

VI 異なる夜温管理法の適用

1 はじめに

過去40年間、植物生理に基づく様々な省エネルギー栽培管理法が園芸品目で報告されてきた。例えば、トマトでは、環境に応じた変温管理として、積算日射量に追従した夜温管理法（吉岡・高橋¹⁷⁰⁾、1981）などがある。しかし、果樹ではそういった栽培管理の有用性はほとんど報告されていない。

園芸品目において、夜温が植物の成長に及ぼす影響については一貫した結論は得られていない。例えば、トマトでは、温度（18–24°C）が乾物分配に直接影響せず（Heuvelink⁴⁶⁾、1995）、レタスやキクでは、異なる夜温管理が植物体の積算的な成長に及ぼす影響は極めて小さいことが報告されている（Langhans et al.⁹⁴⁾、1981）。一方、キュウリでは、恒温管理と比較して、変温管理で優れた結果が認められた（Challa and Brouwer¹⁵⁾、1985）。施設果樹における省エネルギー栽培管理技術を確立するには、これら結果がウンシュウミカンをはじめとする果樹に対し適用できるのかまず解明する必要があり、また園芸品目全般にも広く適用できるような、普遍的原則を見出すことが極めて重要である。

近年、EOD（End Of Day）-heatingと呼ばれる新しい夜温管理技術が花卉で注目されている（道園ら²⁴⁾、2010、2012）。このEOD-heatingは、省エネルギー夜温条件下で花成を促進させるもので、特徴は、日没後数時間は成長適正温度以上の夜温とし、その後深夜から日の出までの時間は成長適正温度以下で管理するものである。これは、成長適正温度内で管理する従来（Parups¹²²⁾、1978；Bonaminio and Larson¹²⁾、1980）とは異なる。ハウスミカンにおいても、発芽から開花までの間にEOD-heatingを試験したところ、慣行と比較して数日の開花遅れとなったが（矢野ら¹⁶⁷⁾、2013b）、このEOD-heatingが果実成長や品質に及ぼす影響は明らかでない。

ハウスミカンには、母枝となる夏枝の発生時期が揃っており、葉、茎、開花および果実の生育が時間的に均一である特徴から、¹³Cトレーサー実験に適すと考えられる。この特徴は、結果した夏枝をソース・シンクユニットとみなし、ソースとシンクのバランスをモデル化するのに好都合である。さらに、成木になるほど多くのユニットが得られ、ユニットを局所的に暖房あるいは冷房することで、夜間の数時間といった短期間

における果実成長反応やユニット内の¹³C動態などが効率的に解明できると思われる。

既往の報告では、ウンシュウミカンの高品質果実生産は、収穫前を20–25°Cに恒温維持することが念頭に置かれている（栗原⁹⁰⁻⁹¹⁾、1969、1971；宇都宮ら¹⁵¹⁾、1982；井上・銭⁶⁴⁾、1988）。すでに述べたように、ハウスミカンの幼果段階では、昼温25°Cで夜温20–23°Cとし果実成長を促すことが重要である（Yano et al.¹⁶²⁾、2014a）。また、高商品性の着色に優れた果実生産には、夜温は16–17°C以上とし果皮のカロテノイド生成を促す必要がある。

本章では、慣行着果量条件下において、20°C恒温をハウスミカンの高品質果実生産に適する夜温条件と想定し、二つの省エネルギー夜温管理法が果実成長と品質に及ぼす影響を検討した。一つは、EOD-heatingを含む、加温時間帯を変えた夜間変温管理法であり、もう一つは、積算日射比例型の夜温管理法である。数時間単位の果実成長やソース・シンクユニット内の葉から果実への¹³C動態は、局所加温システムを用いた短期的な調査手法を、また、数日単位の積算的な果実成長や木部水ポテンシャル、および果実品質などは長期的な調査手法をそれぞれ用い、異なる夜温管理法の評価を試みた。

