

III 光条件が果実の水・炭素収支に及ぼす影響

1 はじめに

光条件は、植物の高生産に極めて重要な環境要因である。1 段栽培トマトにおける長期間の調査では、開花から収穫までの総受光量と収量との間には強い相関が認められている (McAvoy et al.¹⁰²⁾、1989)。一方で、遮光が収量を減少させる報告 (Cockshull et al.¹⁷⁾、1992) もあれば、あまり影響しないとする報告 (Russo¹³¹⁾、1993) もある。イチゴでは、定植ベッドの垂直可動を最適化することで総光合成量が増大し、多収となる報告もある (Hidaka et al.⁴⁹⁾、2012)。トマトでは旺盛な成長を示す果実生育段階において、光照射は明らかに果実成長と同化産物の転流を促進させる (Pearce et al.¹²⁸⁾、1993; 北野ら⁷⁷⁾、1998)。一般的に、多くの作物や果菜類において、遮光は収穫物の品質にマイナスの影響を与えることが多い。

施設栽培においては、より容積の大きな収穫物が望まれても、冬期や曇天といった低日射条件下では、炭水化物代謝が大きく制限される。例えば、ハウスミカンの主要作型では、夏期に収穫するため、冬から春の低日射条件下で果実成長を促す必要がある。加えて、生産現場では、ハウス内日射量が減少しても省エネルギーを優先し、施設内天井を多層被覆している。先に述べたような光条件と果実成長については、果菜類での調査結果のため、果樹成木を用い、日射が果実成長に及ぼす影響を長期・短期両面から解明することは、高品質果実生産に重要と思われる。

ウンシュウミカンの果実成長においては、満開後 10-30 日に若いシンク器官 (主に幼果と新梢) 間での養分競合により、生理落果が起こる。この競合は高温や寡日照といった環境条件で助長される。生理落果後は、細胞の分裂と成長、果柄の径や木部組織の発達 (Nii¹¹³⁾、1980)、オーキシン含量 (Igoshi et al.⁶²⁾、1971; Takahashi et al.¹⁴⁰⁾、1975) やエチレン生成 (Murata and Miyashita¹⁰⁹⁾、1970; Hyodo and Murata⁶⁰⁾、1972) など、果実成長に関連した種々のダイナミックな変動が観察・報告されている。また、満開後 90-110 日には、(1) 果実成長は頭打ちとなり、シグモイド型成長の最後の段階に移行する (Kubo and Hiratsuka⁸⁶⁾、1998)、(2) 果皮表面が滑らかになる、(3) 砂じょう中へのスクロース蓄積が開始し、クエン酸が急激に減少する (Kubo et al.⁸⁵⁾、2001)、(4) 満開後 110 日直後の段階より、クロロフィル分

解とカロチノイド合成が開始する、といった形態的・生理的に大きな変化が訪れる。これら報告は、ハウスミカンにおける最終的な果実収量や品質は、若い成長段階の果実に対する環境要因によって左右されることを示唆している。

本章では、ハウスミカンの果実成長に対する光条件の長期および短期的な影響について果実の水・炭素収支定量化の観点から議論し、低日射条件に対応する栽培管理について考察を試みた。

2 材料および方法

材料: ハウス内で栽培された 17 年生「宮川早生」を用いた。加温開始は 2009 年 11 月 28 日、満開日は 2010 年 1 月 5 日、加温終了は同年 5 月 19 日、収穫は同年 7 月 5 日であった。昼/夜温や灌水等の肥培管理は慣行に従った。遮光処理は、満開後 50-123 日に行い、処理期間中は昼/夜温を 28°C / 23°C に設定した。加温終了後はサイドを開放した。

ソース・シンクユニット: 葉から果実への同化産物の動態を把握するため、II と同様のソース・シンクユニットを定義した。ユニットは、2009 年発生夏枝を母枝とし、生産年の 2010 年に 2 果と 7 葉を含む着果枝であった (図 2-3)。

遮光処理: 無処理 (control) と 50% 遮光区 (shading) の 2 処理区を設けた。50% 遮光区は、シルバーポリエチレンフィルムを用い、高さ 2.5-3.7m の内張アーチに満開後 50 日から 123 日まで展帳した。処理の反復は両区とも 3 樹であった。

水・炭素動態の計測: 葉および果実のガス交換、果実成長速度、および果柄汁液フラックスは第 2 章と同様に計測した。ただし、果実表面の蒸散フラックス (J_{WF} ; $m^3 \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$) および暗黒条件下の果実 CO_2 放出速度 (J_{CO_2} ; $mmol \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$) は、生育ステージに応じて図 3-1 および図 3-2 により求めた。

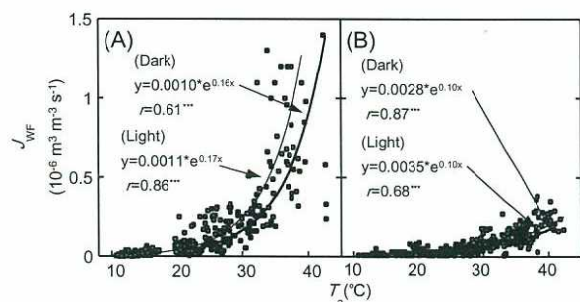


図3-1 満開後30-90日 (A) および90・120日 (B) の果実におけるチャンパー内気温 (T_a) と暗黒条件下 (●) および自然光条件下 (○) の果実蒸散速度 (J_{WF}) との関係。

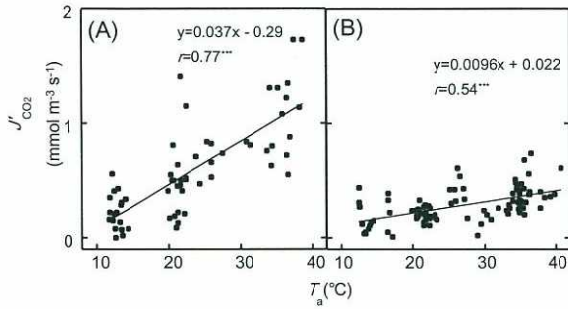


図3-2 満開後30-90日 (A) および90・120日 (B) の果実におけるチャンパー内気温 (T_a) と暗黒条件下の果実 CO_2 放出速度 (J'_{CO_2}) との関係。

果実への転流速度および果実の相対成長率：1果あたり転流速度 (RTL ; $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) は以下の式で求めた。

$$RTL = (\Sigma J'_{\text{CO}_2} + \Delta DM_F / \Sigma A_F) / DM_F / 24 \quad (3-1)$$
 ここで、 $\Sigma J'_{\text{CO}_2}$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)、 ΔDM_F ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)、 DM_F (g)、および ΣA_F は、日積算果実暗呼吸量、日果実乾物増加量、果実乾物重、および日積算果実光合成量をそれぞれ示す。なお本章では、 ΔDM_F は図3-3Dに示された一回帰式 (図の回帰式は、ユニット内2果の計を反映) より、1果あたりの乾物増加速度をcontrolとshadingで、それぞれ $0.69 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ と $0.62 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ とした。

果実の相対成長率 (RGR_F ; $\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) は以下の式で求めた。

$$RGR_F = \Delta DM_F / DM_F \quad (3-2)$$

なお、 CO_2 と炭水化物 ($\text{CH}_2\text{O}/\text{CO}_2$) との換算係数は0.68とした。

果実品質と果皮色：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。果皮色は、測色色差計 (ZE2000、NIPPON DENSHOKU Co.、Ltd.) で計測した。

3 結果

光条件と他の環境要因が果実成長に及ぼす長期的な影響：図3-3Aおよび3Bに栽培環境 (ΣR_s 、積算日射量； T_a 、気温) の長期的な推移を示す。遮光処理開始直前までの満開後0-49日における ΣR_s は、 $241 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ であった。満開から遮光処理が終了した満開後123日までの ΣR_s は、controlで $780 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ であったのに対し、shadingでは $533 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ であった (図3-3A)。shadingとcontrolにおける T_a と夜明け前水ポテンシャル (Ψ_{xy}) の推移は、両区とも類似した推移を示した (図3-3Bおよび3C)。

