

琉球大学学術リポジトリ

ピタヤのCAM型光合成特性について

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 沖縄農業研究会 公開日: 2009-01-29 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 太田, 麻希子, 福澤, 康典, 川満, 芳信, Ota, Makiko, Fukuzawa, Yasunori, Kawamitsu, Yoshinobu メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/0002015680

ピタヤのCAM型光合成特性について

太田 麻希子・福澤 康典・川満 芳信*

(琉球大学農学部: *kawamitu@agr.u-ryukyu.ac.jp)

Makiko OTA, Yasunori FUKUZAWA and Yoshinobu KAWAMITSU

(Faculty of Agriculture, University of the Ryukyus):

CAM Type Gas Exchange Characteristics in *Hemiepiphytic Cactus*.

目 次

緒 言	27
第1節 明暗期温度の組み合わせがピタヤのCAM型光合成に及ぼす影響	28
第2節 明期の平均光強度がピタヤのCAM型光合成に及ぼす影響	34
第3節 高CO ₂ 濃度がピタヤのCAM型光合成に及ぼす影響	38
第4節 ピタヤ廃棄茎部の有効利用について	42
総合考察	48
要 約	51
謝 辞	52
参考文献	52

緒 言

近年、沖縄県で栽培が増加しているピタヤ（ドラゴンフルーツ）は、サボテン科ハシラサボテン亜科 *Hylocereus* 属の登攀性・着生サボテンの熱帯果実である。ドラゴンフルーツの栽培面積、生産量はここ数年増加傾向にあり、本県において重要な熱帯果実になりつつある。この果実は、現状ではピタヤもしくはドラゴンフルーツという名称で一括りにされているが、主に果皮色と果肉の色から 3 つに分けることができる。果皮色が赤く果肉が白い *Hylocereus* 属のホワイトピタヤ、果皮が赤色で果肉も赤い *Hylocereus* 属のレッドピタヤ、果皮が黄色で果肉が白の *Serenicereus* 属のイエローピタヤ（ゴールデンピタヤ）である。ピタヤの原生地

は、両属ともメキシコやブラジルなど中南米地域の熱帯雨林で、年間を通して気温が温暖であり、季節的な温度の変動も少なく、また頻繁に降雨があるため湿度は高い。その様な環境において、樹木の洞や岩石上で根を張る着生（半着生）生活をしている森林性サボテンに属し、生長の際は登攀（木に巻きつきながら伸長）するという特性をもつ。

ピタヤのようなく実を結実させる半着生のサボテン類は、果実だけでなくその花の美しさに關しても鑑賞的価値が注目されている。これまで、ピタヤの栽培は主にカンボジア、エクアドル、インドネシア、メキシコ、ニカラグア、ペルー、台湾、ベトナムで行われてきた。最近ではオーストラリア、イスラエル、スペイン、

アメリカのフロリダ地域などにもその栽培面積が広がりつつある。

ピタヤがいつ沖縄県に導入されたのか正確な時期は明らかではないが、栽培面積や生産量が増大したのはごく最近のことである。また、沖縄への導入経路も明らかではないが、アジアでのピタヤの主要栽培地域である台湾から農家などが個人的に導入し、その後県内に広まつていったと考えられる。その結果として様々な品種・系統が無秩序に県内で栽培されることとなり、さらにはピタヤの自家不和合性も手伝って、多様な種類が産出された。果実のアイソザイム分析の結果から、市場のホワイトピタヤは少なくとも4種類、レッドピタヤにおいては11種類の亜種が我が国の市場で混在していることが明らかとなっている(山本ら, 2004)。果実の外観からはこの亜種の同定は困難なため、現在、このことが原因で市場における果実の品質にばらつきが生じ、品種系統の選抜が急務である(山本ら, 2004)。このように、ピタヤの生理・生態学的な特徴を明らかにし、適した栽培環境を示すことは沖縄県のピタヤ生産を長期間かつ安定的に維持する上でも重要である。

本研究の目的は、ピタヤの生理的特性を調べ、最適栽培環境を明らかにすることである。ピタヤは上述のようにサボテン科に属し、多汁質の茎を持つ植物である。ホワイトピタヤ(*Hylocereus undatus*)の茎部のCO₂ガス交換速度(以下CERと略す)を測定したところ、CAM(Crassulacean Acid Metabolism)型光合成植物であるということを明らかにした(Nobel, 1995, 2002, 2004)。CAM型光合成とは主に乾燥地帯に生育する多肉植物で見られる特殊な光合成経路のことで、乾燥への適応の結果、進化したと考えられている。その光合成代謝の仕組みは、暗期に吸収したCO₂を有機酸

として葉肉細胞内の液胞に蓄積し、明期は光エネルギーを利用して有機酸からCO₂を脱炭酸してカルビン回路で固定し最終的にデンプンを合成するという特異的なものである(Kluge, 1993)。CAM植物のCERの日変化は、生化学的特性によって4つの相(phase)に分類される(Osmond, 1978)。本研究でもピタヤのCERと環境条件との関係について、この4つの相に注目し検討した。

CAM型光合成はC₃植物やC₄植物の光合成経路と大きく異なる。この特殊なCAM型光合成回路を有する植物の割合は、全植物中のうち僅か7%程度であるが、ピタヤはパインアップルと並ぶ数少ないCAM型作物である。作物生育の第一段階は物質生産すなわち光合成であり、作物の光合成能力が高いことが生育良好となるための必要最低限の条件と言える。