2 材料および方法

局所加温システム：夜温が果実成長やソース・シンクユニット内の葉から果実への¹³C動態に及ぼす影響を明らかにするため、図6-1のとおり局所加温システムを作成した。システムは、電動ブローア（BN2.5 70mm、YOKOGAWA DENKI SEISAKUSHO Co. LTD）1個、ラジエータ（RF1、RF2 A/T、KOYO RADIATOR Co. LTD）2個、500 Wパイプヒーターと温度コントローラー（TC-3000、ASONE Co. LTD）各4個、循環ポンプ（FKP-1、ASONE Co. LTD）1個、および160L（41 × 52 × 76cm）水槽で構成した。局所加温処理中は、水槽内

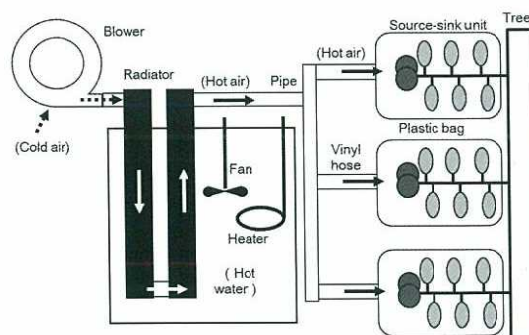


図6-1 局所加温装置の概要

の水温は60–65°Cで、電動ブロー吸入部の気温と末端のビニールホース熱風吹き出し口との気温差は5–8°Cであった(図6-1)。なお、局所加温処理中のみ、ソース・シンクユニット部は図6-1のとおりビニール袋へ封入した。

実験1；異なる加温時間帯の局所加温処理が果実成長に及ぼす短期的影響：加温ハウス内に植栽された7年生ウンシュウミカンを用いた。加温開始は2009年11月27日で満開は2010年1月5日であった。局所加温システム(図6-1)を用いた短期調査は、満開後116–117日に行った。夜温処理は、EOD-heating、MON(Middle Of Night)-heating、およびPd(Predawn)-heatingとした。

実験2；異なる加温時間帯の局所加温処理がソース・シンクユニット内の¹³C動態に及ぼす短期的影響：加温ハウス内に植栽された6年生ウンシュウミカン3樹を用いた。加温開始は2010年12月17日で満開は2011年1月22日であった。¹³C分配は、概ねIIと同様の方法で調査したが、本章ではソース・シンクユニットのうち葉と茎のみ¹³C処理し、果実は¹³C処理しなかった。局所加温システム(図6-1)を用いた短期調査は、満開後99–105日に行った。夜温処理は、高夜温区(HN、25°C一定)、EOD-heating、MON(Middle Of Night)-heating、Pd(Predawn)-heating、および低夜温区(LN、17°C一定)とした。

実験3；異なる加温時間帯の夜間変温管理と慣行夜温管理との比較：加温ハウス内に植栽された19年生ウンシュウミカンを用いた。加温開始は2012年12月19日で満開は2013年1月26日であった。満開後60–90日において、夜温処理は、EOD-heating(18:00–22:00に23°C)、MON-heating(Middle Of Night、22:00–2:00に23°C)、Con(Conventional nighttime heating、20°C一定)(図6-4B)とした。処理期間を平均した昼/夜温は、EOD、MON および Conで25.6°C/20.5°C、25.2°C/19.9°C、および25.1°C/20.8°Cとなった。満開後90日以降は、慣行管理とした。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。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)を用いて調査した。

実験4；積算日射比例型の夜温変温管理：加温ハウス内に植栽された9年生ウンシュウミカンを用いた。加温開始は2011年12月27日で満開は2012年1月26日であった。積算日射比例型の夜温処理は以下のとおりとした。日積算日射量(ΣR_s) > 7MJ・m⁻²の場合、18:00–0:00は23°Cで0:00–6:00は17°C、2MJ・m⁻² < ΣR_s < 7MJ・m⁻²の場合、18:00–0:00は20°Cで0:00–6:00は17°C、および ΣR_s < 2MJ・m⁻²の場合、18:00–6:00は17°C一定とした。夜温は、温度コントローラー(NT-341HN、NEPON Inc.)と照度センサー(LP PAR 01、Delta OHM)で制御した。表6-1に夜温処理の概要を示す。