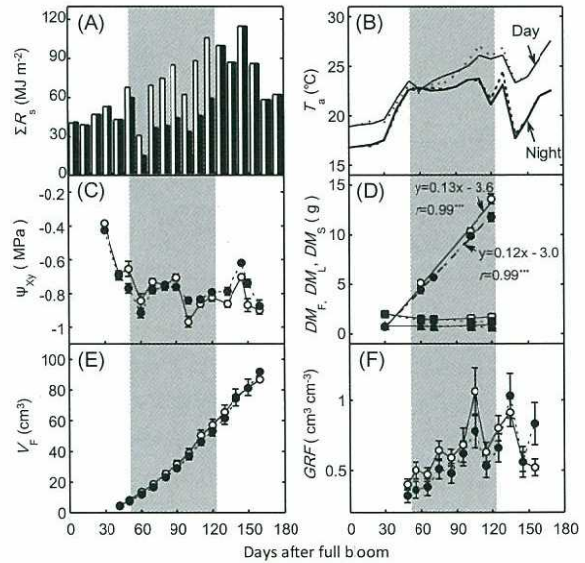


図3-3 control (白・実線) とshading (黒・点線) における積算日射量 (ΣR_s) (A)、気温 (T_a) (B)、夜明け前水ポテンシャル (ψ_{xy}) (C)、ソース・シンクユニットにおける葉 (DM_L ; 丸)、茎 (DM_S ; 四角)、および果実 (DM_F ; 三角) の乾物重 (D)、果実体積 (V_F) (E) および果実体積増加速度 (GRF) (F) の推移。灰色の背景は遮光処理期間を示す。

図3-3Dにソース・シンクユニットにおける部位毎の乾物重 (葉; DM_L 、茎; DM_S 、および果実; DM_F) の推移を示す。shadingにより、 DM_F 増加の抑制と DM_L および DM_S の減少が認められた (図3-3D)。

図3-3Eおよび3Fに果実成長の長期的推移を示す。果実体積 (V_F) と果実体積増加速度 (GRF) は、shadingにより抑制された。 GRF は満開後105日に一時的に急増したが、これはかん水による樹体ストレスの緩和によった (図3-3Eおよび3F)。

光条件と他の環境要因が果実成長に及ぼす短期的な影響：図3-4に満開後60、71、および120日における環境要因の日変化を示す。満開後60日は曇天、満開後71および120日は晴天であった (図3-4A-4C)。満開後60日と71日の T_a は $23-25^\circ\text{C}$ の範囲に (図3-4Dおよび4E)、満開後120日の T_a は $23-30^\circ\text{C}$ の範囲にあった (図3-4F)。満開後60日のみ日中の飽差 (VPD) が 10hPa を下回ったが、満開後71日と120日は VPD が高く、満開後120日は特に高くなった (図3-4Eおよび4F)。光条件が変わっても、 T_a と VPD には大差は認められなかった (図3-4D-F)。

図3-5に満開後60、71、および120日における葉の気

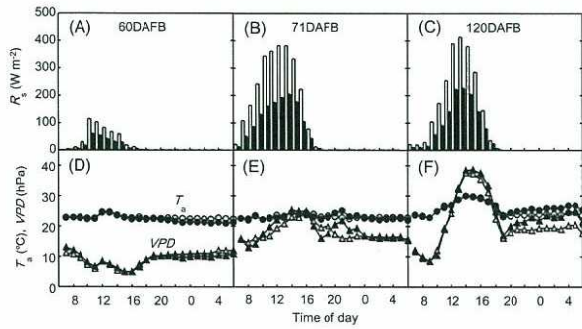


図3-4 満開後60, 71, および120日のcontrol (白) とshading (黒) における日射量 (R_s) (A-C), 気温 (T_a) (D-F), および飽差 (VPD) の推移。

孔コンダクタンス (G_s), 蒸散速度 (T_L), および見かけの光合成速度 (A_L) の日変化を示す。満開後60日は、午前後半の R_s 上昇で G_s , T_L , および A_L が増大し、それらピーク値はいずれも光条件を反映していた (図3-5A, 5D, および5G)。満開後71日と120日における葉のガス交換速度 (T_L および A_L) の推移は、満開後60日と同様の推移を示した。しかし、若い果実生育ステージほど日積算 A_L に及ぼす光条件の影響が大きくなった (図3-5G-I)。

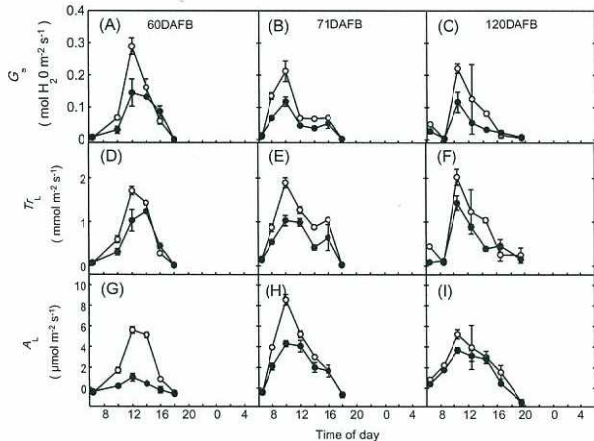


図3-5 満開後60, 71, および120日のcontrol (白) とshading (黒) における葉の気孔コンダクタンス (G_s , A-C), 葉の蒸散速度 (T_L , D-F), および葉の見かけの光合成速度 (A_L , G-I) の日変化。

図3-6に満開後60, 71, および120日における果実の水収支とガス交換の日変化を示す。果実水収支では、満開後60日において、 GRF は日中に正の値を示し、夕方にはほぼゼロとなり夜間もそのまま推移した (図3-6A)。しかし、満開後71日と120日では、 GRF は日中に負の値を示したが、午後の始めには増加に転じて、

夕方には正の値となり夜間も正の値を維持した (図3-6Bおよび6C)。 GRF は、shadingにより、満開後60日の午後 (図3-6A) と満開後71日の夕方および夜の始め (図3-6B) に減少した。しかし、shadingにおける GRF は、概ねcontrolと同様の推移を示した。 J_{WF} は一日を通じほぼゼロであった (図3-6A-6C)。

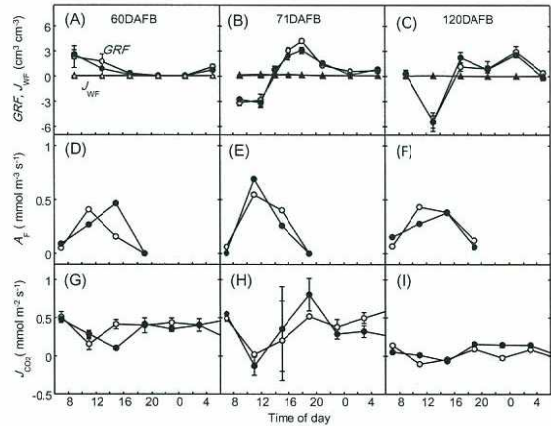


図3-6 満開後60, 71, および120日のcontrol (白) とshading (黒) における果実体積増加速度 (GRF) および果実蒸散速度 (J_{WF}) (A-C), 果実光合成速度 (A_F) (D-F), 自然光条件下での果実 CO_2 放出速度 (J_{CO_2}) (G-I)。

果実のガス交換では、果実の光合成 (A_F) はIIの式 (2-1) のとおり、 T_a と自然光条件下での果実 CO_2 放出速度 (J_{CO_2}) から求められ、shadingとcontrolは同様の推移を示した (図3-6D-6F)。 J_{CO_2} は、果実生育ステージによって異なる推移を示した。満開後60日は、正の比較的安定した推移であったが (図3-6G)、満開後71日は異なり、 GRF とよく似た推移を示した。特に、 GRF と J_{CO_2} は、shadingとcontrolの両方とも、午前後半に負のピークを示し、夜の始めに正のピークを示した (図3-6Bおよび6H)。満開後120日の J_{CO_2} は、shadingとcontrolの両方とも終日ほとんどゼロに近い低い値で推移した (図3-6I)。