本実験では、温度と光強度、そして大気中CO₂濃度という環境要因を種々変更し、ピタヤのCAM型光合成に与える影響について調査した。また、栽培の現場では剪定の際に多量に発生するピタヤ廃棄茎の処理に苦労しており、解決策が待たれているところである。本研究ではその茎部の分析も実施し、廃棄物ではなく再利用方法を検討した。

第1節 明暗期温度の組み合わせがピタヤのCAM型光合成に及ぼす影響 はじめに

温度は生育に影響を及ぼす気象要因のうち、極めて重要な要素である。光合成は生化学反応であり、その多くは酵素によって制御され、酵素活性は温度に依存する。生育に適した温度環境を明らかにするため、CAM型光合成植物についても温度変化がCERに与える影響について多くの報告がある。特に、明／暗期温度の組

み合わせがCAM型光合成に及ぼす影響については、調査したCAM植物のほとんどが暗期温度10°C前後で最も高い値を示した。しかし、CAM植物の多くは砂漠などの乾燥地で生息するが、それらの環境の特徴は昼夜温較差が著しいことである。ピタヤは、緒言でも述べたように熱帯雨林内にて着生状態で生息する森林性サボテンであり、適した温度条件も異なる可能性がある。

本実験では、沖縄における路地、ハウス栽培を想定した数種類の明暗期温度の組み合わせを設定し、明暗期温度がピタヤのCERに与える影響について調査した。

材料および方法

本実験では果皮・果肉ともに赤系統のレッドピタヤ (*Hylocereus* 属) を用いた。2005年の初めに沖縄県南部の東風平町及び北部の大宜味村の農家から入手した苗を1/2000及び1/5000ワグネルポットに植え付け、農学部ハウス内で栽培した。土壤は国頭マージと腐葉土を1:1（体積比）で用い、施肥は改良型ホーグランド液肥を週1回、ポットあたり500mlずつ与えた。液肥の成分は6mM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、12mM KNO_3 、2mM KH_2PO_4 、2mM $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、25 μM H_3BO_3 、0.5mM $\text{FeC}_6\text{H}_5\text{O}_7$ であった。

CO₂ガス交換速度・気孔伝導度測定

測定は、CAM型光合成測定装置を用いて通気式同化箱法で行った。測定装置の概要について、まず空気の流れから述べると、室外に設置してあるコンプレッサーによって外気を取り込み、圧力調整器を経由させ、その後マスフローcontroーラー (SEC-4500RC, STEC社) で流量が5.0L/minとなるよう調節した。その後、ソーダ石灰2号 (WAKO社) を詰めたエンビパイプを通過させ、空気のCO₂濃度を一旦ゼロ

とし、このゼロガスをアクリル樹脂製の湿度制御装置（バブリング装置）を通過させ、装置内の水温で飽和した水蒸気圧空気を作出した。この装置の水温はクールニクス (CTE-82W, 小松・ヤマト) で制御されており、装置内の空気拡散部は導入空気が水と接触する面積及び時間が最大となるように穴のサイズや数が工夫され、装置通過後の空気はほぼ設定水温で飽和していた。バブリング装置を通過させた空気に、30% CO₂ボンベからCO₂を添加し、ミキシングボックスタ内に攪拌し、370ppmCO₂濃度の導入空気を作成した。その後、空気は3つの経路に分かれ、2つは同化箱へ、1つは比較用ガス流路へ流した。同化箱へ流入させる空気は流量センサー (FD-V40, キーエンス) にてモニターし、3.5~4.2 L min⁻¹になるようにニードルバルブで調整した。2つの同化箱からの被測定ガスとリファレンスガスは約0.5 L min⁻¹の流量となるようにエアーポンプで引き、電磁弁によって流路変更し、その後、相対湿度計を経由しCO₂赤外分析計 (Li-6251, ライカ社) に送られた。測定ガスと比較用ガスは、電磁弁を用いて流路を変更することで3分20秒ごとに比較用ガス、同化箱1、同化箱2の順で測定した。電磁弁の制御はリレー (ZEN-10C1AR-A-V1, オムロン) で行った。相対湿度計は外囲空気の影響を受けるため、センサー部分は恒温水槽内に設置し、被測定ガスは恒温水槽内のコイル状の銅パイプを通過させ恒温状態で測定した。恒温水槽の水温はサーモミンダ (SM-05R, TAITEC) を用いて様々な条件下でも結露しないよう36°Cに設定した。

測定されたデータはデータロガー (DA-100, 横河) によって収集し、パーソナルコンピュータ上に送られ、それぞれのデータはエクセル上でCAM型光合成測定プログラムにより計算さ

れ、各パラメーターを算出した。

測定する植物体と同化箱は環境を制御できるグロースチャンバー内に設置した。光源にはメタルハライドランプ (D-400C, 東芝) を用い、光線とグロースチャンバーとの間に深さ6.5cmの水槽を設置し、熱線の入射を防いだ。グロースチャンバー内の温度は温度コントローラ (CL-100, ヤマト) と連結したラジエーターと攪拌用のファンを設置することで調節した。

また、ピタヤのガス交換速度はピタヤの茎部を測定対象とし、測定する茎節部分を同化箱内に設置した。また葉面積は、同化箱内に設置した茎部のうち表側 (光源面) の面積を葉面積とした。本実験で用いたアクリル製同化箱はピタヤの茎の形状に合わせて作成し、その大きさは幅×奥行き×高さ=12×30×7cmであった。同化箱内にはラジエーターを取り付け、クールニクス (CTE-82W, 小松・ヤマト) と連結して水を循環させることで箱内の温度を制御できるようにした。また、小型ファンを取り付け箱内の温度、CO₂濃度、湿度が均一になるように攪拌した。茎測定部の温度と同化箱内の気温は直径0.1mmの銅-コンスタンタン熱電対を使用して測定した。葉温 (茎温) は茎の裏面 (影になっている部分) にクリップで熱電対を密着させ、箱内気温は光源の直射光が当たらないように配置して測定した。