¹³C分配は、概ねII(Yano et al.、2012)と同様の方法で調査したが、実験3と同様、ソース・シンクユニットのうち葉と茎のみ¹³C処理し、果実は¹³C処理しなかった。ユニット内の果実は、既報(Yakushiji et al.¹⁶⁰、1998)に従い、表皮、油胞、およびアルベドらを含む部位と、じょうのう膜(LM)と砂じょう(JS)を含む部位の2つに分けた。果汁の可溶性糖含量、酸含量、および夜明け前の木部水ポテンシャルは実験3と同様に求めた。

3 結果

実験1；異なる加温時間帯の局所加温処理が果実成長に及ぼす短期的影響：相対果実肥大速度(GRF_{St})は日中9:00–17:00は負の値を示したが、夜間は正の値を示した(図6-2B)。21:00には、EOD-heatingの GRF_{St} はPd-heatingより有意に大きくなり、深夜以降はいずれの処理も同程度の GRF_{St} を示した(図6-2B)。

実験2；異なる加温時間帯の局所加温処理がソース・シンクユニット内の¹³C動態に及ぼす短期的影響：図

表6-1 実験4における処理区

処理 ^y	DAFB		
	78–95	96–110	111–120
HN	25°C	25°C	22°C
ANT-1	25°C	ANT ^z	ANT ^z
ANT-2	ANT ^z	ANT ^z	ANT ^z
LN	17°C	17°C	17°C

^yHN：高夜温区、ANT-1：満開後78–120日に積算日射比例型の夜温変温管理区、ANT-2：満開後91–120日に積算日射比例型の夜温変温管理、およびLN：低夜温区、^z積算日射比例型の夜温変温管理区

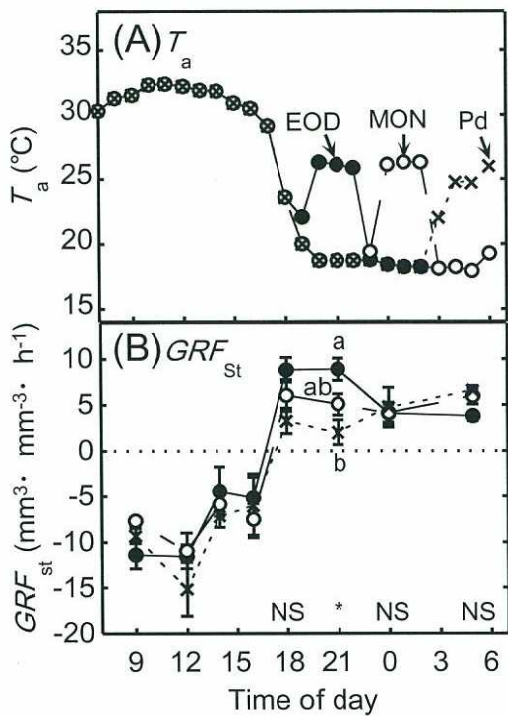


図6-2 局所加温システムを用いたEOD-heating (●), MON-heating (○), およびPd-heating (×) におけるソース・シンクユニット近傍の気温 (T_a) と果実相対肥大速度 (GRF_{st}) の日変化. 異なる英字はTukey-Kramer's testで有意差あり. *: $P \leq 0.05$, NS: not significant. $n=6$.

6-3にソース・シンクユニット近傍の気温 (T_a)、ソース・シンクユニットにおける果実への ^{13}C 分配 ($^{13}\text{C}_F$)、および処理別の夜温と $^{13}\text{C}_F$ 増加速度との関係を示す。処理終了時の6:00において、低夜温区 (LN、 17°C 一定) と比較して高夜温区 (HN、 25°C 一定) のみがやや高い $^{13}\text{C}_F$ を示した(図6-3B)。夜温処理を比較すると、EOD-heating (18:00-22:00) は、高夜温で $^{13}\text{C}_F$ が高い傾向であったのに対し、MON-heating (22:00-2:00) では逆に高夜温で $^{13}\text{C}_F$ が低い傾向であった(図6-3C)。実験3；異なる加温時間帯の夜間変温管理と慣行夜温管理との比較：図6-4に気温 (T_a)、処理期間(満開後60-90日)を平均した T_a の日変化、夜明け前の木部水ポテンシャル (Ψ_{xy})、果実体積 (V_F)、相対果実肥大速度 (GRF_{st})、果汁の可溶性糖含量 (SSC)、および滴定酸度 (TA) の推移を示す。 Ψ_{xy} は、満開後140日を除くと、いずれの処理もほぼ同様の推移を示し、満開後60-90日の処理間差は0.02-0.1 MPaの範囲であった(図6-4C)。MON-heatingにおいて、処理期間中の V_F の増加はやや抑制された程度であったが(図