果実水収支の特徴：図3-7Aおよび7Bに満開後60, 71, 100, および120日における樹上果実の水収支日積算を示す。

水流入においては、満開後71および100日の果実への日積算部汁液フラックス (ΣJ_{Phlo}) はshadingで減少した。一方、日積算木部汁液フラックス (ΣJ_{Xy}) は大きな変動を示した。 ΣJ_{Xy} は、満開後71日ではshadingとcontrolの両方ともほぼ同じ値であったが、満開後100日ではshadingがcontrolよりも大きくなった。満開後120日では、shadingがcontrolよりも大き

な負の値を示した (図3-7A)。水の分配では、果実に流入する日積算汁液 (ΣJ_{Sap} ; ΣJ_{Xy} + ΣJ_{Phlo}) も大きな変動を示した。 ΣJ_{Sap} は、満開後60日および71日ではshadingがcontrolよりも小さくなり、満開後100日および120日では逆にshadingがcontrolよりも大きくなった (図3-7B)。果実から樹体方向への逆流が認められた満開後120日を除けば、controlでは ΣJ_{Sap} の72%以上の水が、shadingでは ΣJ_{Sap} の46%以上の水が果実成長に分配されていた (図3-7B)。 J_{WF} は満開後60日に低く、満開後100日に最も高くなった (図3-7B)。

果実炭素収支の特徴：図3-7Cおよび7Dに満開後60、71、100、および120日における樹上果実の炭素収支日積算を示す。炭素流入においては、 ΣA_{F} は満開後60日に最小、満開後120日に最大となったのに対し、1果あたり積算転流量 (ΣTL) は満開後120日に最小、満開後100日に最大となった (図3-7C)。炭素の分配では、 $\Sigma J'_{\text{CO}_2}$ は DM_{F} の5-30%であった (図3-7D)。

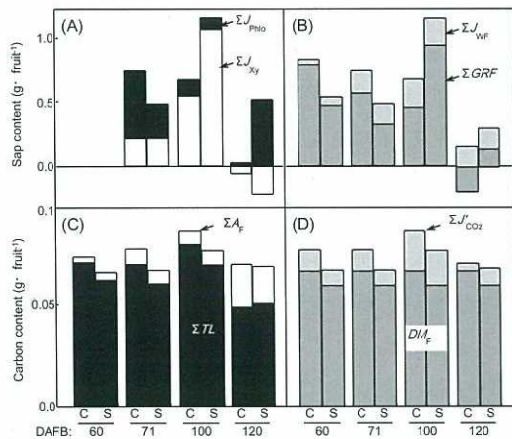


図3-7 満開後60、71、100、および120日における果実の日積算水収支 (AおよびB) と日積算炭素収支 (CおよびD)。CとSはcontrolとshadingを示す。 ΣJ_{Xy} 、 ΣJ_{Phlo} 、 ΣJ_{WF} 、および ΣGRF は日積算木部汁液フラックス、日積算師部汁液フラックス、日積算果実蒸散フラックス、および日積算果実体積増加速度を示す。 ΣA_{F} 、 ΣTL 、 $\Sigma J'_{\text{CO}_2}$ 、および DM_{F} は日積算果実光合成速度、1果あたり積算転流量、日積算果実暗呼吸量、および日果実乾物増加量を示す。

果実成長と果実暗呼吸との関係：図3-8に1果あたり転流速度 (RTL) と $\Sigma J'_{\text{CO}_2}$ との関係を示す。両者の間には有意な正の相関 ($P < 0.05$) が認められた。図3-9に果実の相対成長率 (RGR_{F}) と $\Sigma J'_{\text{CO}_2}$ との関係を示す。両者の間にも有意な正の相関 ($P < 0.01$) が認められた。

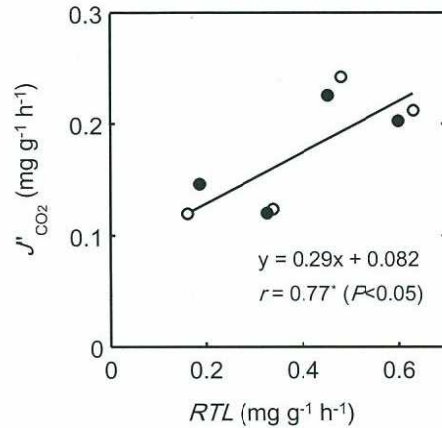


図3-8 満開後60、71、100、および120日のcontrol (白) とshading (黒) における1果あたり転流速度 (RTL) と日積算果実暗呼吸量 ($\Sigma J'_{\text{CO}_2}$) との関係。

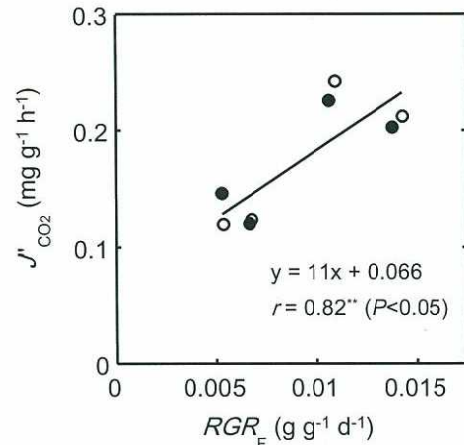


図3-9 満開後60、71、100、および120日のcontrol (白) とshading (黒) における果実相対成長率 (RGR_{F}) と日積算果実暗呼吸量 ($\Sigma J'_{\text{CO}_2}$) との関係。

果実品質および収量：表3-1に果実品質および収量を示す。果実糖度は、満開後90日ではshadingとcontrolの差はほとんどなかったが、満開後100日と180日ではshadingがcontrolより有意に低くなった ($P < 0.05$)。滴定酸度は果実糖度とほぼ同様で、満開後180日ではshadingがcontrolより有意に低くなった ($P < 0.01$)。収量は、shadingがcontrolより低い傾向が認められたが、有意な差ではなかった。満開後180日の果皮色は、shadingがcontrolより劣り、着色遅延の様相を呈した。

表3-1 shadingが果実品質と葉面積 (LA) あたり収量に及ぼす影響 (n≥3)

DAF	処理	1果平均重 (g fruit ⁻¹)	SSC ^z (°Brix)	TA ^z (%)	果皮色 ^z (a/b)	収量/LA ^z (kg m ⁻²)
90	C	33.7±2.5	7.9±0.4	5.10±0.13	—	—
	S	28.5±1.2	7.7±0.1 ^{NS}	4.89±0.04 ^{NS}	—	—
105	C	38.3±1.4	8.2±0.2	4.34±0.14	—	—
	S	35.4±3.6	7.6±0.1 [*]	4.07±0.22 ^{NS}	—	—
180	C	104.4±10.1	11.3±0.1	0.75±0.03	0.29±0.01	2.70±0.21
	S	95.6±8.1	10.2±0.2 ^{***}	0.63±0.05 ^{**}	0.07±0.01 ^{***}	2.48±0.13 ^{NS}

^z平均値±標準誤差. ^{NS}, ^{*}, ^{**}, ^{***}はt-test (n ≥ 3)においてcontrolとshadingで有意でないかP < 0.05, 0.01, 0.001で有意を示す. 樹葉面積 (LA; m²) は,

$$LA = 0.0081 \times DM_{tree-L} (r^2 = 0.99)$$

で推測した. ここでDM_{tree-L} (g tree⁻¹) は樹全葉の乾物重を示す. LAを推定した葉は収穫直後に採取した.