温度処理

明/暗期温度の組み合わせは、35/20, 30/20, 25/20, 17/13°Cの4処理区を設定し、同化箱内に設置した茎部の葉温及び同化箱内温度をモニターした。その他の測定条件としては、明期の長さは7~18時までの11時間とし、光強度は500~600 μ mol m⁻² s⁻¹ になるように設定した。また、測定前には植物体を各処理条件下に数日間おき順化させ、日変化の測定データが安定し

たのを確認してからデータを採った。また、CER、気孔伝導度測定用に用いた植物体はグロースチャンバー内に設置できるよう茎高50~70cm程度の苗から健全なものを選んで使用した。測定に用いた株は、実験開始から終了まで同一の個体を用い、処理ごとの交代は行わなかった。

有機酸含量測定法

有機酸測定用のサンプルは、CER測定に用いた茎部と同じ表面上から採取した。CER測定終了後に同化箱を開け、葉の先端から基部に向かって順次行った。サンプリング暗期の開始後4時間毎に18:00, 22:00, 2:00, 6:00, 10:00, 14:00の計6回行い、茎表面から1cm×1cmの茎片を採取し、生重を測定した後、速やかに液体窒素で固定し、反応を停止させた。その後試料に5ml超純水と0.2g海砂及び0.03g PVPを加え、冷水下乳鉢で摩碎抽出し、6000rpmで5分間遠心分離した。その上澄み液をフィルター (孔径0.45 μ m) で濾過したものをHPLC (CDD-6A, LC-10AD, SCR-102H, 島津) を用いて定量した。

結果

まず、ピタヤのガス交換速度を数日に渡って測定し、その特徴について検討した。図1-1は、光強度600 μ mol m⁻² s⁻¹, CO₂濃度370ppm, 明/暗期温度30/20°Cに設定した時のCERである。ピタヤのCERは、暗期 (Phase 1) に上昇し明期は抑制され (Phase 3), 明期後半 (Phase 4) に再び上昇する典型的なCAM型であった。同様に気孔伝導度も、夜間に上昇しており気孔を開いて蒸散を行っていることが示された (図省略)。また、この条件下ではピタヤは明期開始直後のCO₂吸収 (Phase 2) は観察されなかつた。

CAM植物の大きな特徴である有機酸の日変

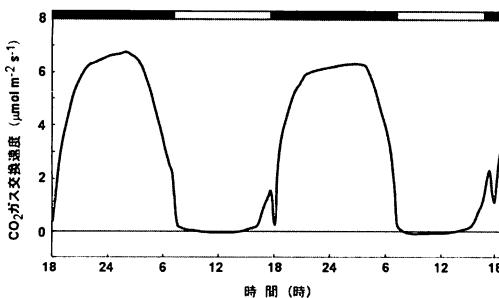


図1-1. ピタヤ茎部（成熟茎）における2日間のCO₂ガス交換。

測定は光強度600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、明/暗期温度17/13°C、日長11時間条件下で行った。

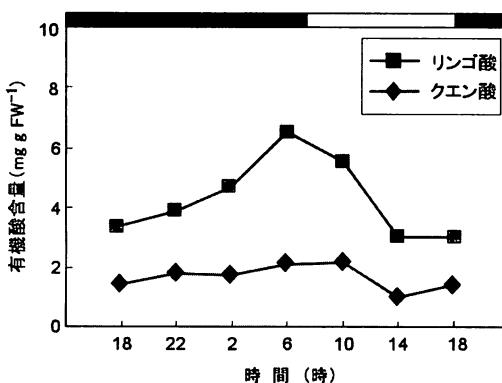


図1-2. ピタヤ茎部（成熟茎）有機酸含量の日変化。

化についても調査したところ、ピタヤの茎内に含まれている主な有機酸はクエン酸とリンゴ酸であった（図1-2）。そのうち、リンゴ酸は暗期後半から終わりにかけて上昇し、明期は減少するというCAM植物特有な日変化を示した。

以上、ピタヤは典型的なCAM型CO₂吸收パターンを示し、葉緑組織中のリンゴ酸が日変化を示したことより、ピタヤはCAM植物に類別される。そのCERの特徴としては、Phase 2が無い点を除いて、パインアップルと同じfull-CAM型光合成植物（暗期及び明期においてCO₂吸收がある）である。

明/暗期温度がピタヤのCERの日変化パターンに及ぼす影響

図1-3に、それぞれの温度区におけるCER及び気孔伝導度の日変化を示した。設定した全ての温度区において、CAM型の日変化パターンを示し、Phase 1, 3, 4が観察された。Phase毎に比較すると、Phase 1のCERが最も高かったのは温度が30/20°Cと25/20°Cの時で、最高値は6.27 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。35/30°Cでは、CERの最高値は高いがPhase 1後半の低下が早く始まった。一方、CERが低いのは17/13°Cで、特に、Phase 1で著しい低下が見られた。また明期後半のCO₂吸収期であるPhase 4もPhase 1と同様に30/20°Cおよび25/20°Cの時が良好であった。