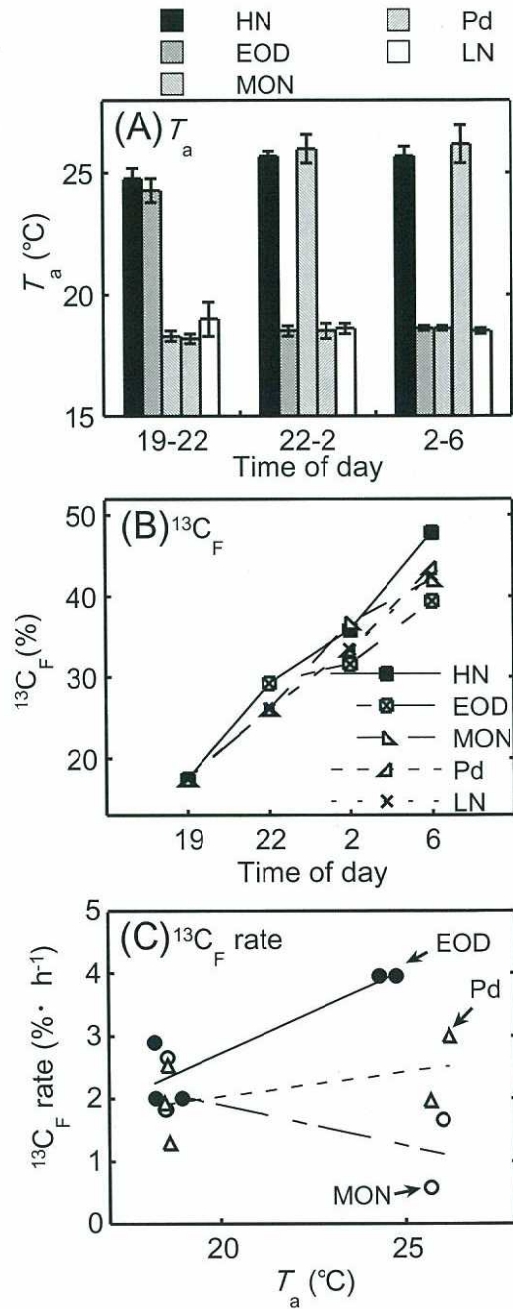


図6-3 局所加温システムによるソース・シンクユニット近傍の気温 (A)、高夜温区 (HN)、EOD-heating (EOD)、MON-heating (MON)、Pd-heating (Pd)、および低夜温区 (LN) におけるソース・シンクユニット内の果実への ^{13}C 分配 ($^{13}\text{C}_F$) (B)、異なる温度帯におけるEOD (19:00-22:00; ●), MON (22:00-2:00; ○), およびPd (2:00-6:00; △) の ^{13}C 分配増加速度 ($^{13}\text{C}_F$ rate) (C).

6-4D)、満開後62日の GRF_{st} は他と比べ有意に抑制された(図6-4E)。果実品質では、SSCおよびTAはどちらも有意な処理間差を示さなかった(図6-4F)。