4 考察

ハウスミカンにおける高品質果実生産は、水管理によるところが大きいため (川野⁷²⁾、1984)、果実の水収支を定量的に評価することは極めて重要である。

本章では、果実へ流入する水の日積算値を経路別に見ると、果実生育ステージにより異なり、満開後71日は師部汁液フラックス (ΣJ_{Phlo}) が、満開後100日は木部汁液フラックス (ΣJ_{Xy}) が大半以上を占めていた (図3-7A)。

師部汁液フラックスは、糖のローディングとアンローディングに支持された師管に沿う圧流、すなわち師管への浸透圧による水流とシンク器官への糖の積みおろしによって起こる流れとされている (Patrick¹²⁵⁾、1997)。そのような葉から果実への師部輸送は、ソース葉における光合成を糖供給の起点とし、師部輸送の次に起こる現象である果実貯蔵細胞への糖の取り込みを終着点としている。満開後71日におけるshadingのcontrolよりも低いΣJ_{Phlo}は、ソース葉の光合成の減少で説明できる (図3-5E)。

果実への木部汁液フラックスは、茎と果実間の水ポテンシャル勾配で駆動されるものと考えられる。満開後100日におけるshadingのcontrolよりも高いΣJ_{Xy}は、Ψ_{Xy}の違い、すなわち満開後100日におけるshadingのcontrolよりも高いΨ_{Xy}の影響と考えられる (図3-3C)。

満開後120日において、ΣJ_{Xy}はshading、controlとも負の値を示した (図3-7A)。この結果は、日中の高いVPDと低いΨ_{Xy} (< -0.8MPa) による、果実から果柄方向への木部汁液の逆流が生じていることを示す (図3-3C)。トマトにおいても水分欠乏下での同様の木部汁液の逆流が報告されている (Araki et al.²⁾、2004)。また、同日のshadingとcontrolのΣJ_{Phlo}はと

もに正の値であったため、水管理は適切で果実水収支は健全なバランスであったと考えられる。

shadingによる有意な収量の減少は認められなかったが (表3-1)、shadingによる糖蓄積や酸含量、果皮色といった果実品質指標への影響が認められた (表3-1)。shadingによる糖蓄積や果皮色の抑制もしくは遅延は、葉の光合成 (図3-5) と葉から果実への転流量との減少の結果である。ここで、同化産物の転流には、新規固定炭素の転流と葉や茎における貯蔵炭素の再転流との2つの生理現象がある。後者は、図3-3Dのとおり、満開後100日と120日におけるshadingのDM_LとDM_Sの減少が、葉や茎からの貯蔵炭素の再転流を示していると思われる。これら結果から、ウンシュウミカン樹体中は、シンク果実の高い炭素要求に応えるべく一つの大きな炭素源をプールしており、低日射量といった過酷な環境による同化産物の飢餓的条件下でも、炭水化物代謝の大きな変化で果実成長要求に応えていることが推察された。

果実の光合成は、ΣA_Fは満開後120日に最大を示したが (図3-7C)、これは、果実体積の増加よりもむしろ果実体積あたりの光合成速度の増加による部分もあると思われる。この背景には、例えば生育ステージ特有の変化、葉から果実への炭素転流によって定義されるシンク能力の相対的な減少もその一因かもしれない。

Blanke and Lenz¹¹⁾ (1989) によると、果実はC₃型光合成とC₄/CAM型光合成の中間タイプに属するといふ。Hiratsuka et al.⁵¹⁾ (2012) は、ウンシュウミカンにおいて、果実への袋かけにより満開後92日と126日のホスホエノールピルビン酸カルボキシラーゼ (PEPC) 活性と収穫果糖含量の減少を確認し、ウンシュウミカン果皮は、C₃型光合成とPEPCによってCO₂

を固定していることを報告した。いくつかの果樹において、ホスホエノールピルビン酸カルボキシキナーゼ (PEPCK) 活性が有機酸の減少と正の相関を持つことが報告されている (Famiani et al.²⁸⁾、2009; Famiani and Walker²⁹⁾、2009; Walker et al.¹⁵⁵⁾、2011)。本章では、果実だけでなく樹体全体に遮光処理をしており、明らかな果実糖度と酸度の減少を認めた (表3-1)。このような条件下の果実成長においては、葉から果実への転流が大きく制限され、炭水化物代謝においては有機酸からの糖新生 (gluconeogenesis) が起こっている可能性もあり、果実のPEPCやPEPCK活性が糖蓄積や減酸に重要な役割を果たしていることなどが推察される。ブドウ、オウトウ、およびトマトでは、有機酸から糖新生が起こっていることが示されている (Halinska and Frenkel³⁹⁾、1991; Leegood and Walker⁹⁵⁾、1999)。

葉といったソース器官では、転流速度と暗呼吸との関係が報告されている (Ho and Thornley⁵³⁾、1978; Hendrix and Grange⁴⁴⁾、1991)。しかし、シンク器官の成長と暗呼吸との関係を検討した報告は極めて少ない。Hirai et al.⁵⁰⁾ (2010) は、イネの穂におけるチャンパーシステムより、穂の成長に要する暗呼吸コストを計測した。本研究の本章では、ウンシュウミカン果実成長と暗呼吸との関係を検討した。

果実への転流と果実暗呼吸との関係において、一次回帰式の傾きは、シンク器官の成長に要する暗呼吸コストと理解できる。この値は、イネの穂では0.22-0.28 (Hirai et al.⁵⁰⁾、2010) で、ウンシュウミカン果実では0.29であった (図3-8)。果実の相対成長率 (RGR_F) と暗呼吸との関係においても同様の結果が得られた (図3-9)。したがって、イネの穂とウンシュウミカン果実は、シンク成長に対し同程度の暗呼吸コストを必要とすると思われる。しかし、イネの穂とウンシュウミカン果実との間で、シンク成長と暗呼吸における日積算値の変動域は大きく異なっている。例えば、イネ

の穂の RGR は $0.045-0.115 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ であった (Hirai et al.⁵⁰⁾、2010) のに対し、ウンシュウミカン果実の RGR は $0.005-0.015 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ で (図3-9)、ウンシュウミカン果実はイネの穂と比較して極めて低い RGR を示した。

表3-2に、果実中に取り込まれた炭素に占める乾物への変換効率 (Y) を示す。得られた Y の値は、概ねトマト (Walker and Thornley¹⁵⁴⁾、1977)、ブルーベリー (Birkhold et al.¹⁰⁾、1992)、および綿花 (Hesketh et al.⁴⁵⁾、1971) と同程度の数値であったが、キュウリ (Tazuke and Sakiyama¹⁴³⁾、1991) やモモ (DeJong and Walton²²⁾、1989) との数値より低いものであった。また、本章において、満開後30-120日を平均した Y の値には、光条件の違いは関係していなかった。

以上の結果より、質的な観点では、成長段階にあるウンシュウミカン果実の炭素収支は、トマト果実やイネの穂と類似すると思われる。しかし、量的な観点では、低いシンクの RGR が他の植物と大きく異なる。また、1果あたり転流速度 (RTL) や RGR_F は、光条件に関わらず、両者とも果実暗呼吸と正の相関を示した (図3-8および3-9)。よって、果実の炭素要求 (あるいは果実のシンク活性) は、果実暗呼吸で表現され、その果実暗呼吸は、果実への光合成による新規固定炭素と貯蔵炭素の転流の合計値と関連が深いと思われる。

低日射条件に対応する栽培管理について以下3点が考えられる。1点目は、受光環境の最適化で、天井ビニールの透明化、反射資材の利用、葉面積指数 (LAI) と吸光係数の最適化などが挙げられる。2点目は、樹体への貯蔵炭素の増加で、1年のうち着果しない期間を長くし、収穫終了を早めることなどが挙げられる。3点目は、無駄となる炭水化物を減らすことで、早期摘果の実施と適切な水管理による低糖度大玉果の抑制などが挙げられる。

表3-2 果実における炭素増加量 (ΔC) と暗呼吸量 (ΔR) から求めた炭素の乾物変換効率 (Y)