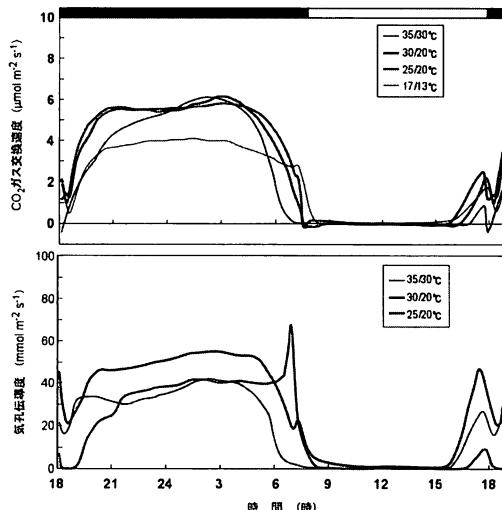


図1-3. 明暗期温度がCO₂ガス交換速度と気孔伝導度に与える影響。

気孔伝導度はPhase 1とPhase 4で高く、いずれの温度区でもCO₂交換の日変化と同様の推移を示した。しかし、気孔伝導度は25/20°C区で高く、CERが最も高かった30/20°C区は、Phase 1の気孔伝導度と蒸散は逆に低かった。このように、気孔伝導度が高まる温度条件と

CERが良好となる温度条件とは、若干異なつた。

明/暗期温度がピタヤのCO₂収支量に及ぼす影響

CO₂収支量はCO₂吸収量からCO₂放出量を差し引いて算出する(図1-4)。ピタヤの1日の全CO₂収支量は30/20°Cの時に最も高くて243.3、次に25/20°Cでは239.6となり、一番低いのは17/13°Cの時で175.5 mmol m⁻² day⁻¹であった。Phase 1のCO₂吸収量は30/20°Cの時に最も高い値となり、一方で温度が17/13°Cになると減少した。また、Phase 4におけるCO₂収支量が最も高かったのは25/20°C区であった。いずれの温度区においても、Phase 1のCO₂収支量は全CO₂収支量とほぼ同じであった。そのため、全CO₂収支量にはPhase 1のCO₂吸収量が大きく影響していた。

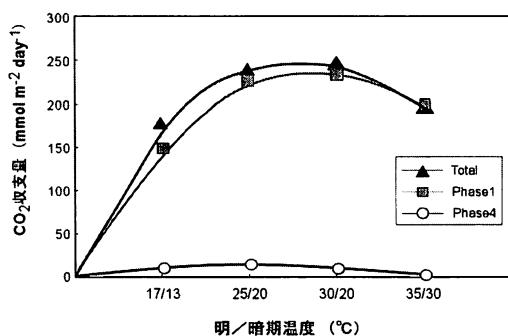


図1-4. 明暗期温度がCO₂収支量に与える影響。

明/暗期温度がピタヤCAM性に及ぼす影響

CAM性とは、1日の全CO₂収支量に占める、暗期のCO₂吸収量 (=Phase 1) の割合のことである。この値が高いほどCERの日変化がCAM型特有なものになっていることを示す(野瀬、1979, 1992)。CAM性 (%) = (Phase 1のCO₂収支量) / (1日のCO₂収支量)。

図1-5のCAM性は35/30°C区で最も高く、17/

13°Cでは90%に低下した。傾向としては、温度域が低温になるにつれてCAM性は徐々に減少していくことから、ピタヤのCAM性は温度条件が高温になるにつれ高くなつた。

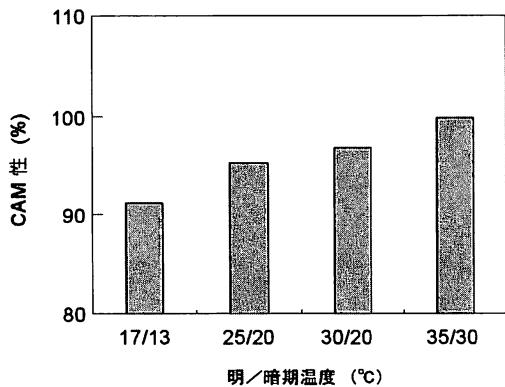


図1-5. 異なる明暗期温度がピタヤのCAM性に与える影響。

考 察

CAM植物は明暗期温によってCAM型光合成パターンが大きく変化することが知られているが、ピタヤの場合温度による大きな変化は見られなかった。しかし、各PhaseにおけるCO₂の固定量やCO₂収支量などは、設定した温度域によって変動した。ピタヤのCO₂収支量は30/20°Cのときに最も高く、次いで25/20°Cの温度域であり、ピタヤのCERの適温はこの付近にあると考えられる。

ピタヤは商業的価値が注目され海外でも栽培面積が拡大しつつあることから、近年その生理的特性についてもいくつかの報告例がある。ピタヤの生育と温度については、本実験で用いたレッドピタヤと同属のホワイトピタヤ(*Hylocereus undatus*)に関して温度反応が研究されている(Nobelら、1995, 2002)。それによると、最もCO₂吸収量が高かった温度条件は30/20°Cの時で、本実験の結果と一致した。

CO₂吸収が最も高かった30/20°Cは、他のCAM植物、特にサボテン類に比べ若干高い温度域である。砂漠に生息するウチワサボテン *Opuntia ficus indica* や樽型サボテンの *Ferocactus acanthodes* は23/13°CでCO₂吸収が良好となった (Nobel, 2002)。しかし、ピタヤの生育地の温度は比較的高温にあるにも関わらず、高すぎても生育が阻害されると言われる。特に、数種類のCAM植物（主にサボテン科）において高温への耐性を調査した実験では、砂漠に生息するサボテン類は充分に耐えることができた温度でも、ピタヤは茎部に壊疽が発生しCO₂吸収も著しく減少した (Nobel, 2002)。これより、近年、ピタヤの生息域よりも高温の地域へ、例えばイスラエルや北アフリカ、アメリカ南西部といった地域にまで栽培を広げようという試みがなされているが、このような地域では高い温度がピタヤ栽培の制限因子ともなる可能性もある。