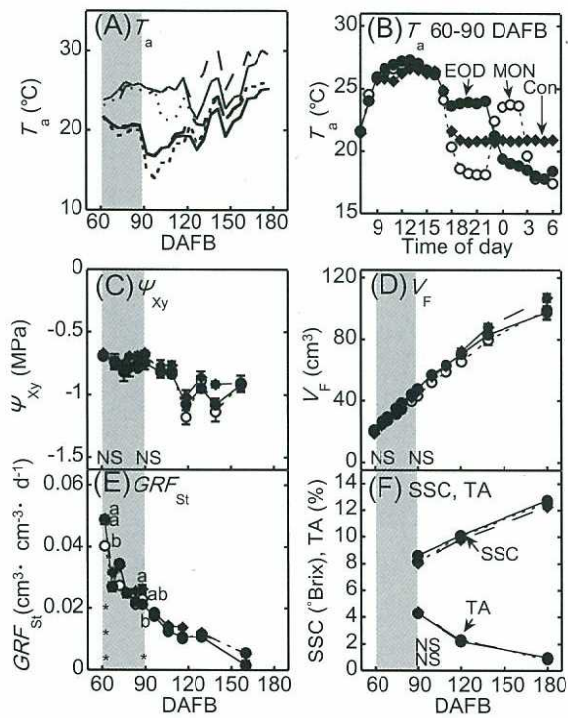


図6-4 EOD-heating(実線), MON-heating (幅狭点線), 慣行夜温区 (幅広点線) における昼温 (細線) と夜温 (太線) の推移 (A), EOD-heating (EOD ; ●), MON-heating (MON ; ○), 慣行夜温区 (Con ; ◆) における処理期間 (満開後60-90日) 中の気温 (T_a) 日変化 (B), 夜明け前水ポテンシャル (ψ_{xy}) (C), 果実体積 (V_F) (D), 相対果実体積増加速度 (GRF_{St}) (E), 果実可溶性糖含量 (SSC) および滴定酸度 (TA) (F) の推移。灰色の背景は処理期間を示す。処理期間の開始と終了における異なる英字はTukey-Kramer's testで有意差あり。*: $P < 0.05$, ***: $P < 0.001$, NS: not significant. $n \geq 5$.

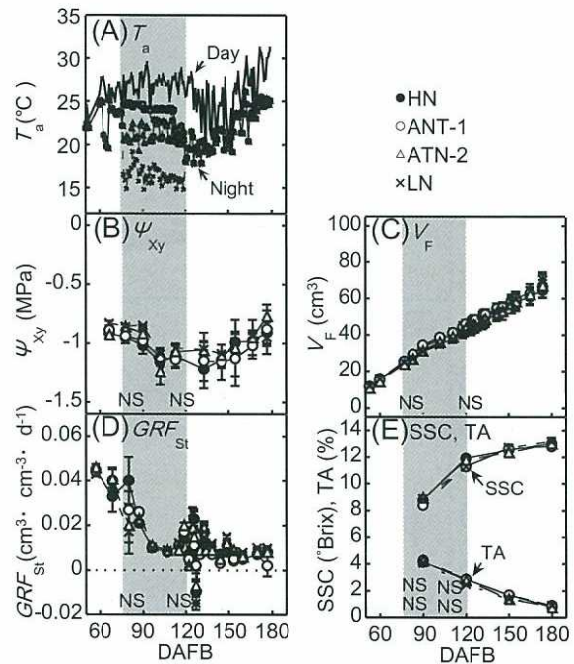


図6-5 高夜温区 (HN ; ●), 満開後96-120日に積算日射比例型の夜温変温管理区 (ANT-1; ○), 満開後78-120日に積算日射比例型の夜温変温管理区 (ANT-2; △), および低夜温区 (LN ; ×) における処理期間 (満開後78-120日) 中の気温 (T_a) (A), 夜明け前水ポテンシャル (ψ_{xy}) (B), 果実体積 (V_F) (C), 相対果実体積増加速度 (GRF_{St}) (D), 果実可溶性糖含量 (SSC) および滴定酸度 (TA) (E) の推移。灰色の背景は処理期間を示す。処理期間の開始と終了における異なる英字はTukey-Kramer's testで有意差あり。*: $P < 0.05$, ***: $P < 0.001$, NS: not significant. $n \geq 5$.