DAFB	ΔC (g)		ΔR (g)		Y^z	
	control	shading	control	shading	control	shading
30-59	0.93	0.80	0.32	0.24	0.74	0.77
60-70	0.09	0.23	0.25	0.20	0.26	0.54
71-104	1.01	0.88	0.87	0.75	0.54	0.54
105-120	0.71	0.43	0.27	0.02	0.73	0.64
30-120	2.74	2.35	1.70	1.43	0.62	0.62

$$^z Y = \Delta C / (\Delta C + \Delta R)$$

IV 夜温が果実の水・炭素収支に及ぼす影響

1 はじめに

成熟したハウスミカン果実は、90%程度の水を含み、残り10%が乾物である。したがって、ウンシュウミカンにおいて水蓄積に関連した要因が果実サイズ、品質、および収量を決定しており、水管理と水収支の重要性が多く報告されている(間苧谷・町田⁹⁷⁾、1980; 川野⁷²⁾、1984; Yakushiji et al.¹⁶⁰⁾、1998; Yano et al.¹⁶⁸⁾、2012)。販売に求められる糖度12度以上かつ酸1.0%以下の果実を生産するには、水収支だけでなく炭素収支も重要である。トマトでは、果実の水収支について詳細な報告があるが²⁾ (Araki et al.²⁾、1997、1998、2004; Kitano and Araki⁷⁵⁾、2001)、果実の炭素収支に関する報告は少ない。これは、果実への炭素の転流を計測するのが難しいからである。Shishido et al. は、キュウリ苗¹³⁴⁾ (1987) やトマト¹³³⁾ (1989) の炭素収支を¹⁴Cトレーサー法にて計測したが、この方法は小さな植物体に限られる。例えば、Kubota and Motoyama⁸⁸⁾ (1972) は、ポット植栽のウンシュウミカン樹において¹⁴Cトレーサー法を用い、果実の成長は最寄りの葉、すなわち同一着果枝における葉の影響を強く受けることを明らかにした。また、¹⁴Cや¹³Cといった同位体を用いた報告の多くは定性的で(Kubota and Motoyama⁸⁸⁾、1972; Kadoya and Tanaka⁷⁰⁾、1972; Yakushiji et al.¹⁶⁰⁾、1998)、定量的な報告は少ない(Shishido et al.¹³⁴⁾、1987; Yano et al.¹⁶⁸⁾、2012)。これは、多くの均一な植物材料を用意することが困難な背景もある。

本研究の大きなねらいは、果実の水・炭素収支の定量化より、ハウスミカン満開後50-120日の果実成長に及ぼす夜温の影響を明らかにし、この期間における低夜温、中庸水ストレス条件下での最適な高品質果実生産技術を確立することである。本章では、夜温制御

環境下において、定量的な¹³Cトレーサー法や果実への師部・木部輸送の評価などを通じ、昼夜別に果実の水・炭素収支を明らかにした。

2 材料および方法

材料: ハウス内で栽培された17年生「宮川早生」を用いた。加温開始は2009年11月28日、満開日は2010年1月5日、加温終了は同年5月19日、収穫は同年7月5日であった。

温度管理: 満開後50-123日において、昼/夜温を28°C/23°C設定とする中夜温区(MN)と、28°C/13°C設定とする低夜温区(LN)の2区を設けた。両区とも3樹反復とした。気温制御は、昼は換気扇、夜は主に暖房によったが、LNにおいて4月と5月の夜間は冷房を使用した。夜温処理は満開後121日に終了し、ハウスのサイドを開放した。その他の肥培管理は慣行に従った。

木部水ポテンシャルの計測: 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。

ソース・シンクユニットとユニット内の¹³C分配: 葉から果実への転流動態を計測するため、IIと同様のソース・シンクユニットを定義した。ユニットは、2009年発生 of 夏枝を母枝とし、生産年の2010年に2果と7葉を含む着果枝であった(図2-3)。¹³C分配は、パルス追跡法でIIと同様の方法で行った。

水・炭素動態の計測: 葉および果実のガス交換、果実成長速度、および果柄汁液フラックスはIIと同様に計測した。ただし、果実表面の蒸散フラックス(J_{WF} ; $m^3 \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$)および暗黒条件下の果実CO₂放出速度(J_{CO_2} ; $mmol \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$)は、IIIと同様、生育ステージに応じて図3-1および図3-2により求めた。表4-1に用いた関係式を示す。

表4-1 果実表面の蒸散フラックス(J_{WF})および暗黒条件下の果実CO₂放出速度(J_{CO_2})の気温(T_a)による推定で用いた関係式(Yano et al., 2013)

目的変数 (Y)	DAFB	Day or night	関係式 ($X=T_a$)	P値
J_{WF}	30-90	Day	$Y = 0.0011 e^{0.17X}$	<0.001
		Night	$Y = 0.0010 e^{0.16X}$	<0.001
	90-120	Day	$Y = 0.0028 e^{0.10X}$	<0.001
		Night	$Y = 0.0035 e^{0.10X}$	<0.001
J_{CO_2}	30-90	—	$Y = 0.037 X - 0.29$	<0.001
	90-120	—	$Y = 0.0096 X - 0.022$	<0.001

日中・夜間別の果実への炭素転流量の推定：日中の果実への転流量は以下の式で推定した。

$$\Sigma TL_D = \Sigma TL_{Daily} \times \delta^{13}C_{F,D} / (\delta^{13}C_{F,D} + \delta^{13}C_{F,N}) \quad (4-1)$$

ここで、 ΣTL_D 、 ΣTL_{Daily} 、 $\delta^{13}C_{F,D}$ 、および $\delta^{13}C_{F,N}$ は、日中の葉から果実への炭素転流量、日中と夜間を合計した日積算の葉から果実への炭素転流量、日中の葉から果実への ^{13}C 分配増加割合、および夜間の葉から果実への ^{13}C 分配増加割合を示す。夜間の炭素転流量 (ΣTL_N) も ΣTL_D と同様に求めた。日中と夜間はそれぞれ7:00-19:00および19:00-7:00とした。

日中・夜間別の果実乾物増加量の推定：日中および夜間の果実乾物増加量は次式で推定した。

$$DM_{F,D} = \Sigma TL_D - \Sigma J'CO_{2,D} + \Sigma A_F \quad (4-2)$$

$$DM_{F,N} = \Sigma TL_N - \Sigma J'CO_{2,N} \quad (4-3)$$

ここで、 $DM_{F,D}$ 、 $\Sigma J'CO_{2,D}$ 、 ΣA_F 、 $DM_{F,N}$ 、および $\Sigma J'CO_{2,N}$ は、日中の果実乾物増加量、日中の果実暗呼吸積算値、果実光合成の日積算値、夜間の果実乾物増加量、および夜間の果実暗呼吸積算値をそれぞれ示す。

果実品質と果皮色：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。果皮色は、測色色差計 (ZE2000、NIPPON DENSHOKU Co.、Ltd.) で計測した。

3 結果

果実の水・炭素収支を算出した環境条件：成長盛期における果実の水・炭素収支を明らかにするため、満開後60日、71日、100日、および120日の4日間に短期集中調査を行った。いずれの日も、stage IIの果実細胞肥大期 (菊池ら⁷⁴⁾、1964) に相当し、Iにおけるyoung stageとmiddle stageにあたる。図4-1に4調査日間で平均した気温 (T_a) とハウス内日射量 (R_s) の日変化を示す。

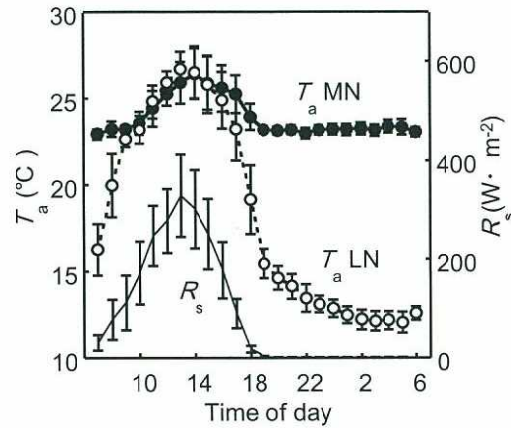


図4-1 中夜温区 (●;MN) および低夜温区 (○;LN) における日射量 (R_s) と気温 (T_a) の日変化. 各プロットは満開後60, 71, 100, および120日の平均値. バーは標準誤差 ($n=4$).