また、CAM植物と温度との関係については、低い夜温と高い昼温という温度条件の時にPhase 1のCO₂吸収量が良好になると報告されている (野瀬, 1986)。これはベンケイソウ科、パインアップル科、サボテン科の植物について調査した結果で、明期と暗期の温度較差を10～15°Cに設定した時が最もCO₂吸収が活発になったという。本実験では、4種類の温度処理区を設定したが、日較差が10°Cとなる組み合わせは30/20°Cの1区のみで、残りは5°C前後であった。しかし、Phase 1のCO₂吸収をみると、30/20°C区から25/20°C区と、昼夜温の日較差が小さくなってしまっても大きな影響は見られなかった。このことから、ピタヤのCO₂吸収においては、上で述べた昼夜温の日較差はそれほど重要な要素ではないのかもしれない。むしろ、Phase 1のCO₂吸収を著しく低下させたのは17/13°Cとい

う低温条件においていた時であった。恐らくこれも、ピタヤの原生地である熱帯雨林環境が温暖であることに起因しているためと考えられる。

次に、Phase毎に温度が及ぼす影響について考えてみる。Phase 1におけるCERが高いのは30/20°Cと25/20°C区であった。35/30°C区という高温区ではPhase 1の低下は小さく、17/13°C区ではCERが著しく低下した。一方、Phase 4では25/20°C区のCERが最も高く、次いで17/13°C区、30/20°C区と続き、高温35/30°C区においては著しく低下した。このように、温度に対する感受性は各Phaseによって異なり、Phase 1は比較的高温環境でも活性が高く、一方、Phase 4は高温環境では活性化しないと考えられる。これは、CAM型代謝経路と関連があり、暗期のCO₂固定に用いられるPEPCaseと明期のCO₂固定に用いられるRubiscoとでは活性の最適温度が異なることが反映されているのだろう。本実験ではピタヤの酵素活性についてのデータが得られていないため、温度条件と茎内の酵素との関連がどの程度あるのかは明らかでないため今後の検討が必要である。

本実験で設定した温度処理区は、沖縄でのピタヤ栽培を考慮したものであった。すなわち、明暗期温35/30°Cとは夏季、17/13°Cは冬季の気温を考慮したものである。実験結果からは、沖縄の夏季はピタヤ栽培に最適な温度条件であるが、冬季の気温は適温より低く温度不足が予想される。特に、沖縄の1～2月の最も寒い時期は最低気温が10°Cを下回る日もある。そのため、冬季の温度環境には改善の必要があると考えられた。しかし、ピタヤは果樹でありその最終目的は果実の品質にある。そのため、今後は温度環境がピタヤの花芽形成や果実生産及び果実品質に及ぼす影響についても検討する必要がある。

第2節 明期の平均光強度がピタヤのCAM型光合成に及ぼす影響について

はじめに

植物の光合成において、光環境は最も基本的な要素の一つである。第1節より、ピタヤの光合成パターンが明らかとなり、ピタヤのCAM型光合成は温度に強く影響されることが示された。ピタヤは夜間 (Phase 1) と明期後半 (Phase 4) のCO₂吸収をする典型的なCAM型光合成植物であり、特に、CO₂吸収はほとんど夜間に行い、全CO₂吸収量に貢献する割合は極めて高いことが明らかになった。また、明期のCO₂吸収であるPhase 2と4は、条件によっては消失しまう不安定なものであった。このように、ピタヤの場合CO₂吸収の大部分が暗期に行われ、明期においてはCO₂吸収が消失または抑制され、暗期のCO₂吸収量が全CO₂吸収量に及ぼす影響は大きい。この明期の光の強さが、明期に加え暗期のCO₂吸収にどのような影響を与えるのかは興味がもたれるところである。

緒言でも述べたように、ピタヤの原産地は中南米の熱帯雨林内であることから、その光環境を考えるとピタヤがそのような場所で受ける光量は低いと予想され、最適光強度も乾燥地に生息するような一般的CAM植物よりも低い可能性がある。実際、ピタヤの商業栽培を行っているイスラエルではホワイトピタヤ (*H. undatus*)、レッドピタヤ (*H. Polyrhizus*)、イエローピタヤ (*S. megalanthus*) について、太陽光線を30～60%遮光下で栽培を行っている (Ravehら, 1998)。

本実験では、明期の光強度を弱光から強光まで種々設定し、ピタヤのCERに与える影響について調査した。

材料及び方法

供試材料は2005年に1/5000ワグネルポットに植え付けた植物体のうちから健全なものを選んだ。測定に用いた株は、実験開始から終了まで同一の個体を用い、処理ごとの交代は行わなかつた。ガス交換速度の測定法は第1節で述べたとおりである。測定条件は、明期の光強度を100, 200, 400, 600, 800, 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に設定した。同化箱内に設置した茎節の表面上の光強度を光量子密度センサー (LI-250, LI-COR) で測定し光強度が設定光強度になるように調節した。光強度の調節は、光源と植物体との距離および同化箱上に白色の寒冷沙の併用で行った。

