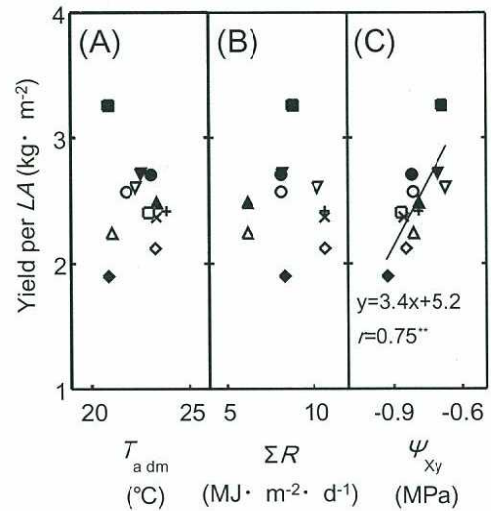


図1-8 樹冠葉面積 (LA) あたり果実収量と日平均気温 (T_{adm}) (A), LAあたり果実収量と積算放射 (ΣR) (B), およびLAあたり果実収量と夜明け前水ポテンシャル (ψ_{xy}) (C) との関係。凡例は表1-1のとおり。図には $P < 0.05$ で有意な相関のみ示した。

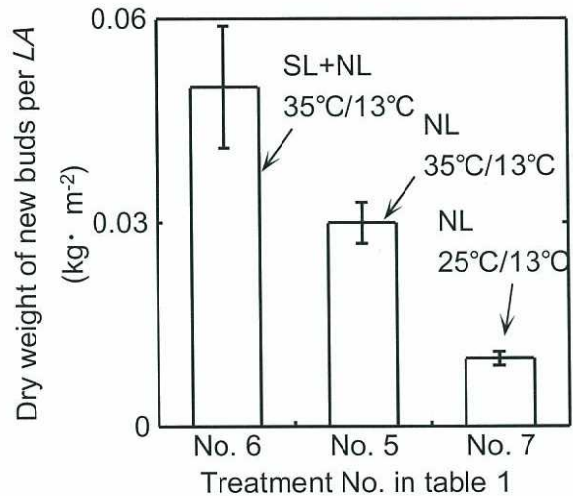


図1-9 処理期間中に発生した新梢の樹冠葉面積あたり乾物重の比較。No. は表1の処理No.を示す。図示した処理区環境は以下のとおり。光環境: SL+NL, 補光および自然光, NL, 自然光のみ、および昼/夜温。バーは標準誤差を示す。

る積算日射量の増大は相対果実肥大速度を抑制し (図1-6A)、mature stageにおける相対果実肥大速度の抑制は水ストレスの増大によるもので (図1-7A)、これらは果実糖度の上昇の要因と考えられた (図1-7B) (Kawano, 1984)。以上の結果より、気温制御下にあるハウスミカン満開後60-180日において、収量に最も

強い影響を及ぼす要因は、気温や日射量でなく水分状態であり (図1-8)、ウンシュウミカン栽培における水管理の重要性が再確認された。

本章での調査範囲における環境要因と果実品質との関係では、気温は果実糖度に影響しなかった (図1-3B、4B、および5B)。滴定酸度については、young stageにおいて、昼温 (図1-3C)、積算日射量 (図1-6C)、および夜明け前水ポテンシャル (図1-7C) といずれも負の相関を示した。しかし、本章では、滴定酸度の変動幅は果実生育が進むほど小さくなり、満開後90日で2.45%未満、満開後120日で0.75%未満、および満開後180日で0.54%未満となった (図1-3C)。これらの結果より、ハウスミカンのyoung stageにおける果実の滴定酸度は、適切な水管理さえ行われていれば、収穫時の滴定酸度にほとんど影響しないことが推察された。

本章の結果は、施設に植栽された成木を用いた複数年の調査結果であり、果実成長や品質に及ぼす影響を解明するには幾分の制約があったかと思われる。しかし、young stageでは果実成長と温度との間に有意な関係が認められたのに対し、middle stageとmature stageでは認められなかった (図1-3Aおよび4A)。高品質果実生産には、温度管理よりも水管理の方が重要で、実際のウンシュウミカン栽培現場においても、満開後180日の果実糖度12%をクリアするため、生産者は満開後120日時点での果実糖度10%を灌水量の判断指標としている。本章の結果から、満開後120日の果実糖度 (SSC₁₂₀) 10%を達成するためには、満開後90-120日の夜明け前水ポテンシャル ($\Psi_{xy, 90-120}$) を、図1-7Bで示された一次回帰式: $SSC_{120} = -7.86\Psi_{xy, 90-120} + 3.16$ より、 -0.87MPa に維持する必要がある。同様に、満開後180日の果実糖度 (SSC₁₈₀) 12%を達成するためには、満開後120-180日の夜明け前水ポテンシャル ($\Psi_{xy, 120-180}$) を、図1-7Bで示された一次回帰式: $SSC_{180} = -7.72\Psi_{xy, 120-180} + 5.56$ より、 -0.83MPa に維持する必要がある。これらの夜明け前水ポテンシャルは、既往の報告における適度な水ストレス程度 (Yakushiji et al.¹³⁰⁾、1998) で、ウンシュウミカンの高品質果実生産に妥当と考えられる。したがって、果実の成長や品質に及ぼす温度の影響について、より詳細に調査解析する場合 (表1-1 No.10-12のような夜間変温管理など) は、夜明け前水ポテンシャルをこれらの値に近づけておく必要がある。

ハウスミカンの効率的な省エネルギー温度管理として、young stageである満開後60-90日の昼/夜温を

25°C / 20-23°Cにすることが示された。満開後90日以降における20°C以下の夜温に関しては、IV以降で検討する。