木部汁液フラックスと環境との関係：満開後60日の日積算節部汁液フラックス (ΣJ_{Phlo}) と日積算木部汁液フラックス (ΣJ_{Xy}) は残念ながら欠測となり、またこの日の日射量は他の満開後71日、100日、および120日の1/4未満であった (表4-2)。

調査した満開後60日、71日、100日、および120日の4日間の R_s 平均値 ($8.7MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) は、主要ハウスミカン作型を想定した、供試ハウスにおける2月から3月 (満開後60日から120日まで) の2011から2013年の3カ年平均となる R_s 平均値 ($8.4MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) に近い値であった。もし、満開後60日のデータを除けば、 R_s 平均値 ($10.9MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) や果実水収支は晴天が強調された結果になる。したがって、満開後60日の欠測を補足することは、満開後60日から120日までの正確な果実水収支を推測する上で重要と思われる。

満開後71日、100日、および120日における日中と夜間の ΣR_s と ΣJ_{Xy} において、有意な負の相関 ($P<0.001$) が認められ (図4-2)、図4-2に示された回帰式より満開後60日の ΣJ_{Xy} が求められ、これと ΣJ_{Sap} および式

表4-2 満開後60, 71, 100, および120日におけるハウス内外の日積算日射量 (ΣR_s)

年/月/日	DAFB	ハウス外 ΣR_s ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)	ハウス内 ΣR_s ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)	ハウス内 ΣR_s /ハウス外 ΣR_s
2010/3/6	60	3.9	2.2	0.55
2010/3/17	71	21.8	11.1	0.50
2010/4/17	100	26.1	12.2	0.46
2010/5/7	120	17.2	9.5	0.46
平均		17.3	8.7	0.50

(2-3) から ΣJ_{Phlo} が推定できた。

長期間の環境の影響：図4-3に果実成長の長期間の推移を示す。果実体積 (V_F) と果実乾物重 (DW_F) はLNで抑制された。図4-4に夜明け前水ポテンシャル (Ψ_{xy}) の推移を示す。調査期間を通じ、MNとLNは同様の推移を示した。

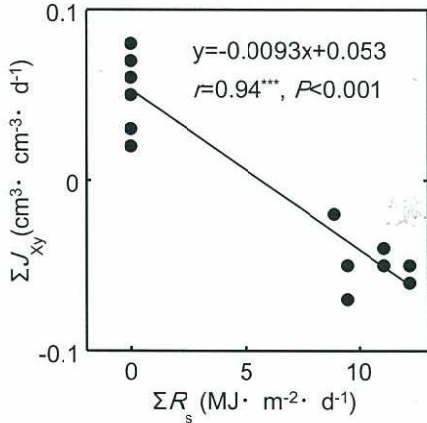


図4-2 満開後71, 100, および120日の日中および夜間における積算日射量 (ΣR_s) と日積算木部汁液フラックス (ΣJ_{xy}) との関係。

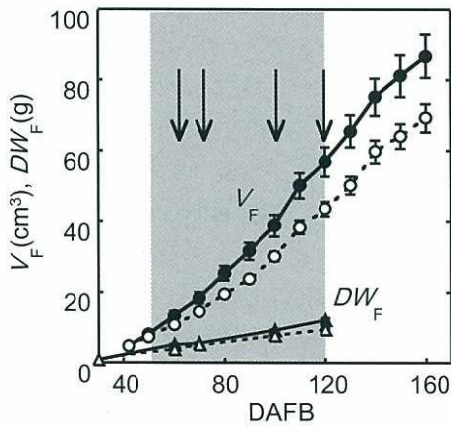


図4-3 満開後60, 71, 100, および120日の中夜温区 (●;MN) および低夜温区 (○;LN) における果実体積 (V_F) と果実乾物重 (DW_F) の推移。灰色の背景は夜温処理期間を示す。バーは標準誤差 ($n=15$)。

ソース・シンクユニット内の ^{13}C 分配：図4-5にMNとLNにおけるユニット内の ^{13}C 分配の推移を示す。ソース・シンクユニット内における果実への ^{13}C 分配速度は、日中 (11:00-19:00) は、MN: $3.9\% \cdot \text{h}^{-1}$ 、LN: $3.8\% \cdot \text{h}^{-1}$ で、夜間 (19:00-7:00) はMN: $1.9\% \cdot \text{h}^{-1}$ 、LN: $1.1\% \cdot \text{h}^{-1}$ であった (図4-5)。したがって、 $\delta^{13}\text{C}_F$ の日中/夜間比は、MNで2.0およびLNで3.3となった。平均気温は、

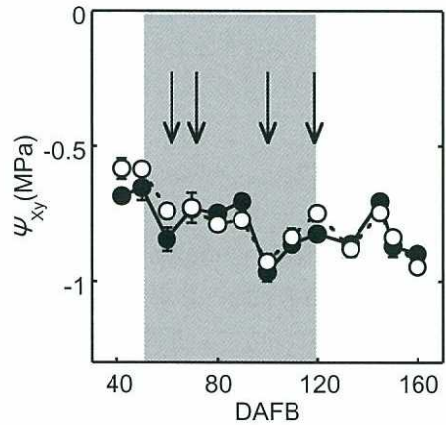


図4-4 満開後60, 71, 100, および120日の中夜温区 (●;MN) および低夜温区 (○;LN) における夜明け前水ポテンシャル (Ψ_{xy}) の推移。灰色の背景は夜温処理期間を示す。バーは標準誤差 ($n=6$)。

日中 (11:00-19:00) はMN: 25.3°C 、LN: 24.6°C で、夜間 (19:00-7:00) はMN: 23.2°C 、LN: 13.1°C であった (図4-2)。これら結果より、 $23\text{--}25^\circ\text{C}$ の範囲において、ソース・シンクユニット内における果実への ^{13}C 分配速度は、夜間よりも日中の方が大きかった (図4-6)。

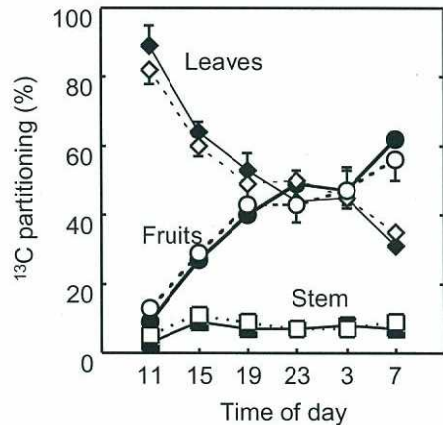


図4-5 満開後60, 71, 100, および120日の中夜温区 (黒;MN) および低夜温区 (白;LN) におけるソース・シンクユニット内 ^{13}C 分配の日変化。バーは標準誤差 ($n=4$)。

日中および夜間の果実水収支：図4-7に満開後60日、71日、100日、および120日のMNとLNにおける果実体積変化速度 (GRF) の日変化を示す。満開後60日の GRF のみ終日正の値であったが、満開後71日、100日、および120日は果実の収縮に伴い、日中は負の値を示した。

図4-8にMNとLNにおける水動態の日変化から求めた

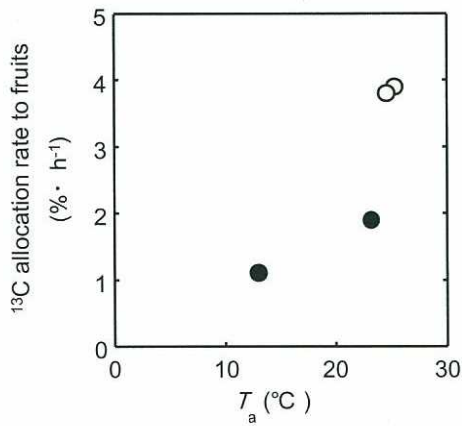


図4-6 日中(○)と夜間(●)の葉から果実への¹³C分配速度のプロット。¹³C分配速度は、図4-5における11:00, 19:00, および7:00のデータより算出した。