実験4；積算日射比例型の夜温変温管理：表6-2に満開後78-120日の V_F と果実体積増加割合を示す。満開後77日の果実体積を100とした43日後の果実体積増加割合は、高夜温区 (HN) > 満開後78-120日に積算日射比例型の夜温変温管理区 (ANT-1) ≒ 満開後91-120日

に積算日射比例型の夜温変温管理区 (ANT-2) > 低夜温区 (LN) となった。

図6-5Aに処理期間を含む気温 (T_a) の推移を示す。満開後80日の GRF_{St} において、HNとANT-1がANT-2とLNよりも高い傾向を示した (図6-5D)。満開後96日以降は、いずれの区の GRF_{St} も同様の値を示し、日数の経

表6-2 実験4における果実体積 (V_F) と満開後77日の果実体積を100としたVF増加の割合 (%)

DAFB	HN		ANT-1		ANT-2		LN	
	cm^3	(%)	cm^3	(%)	cm^3	(%)	cm^3	(%)
77	23.8	(100)	25.3	(100)	23.9	(100)	24.9	(100)
120	44.8	(188)	46.0	(182)	43.5	(182)	42.1	(169)

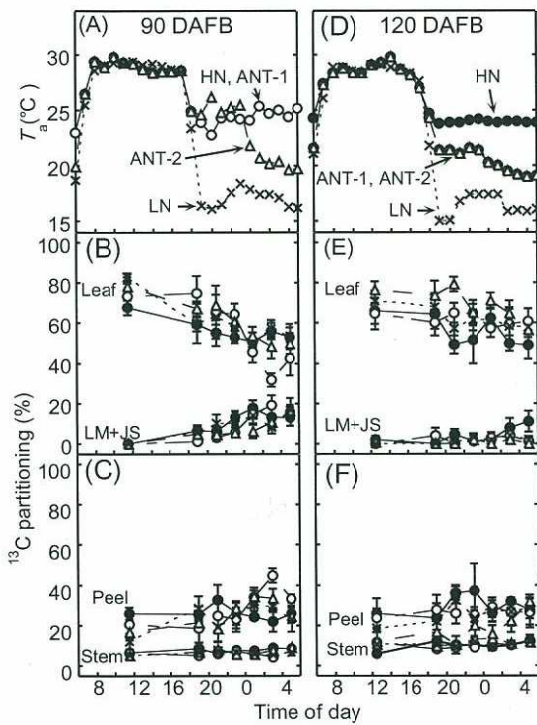


図6-6 満開後90日と120日の高夜温区 (HN; ●), 満開後96-120日に積算日射比例型の夜温変温管理区 (ANT-1; ○), 満開後78-120日に積算日射比例型の夜温変温管理区 (ANT-2; △), および低夜温区 (LN; ×) における気温日変化 (T_a) (AおよびD), ソース・シンクユニットにおける ^{13}C 分配の日変化 (B-CおよびE-F). BおよびEのLM+JSは、じょうのう膜+砂じょうを示す.

過とともに減少した (図6-5D)。満開後119日に一時的なピークが認められたが、これは Ψ_{xy} の微増を伴う満開後118日のかん水によるものである (図6-5Bおよび5D)。処理期間中の Ψ_{xy} は、ほぼ同様の推移を示した (図6-5B)。SSCおよびTAは、満開後78-120日と満開後120-180日の両期間とも処理間で差がなかった (図6-5E)。

図6-6に満開後90日および120日における T_a とソース・シンクユニットにおける ^{13}C 分配の日変化を示す。夜温処理が葉から果実 (LM; じょうのう膜, JS; 砂じょう, および果皮) への ^{13}C 分配に及ぼす影響は、満開後90日 (図6-6Bおよび6C) および120日 (図6-6Eおよび6F) のどちらも明らかでなかった。しかし、果実生育ステージで傾向が異なり、満開後90日では、可食部であるLM+JSの ^{13}C 分配は、夜の時間経過とともに全体的に増加する傾向であったが (図6-6B)、満開後120日ではLM+JSへの ^{13}C 分配は夜間ほとんど増加しな

かった (図6-6E)。

図6-7に満開後89日および112日における日積算した1果あたりの水収支と炭素収支を示す。水収支では、満開後89日および112日とも日積算師部汁液フラックス (ΣJ_{Phlo}) と日積算木部汁液フラックス (ΣJ_{Xy}) の処理区間で変動が大きかったが、日積算果実体積変化速度 (ΣGRF) の処理区間差は極めて小さかった (図6-7AおよびB)。炭素収支では、いずれの処理区でも日積算果実光合成速度 (ΣA_F) を除き満開後89日より112日で値が小さくなった。満開後89日では、1果あたり積算転流量 (ΣTL) と日果実乾物増加量 (DM_F) の処理区間で変動があり低夜温ほど値が小さくなったが、満開後112日では処理区間で明確な変動が認められなかった (図6-7CおよびD)。