また、光強度が発達段階の異なるピタヤの茎節に及ぼす様々な影響を調査した。出芽後長時間が経過した「成熟茎」と、新芽で未発達な「未成熟茎」の2種類に分類し光強度の影響について調査した。成熟茎は、表面のワックス層が発達しており、色素も濃くなっている。成熟茎は発生してから長時間が経過し、自身の茎節部分の成長はすでに止まっている。一方で、未成熟茎は新芽に相当するもので、表皮も発達していない。そのため色素も薄く表皮は柔らかく、傷つきやすくなっている。また、先端部分に成長点を維持しているため良く成長を続ける。明期の長さは7時から18時までの11時間とし、温度条件は昼/夜温は30/20°Cに設定した。また、植物体を各処理条件下に数日間おき順化させ、日変化が安定したのを確認してからデータを採った。

結果

明期の平均光強度がCERの日変化パターンに及ぼす影響

図2-1～2-4に、光強度を100～1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に変化させた際のピタヤ茎部のCERと気孔

伝導度の日変化を示した。最適温度環境下（30/20°C）で光強度を上げると、両茎において600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ まではPhase 1のCER、気孔伝導度は上昇した。成熟茎では、Phase 1のCERが最高値に達する光強度は600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 付近で、値は7.23 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。また、Phase 4は800 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上の光強度で発

生した。

未成熟部においては、Phase 1のCERは600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 付近で9.16 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の高い値を示した。また、Phase 4は成熟部よりも低い400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上で発生した。気孔伝導度は200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で高い値に達し、さらに高い光強度では低下傾向にあり、気孔は強光で

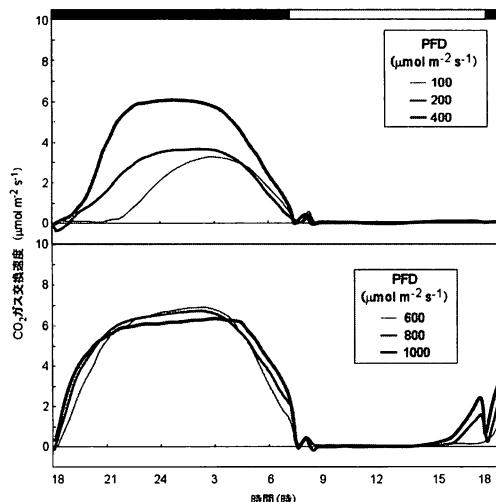


図2-1. 異なる光強度が成熟茎部のCO₂ガス交換に与える影響。

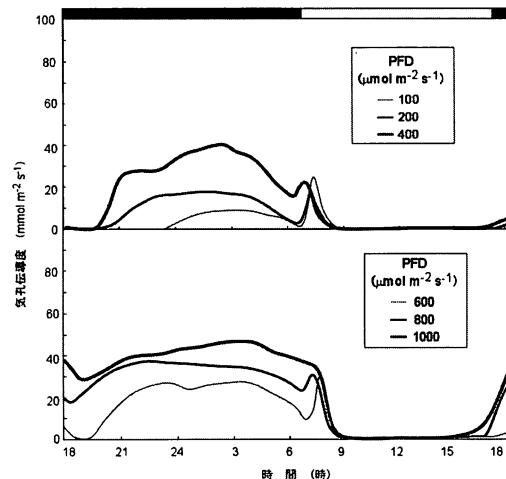


図2-2. 異なる光強度が成熟茎部の気孔伝導度に与える影響。

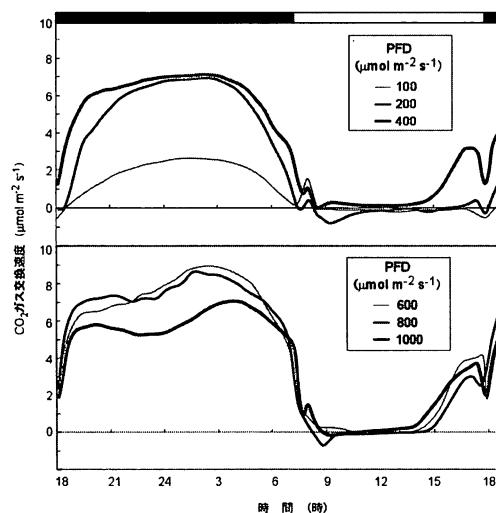


図2-3. 異なる光強度が未成熟茎部のCO₂ガス交換に与える影響。

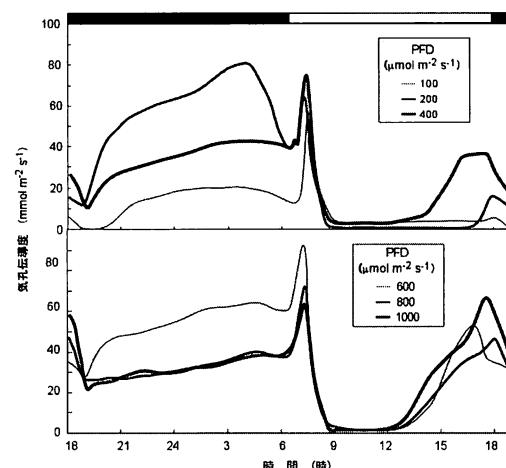


図2-4. 異なる光強度が未成熟茎部の気孔伝導度に与える影響。

閉鎖すると考えられる。未成熟茎の特徴としては、Phase 1におけるCERが光強度に伴い上昇したが、暗期開始直後に一旦上昇し速度を維持した後に、午前0時付近に再び上昇し暗期開始後9時間目に最高値に達した。このため、明期の光強度が $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上ではPhase 1は凹型を描いて推移した。

明期の平均光強度がCO₂収支量に及ぼす影響

CO₂収支量とは、CO₂吸収量から放出量を差し引いて算出する。成熟部のCO₂収支量は、光強度の上昇に伴い増加し $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で定常値に達した(図2-5)。Phase 4は光強度800以上で観察されるようになり、それ以上の光強度でも増加していることから、Phase 4のCO₂収支量は不飽和状態である。