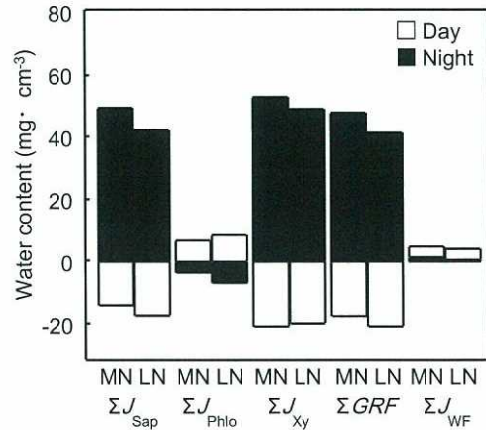


図4-8 中夜温区(MN)および低夜温区(LN)における短期の果実水動態から求めた日中および夜間の果実積算水収支。満開後60, 71, 100, および120日で得られた数値を平均した。 ΣJ_{Sap} , ΣJ_{Xy} , ΣJ_{Phlo} , ΣJ_{WF} , および ΣGRF は積算果柄汁液フラックス, 積算木部汁液フラックス, 積算師部汁液フラックス, 積算果実蒸散フラックス, および積算果実体積増加速度を示す。

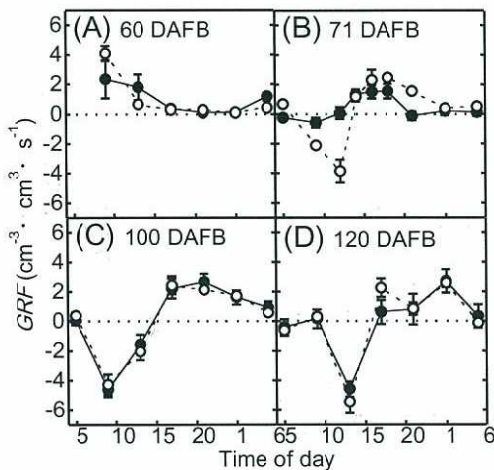


図4-7 満開後60日(A), 71日(B), 100日(C), および120日(D)の中夜温区(黒;MN)および低夜温区(白;LN)における果実体積増加速度(GRF)の日変化。バーは標準誤差($n \geq 3$)。

日中および夜間の果実積算水収支を示す。水収支の基礎に基づけば、果実に流入する日積算汁液フラックス(ΣJ_{Sap})は ΣJ_{Phlo} と ΣJ_{Xy} で構成され、また ΣJ_{Sap} は日積算果実体積増加速度(ΣGRF)と日積算蒸散フラックス(ΣJ_{WF})との和に等しい。図4-7において、日中の ΣGRF は負の値であったが、夜間は正の値であった。 ΣGRF の絶対値は、MNとLNの両者とも夜間が日中の2倍であった。果実生育に重要な水流入は、夜間の積算木部汁液フラックス($\Sigma J_{\text{Xy}} > 0$)で、日中と夜間の ΣJ_{Phlo} のどちらでもなかった。日中の ΣJ_{Phlo} は、MNとLNの両者とも夜間よりも大きくなった。

日中および夜間の果実炭素収支：図4-9にMNとLNにおける炭素動態の日変化から求めた日中および夜間の果実積算炭素収支を示す。日中において、MNとLNにおける日積算果実光合成量(ΣA_F)は、果実への総炭素供給量($\Sigma A_F + \Sigma TL_D$)のそれぞれ12%および9%で、

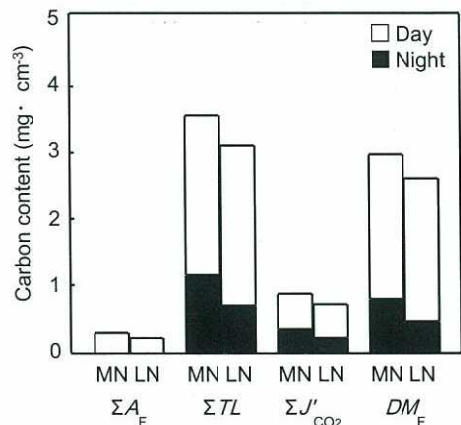


図4-9 中夜温区(MN)および低夜温区(LN)における短期の果実炭素動態から求めた日中および夜間の果実積算炭素収支。満開後60, 71, 100, および120日で得られた数値を平均した。 ΣA_F , ΣTL , $\Sigma J'_{\text{CO}_2}$, および DM_F は日積算果実光合成速度, 1果あたり積算転流量, 日積算果実暗呼吸量, および日果実乾物増加量を示す。

同様にMNとLNにおける $\Sigma J'CO_{2,N}$ は果実への総炭素供給のそれぞれ20%および19%であった。夜間において、MNとLNにおける $\Sigma J'CO_{2,N}$ は、果実への総炭素供給量($\Sigma J'CO_{2,N} + DM_{F,N}$)のそれぞれ31%および33%であった。
収穫果の品質と果実収量：表4-3に収穫果の品質と葉面積あたり果実収量を示す。MNの果皮色はLNよりも優

れた(表4-3)。LNの酸含量は、MNより有意に低くなったが($P < 0.001$)、差は小さかった(表4-3)。葉面積あたり果実収量では、MNとLNの間に有意な差は認められなかった(表4-3)。

表4-3 中夜温区(MN)と低夜温区(LN)における収穫果の品質と葉面積あたり収量

処理	収穫果の品質 (n=20)				葉面積あたり収量 (n=3) (kg m ⁻²)
	1果重 (g)	SSC (°Brix)	TA (%)	果皮色	
MN	104.4 ±	11.3 ±	0.75 ±	0.29 ±	2.71 ± 0.17
LN	94.9 ±	11.0 ±	0.60 ±	0.17 ± 0.018	2.57 ± 0.17
有意性 ^Y	NS	NS	***	**	NS

^Y平均値±標準誤差。*:***; $P < 0.001$, **: $P < 0.01$, NS; not significant at t-test.

4 考察

本章において、植物の水ストレス指標となる夜明け前の木部水ポテンシャルは、満開後50-120日を平均すると、MNで -0.79 ± 0.04 MPa、LNで -0.77 ± 0.03 MPaであった(図4-4)。これら値は、ウンシュウミカンにおいて中庸なストレス程度と思われる(Yakushi et al.¹⁶⁰, 1998)。概して、果実体積あたりで算出した果実水および炭素収支の日積算は、MNとLNの間で大きな差は認められなかった(図4-10)。果皮色を除く果実品質と果実収量についても同様であった(表4-3)。これらの結果は、満開後60-120日の夜温と、満開後180日の果実糖度および滴定酸度との間に有意な相関が認められなかったIの結果と一致した。

果実の日積算水収支では、ウンシュウミカンに特徴的な点として以下4点を挙げる事ができる。第1点は、果実に流入する日積算汁液フラックス(日積算師部汁液フラックス+日積算木部汁液フラックス)の多くが果実成長に寄与していたことである。果実からの蒸散は収支バランス上小さく、果実表面の日積算蒸散フラックスが果実に流入する日積算汁液フラックスに占める割合は14%であった(図4-10)。第2点は、果実に流入する汁液のうち、師部輸送の占める割合が、日積算師部汁液フラックスで6-10%と小さかったことである(図4-10)。既往のトマトにおける報告とウンシュウミカンで日積算師部汁液フラックスの変動幅を比較すると、トマトで $0.116-0.075 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ であったのに対し(Araki et al.², 2004)、本章では $0.004-0.003 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ で、ウンシュウミカンの日積算師部汁液フラックスは明らかに低い変動幅であった。第3点