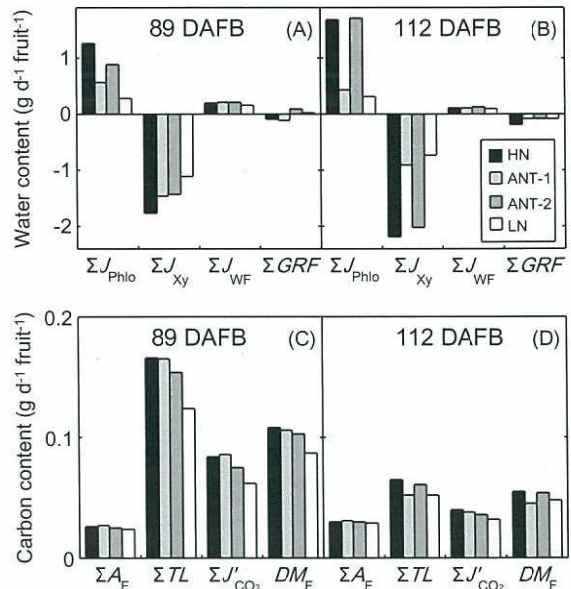


図6-7 満開後89日と112日における高夜温区 (HN), 満開後96-120日に積算日射比例型の夜温変温管理区 (ANT-1), 満開後78-120日に積算日射比例型の夜温変温管理区 (ANT-2), および低夜温区 (LN) の日積算した1果あたり水収支 (AおよびB) と炭素収支 (CおよびD). 水収支は、日積算師部汁液フラックス (ΣJ_{Phlo}), 日積算木部汁液フラックス (ΣJ_{Xy}), 日積算果実体積変化速度 (ΣGRF), および日積算果実蒸散フラックス (ΣJ_{WF}) で示した. 炭素収支は、1果あたり積算転流量 (ΣTL), 日積算果実光合成速度 (ΣA_F), 日果実乾物増加量 (DM_F), および日積算果実暗呼吸速度 (ΣJ_{CO_2}) で示した.

4 考察

本章では、二つの省エネルギー夜温管理法を検討した。一つは、実験1、2、および3を通じた、EOD-heatingを含む、加温時間帯を変えた夜間変温管理法であり、もう一つは、実験4を通じた、積算日射比例型の夜温管理法である。概して、加温時間帯を変えた変温管理も、積算日射比例型の管理も、慣行管理より格段優れたわけではなく、換言すれば、異なる夜温管理がハウスマカンの果実成長や品質に及ぼす積算的効果は極めて小さいと考えられた。

加温時間帯を変えた夜間変温管理法において、局所加温システムを用いた短期調査では、EOD-heatingは、一時的に果実成長を促進し(図6-2)、葉から果実への¹³C分配速度を速めた(図6-3)。しかし、樹全体を加温した栽培試験では、満開後60-90日において、慣行の夜間20°C一定と比較して、EOD-heatingは果実体積の増加と品質に優れた効果を示さなかった(図6-4)。また、MON-heatingは果実成長の抑制を示したため(図6-4E)、少なくとも満開後60-90日の18:00-22:00は夜温20°C以上で管理すべきと考えられた。積算日射比例型の夜温管理法においては、満開後80日前後を17°Cのような低夜温で管理すると、果実成長が抑制される傾向があったが(図6-5Cおよび5D)、果実品質は影響されなかった(図6-5E)。これら結果は、ハウスマカンにおいて、慣行夜温管理よりもEOD-heatingや積算日射比例型の夜温管理が優れないことを示す。

果実の水・炭素収支を考える場合において、単に加温時間帯のみが変化し、夜間の積算気温は等しいような変温管理法では、本章のような詳細な調査により、短期的な収支変動は観察できても(図6-2および図6-3)、10日単位といった比較的長期間にわたる収支においては、本章のような温度域では大きな変動はないと考えられる。