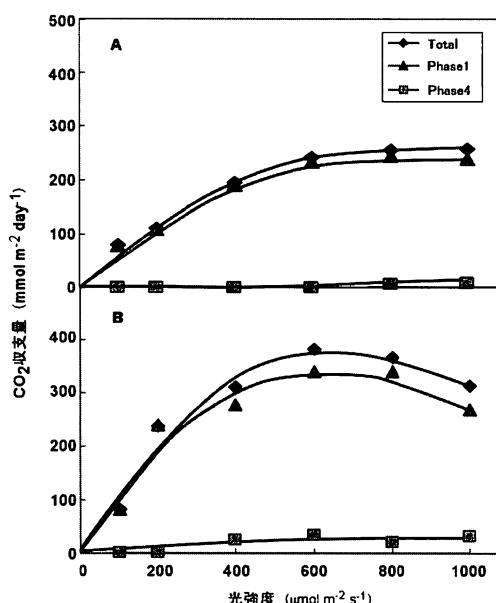


図2-5. 光強度が成熟茎部 (A) 及び未成熟茎部 (B) のCO₂収支量に与える影響。

未成熟部の場合(図2-5)、Phase 1のCO₂収支量は光強度が $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ までは増加し、 $800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 付近で飽和に達し、それ以上では減少に転じた。Phase 4のCO₂収支量は、

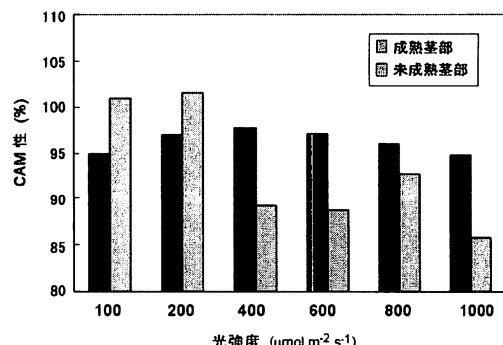


図2-6. 異なる光強度がCAM性に与える影響。CAM性とは、一日のCO₂収支量に対する夜間のCO₂吸収量の割合。

光強度が $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上でも増加し続けた。全収支量は、光強度 $800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上でPhase 1のCO₂吸収量が減少したため、 $600 \sim 800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 付近で最高値に達した後、減少に転じた。また、 $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上の光強度では未成熟茎の表面にアントシアニンが発生し、光ダメージが観察されるようになつた。

明期の平均光強度がピタヤのCAM性に及ぼす影響

第2-6図に、明期の光強度がピタヤのCAM性に及ぼす影響を示した。第1節でも述べたように、CAM性とは、1日の全CO₂収支量に占めるPhase 1のCO₂吸収量の割合で、この値が高いほどCERの日変化がCAM型特有になっていることを示す。成熟茎、新芽茎部、両方においてピタヤのCAM性は、光強度が強くなるにつれて高くなる傾向にあった。

考 察

明期の光強度の上昇に伴いピタヤのCO₂収支量は増加した。また、CO₂収支量が定常値に達した光強度は $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。Nobelら(1995)は、レッドピタヤと同属のホワイト

ピタヤ (*H. undatus*) の光反応を調査したところ、 $400 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 付近で飽和に達したと報告している。しかし、本研究で得られたピタヤの最適光強度は、さらに高い光条件となった。CAM植物におけるCERの光反応についてみると、パインアップルでは明期の光強度の上昇に伴いCERは上昇し、 $30\sim40\text{klx}$ (PPFD 800~ $1000 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 以上で飽和した (野瀬ら、1979)。また、Nobel (2004) は、樽型サボテン (*F. acanthodes*) とウチワサボテン (*O. ficus-indica*) では、 $700\sim1000 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (日長12時間) で最も CO_2 吸収量が良好になると述べている。ピタヤのCERにおける最適光強度域は他のCAM植物よりも低く、特に同じサボテン科のCAM植物と比べてもさほど高くない。ピタヤはサボテン科の植物ではあるが、砂漠などの乾燥地に生息するサボテンではなく熱帯雨林内で樹木の洞や岩の窪みなどで着生生活をする森林性のものである。従って、このような環境下では日射が林冠を通過する際に弱まるため、生育のために強い光強度は必要なかつたと考えられる。

本実験では、発育状態の違いによって、光反応に差異が生じた。成熟茎では、Phase 4 は $800 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上の光強度で出現し、未成熟茎では $400 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 既に認められた。また、成熟茎の CO_2 吸支量は $600 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で定常値に達し、それ以上の光強度でも Phase 1 の CO_2 吸支量を維持し、Phase 4 もさらに増加した。そのため、上述の最適光強度域が $600 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ は成熟茎には当てはまらない。今実験では光強度は $1000 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ まで変化させたが、成熟茎の最適光強度域はさらに高いところにある可能性もある。

一方、未成熟茎は光強度 $600 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で定常値に達し、それ以上では Phase 1 の CO_2 吸

支量が減少すると共に、 $1000 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では茎表面にダメージが観察された。Phase 4 は $800 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上の光強度でも増加を続けるが、Phase 1 の低下が著しく、 $1000 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では 1 日の全 CO_2 吸支量は最高値よりも 20% 程減少した。これは、茎部の表皮の形態に大きな違いがあるためと考えられる。成熟茎は貯水組織、液胞がより発達し多肉で表皮細胞も厚くワックス層が発達している。このため葉緑組織の内部にまで到達できる光の量が未成熟茎に比べ少なくなり、葉緑体が吸収できる光子量が同じ光強度でも未成熟茎よりも少なくなる。そのため、成熟茎はより強い光への感受性も減少したのではないかと考えられる。