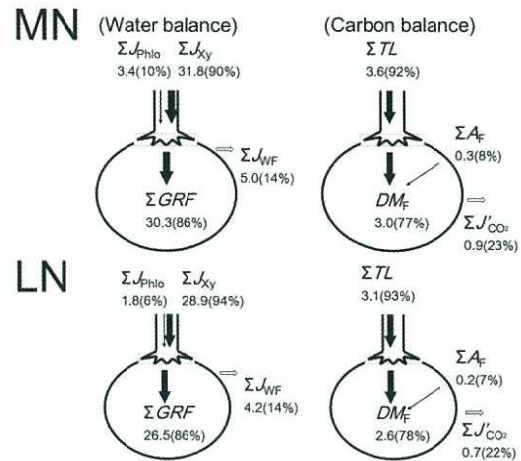


図4-10 中夜温区(MN)と低夜温区(LN)における果実の積算水・炭素収支。満開後60, 71, 100, および120日で得られた数値を平均した。水収支における $\Sigma J'_{Xy}$, $\Sigma J'_{Phlo}$, $\Sigma J'_{WF}$, および ΣGRF は日積算木部汁液フラックス, 日積算師部汁液フラックス, 日積算果実蒸散フラックス, および日積算果実体積増加速度を示す。炭素収支における ΣA_F , ΣTL , $\Sigma J'CO_2$, および DMF は日積算果実光合成速度, 1果あたり積算転流量, 日積算果実暗呼吸量, および日果実乾物増加量を示す。

は、日積算木部汁液フラックスの大きな昼夜間変動である(図4-8)。これら水収支におけるトマトとウンシュウミカンとの差異は、主に形態や水分ストレス状態の違いによると思われる。例えば、Koch and Avigne⁸⁴(1990)は、グレープフルーツ(*Citrus paradisi* Macf.)砂じょうへの¹⁴C分配速度は、師部積み下ろし

以降の転流経路では遅くなることを示した。これは、カンキツ果実の転流機構は、非維管束組織を含み複雑であることを示唆している。このカンキツ果実の複雑さが、ウンシュウミカンにおける師部輸送あるいは果実への炭素転流の速度に関係していることが考えられる。Araki et al.²⁾ (2004) はトマトにおいて、水分欠乏条件下 (日中 -1.4 ± 0.2 Mpa) で負の日積算木部汁液フラックス (日積算 -0.014 ± 0.003 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) を、潤沢な水分条件下 (日中 -0.6 ± 0.1 MPa) で正の日積算木部汁液フラックス (日積算 0.077 ± 0.017 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) を報告している。本章でも、負の日積算木部汁液フラックス (図4-8) は日中の水分欠乏と関係すると考えられる。第4点は、日積算師部汁液フラックスに対する夜温の影響が小さいことで、MNとLNを比較するとわずか4%の違いであった (図4-8)。

果実への木部汁液フラックスは、茎と果実間の水ポテンシャル勾配で駆動されるものと考えられる。果実の水ポテンシャルと比較して、茎の水ポテンシャルは変動しやすく、根の水分状態や植物体近傍の蒸散要求の影響を受ける (Johnson et al.⁶⁷⁾, 1992; Araki et al.⁴⁾, 1998)。本章では、積算日射量と日積算木部汁液フラックスとの間に有意な負の相関が認められた (図4-2)。水分欠乏や高塩ストレス、高蒸散要求条件下では、茎の水ポテンシャルが果実よりも低下し、木部経由で汁液が逆流して果実の収縮をもたらす (Pearce et al.¹²⁸⁾, 1993; Kitano et al.⁷⁹⁾, 1996; Yano et al.¹⁶⁸⁾, 2012)。満開後71日、100日、および120日において、MNとLNは両者とも負の果実体積変化速度を示したが (図4-7)、これは木部汁液の逆流による果実体積の収縮であった (図4-8)。

既往の報告では、第一果房の開花後約3週間における糖集積が活発な生育段階のトマトにおいて、果実への汁液は主に師部経由であることが示されている (Araki et al.²⁾, 2004; Ho et al.⁵²⁾, 1987)。近年の核磁気共鳴画像法による研究では、興味深いことに、第8週目のトマトでは、果房に流入する正味の汁液のうち、少なくとも75%は果柄外周に存在する木部経由の汁液で、残り25%は果柄内部の師部および木部を経由する汁液であった (Windt et al.¹⁵⁶⁾, 2009)。本章では、Araki et al.²⁾ (2004) の報告と同様の手法で1果について評価したにも関わらず、得られた結果はWindt et al.¹⁵⁶⁾ (2009) の結果に類似していた (図4-10)。この理由は、種特有の維管束輸送システムや計測方法の違いなどが考えられるが、詳細は今後の研究に期待する。

果実の水・炭素収支日積算の概要を見ると、果柄を経由して果実へ運ばれる水や炭素の多くは果実に貯留しており、蒸散や呼吸で放出されていない (図4-10)。果実の光合成の寄与は、果実成長に分配される炭素の10-15%程度であることがグレープフルーツ (*Citrus paradisi* Macf.) やカラマンダリン (*Citrus madurensis* Lour.) (Huang et al.⁵⁸⁾, 1992)、ブルーベリー (*Vaccinium ashei* Reade) (Birkhold et al.¹⁰⁾, 1992) で報告されている。本章において、果実へ流入する炭素 (果実光合成+葉から果実への転流炭素) のうち果実光合成の占める割合は、MNで8%およびLNで7%であった (図4-10)。この結果は、IIで得られた結果と概ね同様であり、茎の師部を経由する葉から果実への炭素転流が、果実への主要な炭素供給源となっていることが再確認された。

高等植物においては、暗期よりも明期で炭素の転流が活発なことがトウモロコシの葉 (Troughton et al.¹⁴⁸⁾, 1977) やトマト (北野⁷⁷⁾, 1998) などで報告されている。本章でも、23-25°Cでは、ソース・シンクユニット内の葉から果実への¹³C分配速度は、夜間よりも日中の方が大きかった (図4-6)。この結果は、夜温よりも昼温に注意が払われる必要があることを示している。また、満開後60日、71日、100日、および120日で平均した夜間積算師部汁液フラックスは負の値を示したが (図4-8)、これは単に積算師部汁液フラックスが積算木部汁液フラックスよりも十分に小さいことを意味すると考えられる。これに対し、ソース・シンクユニット内の葉から果実への¹³C分配は正の値であり (図4-6)、夜間における師部を介した葉から果実方向への転流は確実に生じていると考えられる。汁液の逆流は、木部汁液フラックスでの報告はあるが (Kitano and Araki⁷⁵⁾, 2001; Eguchi et al.²⁶⁾, 2003)、本章ではLNにおいて師部での逆流を示す結果が得られ (図4-8)、これは果実が一時的にソースになったことを意味する。しかし、仮に果実がソースになったとしても、樹体全体からみたソース能力は、葉と比較すればはるかに小さいことが推察できる。

以上より、慣行着果量のハウスミカンにおいて、満開後50-120日を低夜温 (13°C) で管理した場合の問題は、果実成長の抑制による収量減と着色遅延であることが明らかとなった。慣行着果量が満開後50-120日に本章の範囲で夜温を下げて管理しても、果実体積あたりの水・炭素収支の様相は大きく変化せず、換言すれば果実成長の根本となる質的なメカニズムは、低夜温でもあまり変わらない。ただし、果実サイズを反映

させ、量的に見れば夜温が果実成長に及ぼす影響は大きいと考えられる (図4-3)。

なお、本章より考えられる省エネルギー栽培管理の留意点は、以下2点である。第1点は、水管理と低夜温とのバランスである。満開後50-120日を13°Cのような大幅な低夜温とし、果実成長の抑制を水管理で補おうとすると、過剰かん水となり低糖度果実しか生産されない。第2点は、夜温よりも昼温に注意が払われる必要があることである。23-25°Cでは、ソース・シンクユニット内の葉から果実への¹³C分配速度は、夜間よりも日中の方が大きかった。よって、昼温の最適化と省エネルギーは密接に関係すると考えられる。