一方、本章における積算日射比例型の夜温管理法のように、処理区間で加温期間中の夜間積算気温が大きく異なっている場合は、日積算値のレベルにおける収支変動が定量化できると考えられる。まず、水収支においては、満開後89日および112日とも木部・師部経路の水流入量である日積算師部汁液フラックスと日積算木部汁液フラックスは、どちらも処理区間で変動が大きく、夜温の違いとの整合性は認められなかった(図6-7AおよびB)。これは一時的な水ストレスの変動が原因と考えられる。しかし、両者の和である日積算果実体積変化速度の処理区間差は極めて小さく、今回の処理温度の範囲では、果実肥大に及ぼす温度の影響

は小さかったことが推察できる(図6-7AおよびB)。次に炭素収支では、満開後89日における1果あたり積算転流量は、24.5°Cの高夜温区で $0.17\text{g} \cdot \text{fruit}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 、17.3°Cの低夜温区で $0.12\text{g} \cdot \text{fruit}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ であったが、満開後112日における24.0°Cの高夜温区で $0.06\text{g} \cdot \text{fruit}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 、16.7°Cの低夜温区で $0.05\text{g} \cdot \text{fruit}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ となった(図6-7CおよびD)。すなわち、慣行よりも約7°C下げた低夜温管理を行う場合、満開後90日以前では $0.166 - 0.124 = 0.041\text{g} \cdot \text{fruit}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ の炭素転流が抑制されるが、満開後90日以降に行うと炭素転流抑制は $0.065 - 0.052 = 0.013\text{g} \cdot \text{fruit}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ にとどまる。日果実乾物増加量においても、同様に慣行よりも約7°C下げた低夜温管理を行う場合、満開後90日以前では $0.108 - 0.087 = 0.021\text{g} \cdot \text{fruit}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ の果実への乾物増加が抑制されるが、満開後90日以降に行うと果実への乾物増加抑制は $0.055 - 0.048 = 0.0069\text{g} \cdot \text{fruit}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ にとどまり(図6-7CおよびD)、これらの結果より満開後90日以降に夜温を下げ管理することの合理性が定量的に示された。

ソースとシンクの関係は、果実の生育ステージによって変動することが考えられる。本章では、夜温に関係なく、満開後90日の夜間に果実(じょうのう膜と砂じょう)への¹³C分配が認められたが、満開後120日の夜間では果実への¹³C分配がほとんど認められなかった(図6-6)。この結果からも、葉から果実への炭素転流における果実の温度要求性は、満開後90日以降よりも満開後90日以前で高く、満開後90-120日における省エネルギー夜温管理の有効性が示された。ただし、満開後90日および120日は、ともに昼温が27-28°Cと高かったにも関わらず、両日とも午後における果実への¹³C分配はほとんど認められなかった(図6-6)。この高昼温でも果実への¹³C分配が促進されなかった原因に、果実生育ステージの特性や水ストレス条件等の影響が考えられる。

ウンシュウミカンにおける既往の報告では、温度が果実品質に影響し、8-15°Cといった低夜温で減酸や果実糖度上昇が抑制されることが示されている(栗原⁹⁰⁻⁹¹⁾、1969、1971; 宇都宮¹⁵¹⁾、1982; 井上・銭⁶⁴⁾、1988)。しかし、本章では、17°Cのような低夜温であっても果実糖度や滴定酸度が顕著に増加あるいは減少する傾向は認められなかった(図6-5E)。既往の報告は、温度処理は主にstages II-III(果実の細胞肥大期から成熟期まで; 菊池⁷⁴⁾、1964)を対象とし、露地ウンシュウミカン栽培の秋から冬の条件を想定している。また、既往の報告における減酸抑制は、

果実体積増加の抑制を伴っている場合が多い（栗原⁹⁰⁻⁹¹⁾、1969、1971；宇都宮ら¹⁵¹⁾、1982；井上・銭⁶⁴⁾、1988）。夏期に収穫するハウスミカンの主な作型は、stages IIIの夜温は適正域（20-25°C）にあると考えられる（I、Yano et al.¹⁶²⁾、2014a）。このような作型では、適切な水管理条件下であれば大幅に酸高な果実はほとんど生産されない。よってウンシュウミカンの酸含量は、果実のトリカルボン酸回路といった有機酸代謝と、stages II-IIIの物理的な体積変化により決定されるものと考えられる。