図2-3で示されたように、未成熟茎の CO_2 吸支量は $100\sim200 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で急激に増加した。また、気孔伝導度も高く、この光強度で蒸散が盛んであると考えられる (図2-4)。 $200 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ での CO_2 吸支量は $237 \text{mmol}^2 \text{day}^{-1}$ で、最高値 $382 \text{mmol}^2 \text{day}^{-1}$ (光強度 $600 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) の約 60% に達している。これより、未成熟茎は弱光でも CER のポテンシャルを十分に発揮できると考えられる。この特性も、ピタヤの原生地の環境と関連しているのだろう。着生 (半着生) 生活を送るピタヤは、生育時に気根を発達させ、木の幹などに登攀する性質を持っている。そのため、熱帯雨林内でより多くの光を獲得し、樹上に向かって伸長していくためには弱光でも効率よく光合成を行えるような能力を獲得する必要があったと考えられる。

以上、光環境に対する反応をまとめると、ピタヤは生育段階により最適光条件が異なり、実際の栽培現場ではそれに伴って光強度を調整する必要がある。沖縄県では、ピタヤは露地栽培が主だが、真夏の晴天時の日射強度は $2500 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ を超えることが多い。そこで CER

に最適な状態で維持するためには遮光などで光強度を調節しなければならない。

しかし、これはCERによる光合成産物を増加させることを目的とした場合であり、ピタヤ栽培の最終目的は果実生産であることから、光合成と果実収量、品質の面と両方併せて検討する必要がある。米本ら(2005)は、果皮の色付きは光が強い方が良いと報告し、また、果実を結実させるのは下垂させた成熟茎のみであることから、成熟茎における光環境を優先したほうが良い可能性もあり、今後さらなる調査が必要である。

第3節 高CO₂濃度がピタヤのCAM型光合成に及ぼす影響

はじめに

大気中に含まれるCO₂は光合成の基質である。このCO₂濃度は植物の物質生産に大きな影響を与える。施設栽培などでは、果菜類などの栽培において閉鎖環境でCO₂を施用し促成栽培の方がとられる。また、現在の地球を取り巻く環境問題として、大気中のCO₂濃度の上昇があり、このままでは大気中のCO₂濃度は、21世紀の半ばには現在の濃度の2倍に到達するとの予測もある。このような世界的な気候の変化も加わり、高CO₂濃度に対する植物の光合成反応について知ることは作物生産を考える上でも重要である。これまで数多くの植物において高CO₂濃度と光合成に関する研究が行われてきた。それによると、C₃植物は高CO₂濃度処理によって光合成や乾物生産が促進されるが、C₄植物では変化は少ないと言われる(川満、1996)。また、19種類のCAM植物における高CO₂濃度の影響を調査したところ、殆どのCAM植物においてCO₂収支量や乾物生産が増加した(Nobelら、2000)。しかし、その反応は種類により異なり、中には

高CO₂の影響を受けない植物も見られたため、CAM植物が高CO₂に対してどのような生理的反応を示すかについてはまだ不明な点が多い。

ピタヤのCAM型光合成特性に関しては前節で明らかであるが、果実生産を目的とする果樹でもあり大気中CO₂濃度の上昇がプラスに作用するか否かは興味が持たれるところである。今実験では、ピタヤのCAM型CERが、高CO₂濃度環境に対してどのような反応をするのか、CO₂濃度とさらに光強度、温度と絡ませて変更し調査を行った。

材料および方法

供試材料は2005年に1/5000ワグネルポットに植え付けた植物体のうちから健全なものを選んで使用した。測定に用いた株は、実験開始から終了まで同一の個体を用い、処理ごとの交代は行わなかった。また、ガス交換速度および有機酸含量の測定方法の詳細は第1節で述べたとおりである。本実験では大気中CO₂濃度、光強度、温度条件を組み合わせた以下の3処理区を設定した。

- ①光強度600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、明/暗期温度30/20°C条件でCO₂濃度を370, 740ppmに変化、
 - ②光強度を200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、明/暗期温度30/20°CでCO₂濃度を370, 740, 1400ppmに変化、
 - ③光強度200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、明/暗期温度17/13°CでCO₂濃度を370, 740ppmに変化、
- また、①の処理区ではリンゴ酸含量の日変化についても測定した。

CO₂濃度の調整は、同化箱の導入空気へ30%CO₂ボンベから添加して行った。明期の長さは7時から18時までの11時間とした。植物体を各処理条件下に数日間おき順化させ、日変化の測定データが安定したのを確認してからデータを

採用した。

結 果

高CO₂濃度がピタヤのガス交換の日変化パターンに及ぼす影響

図3-1は、明期光強度600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、明/暗期温度30/20°Cという条件下でCO₂濃度を370と740ppmに設定した時のCERと気孔伝導度の日変化である。CO₂濃度が740ppmの時、Phase 1と4においてCERは上昇した。特に、Phase 4における増加が顕著であった。Phase 1におけるCERの最高値は両CO₂濃度で約8.5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、370と740ppmでは大差は見られなかった。一方で、Phase 4におけるCERは、740ppmでは最高値が5.1 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ まで上昇し、Phase 4が開始される時間帯も早くなつた。次に、気孔伝導度の日変化を見ると、740 ppmにおいては気孔伝導度が低下し、高CO₂濃度によってピタヤの気孔は閉じ、特にPhase 1における閉鎖が顕著であった。

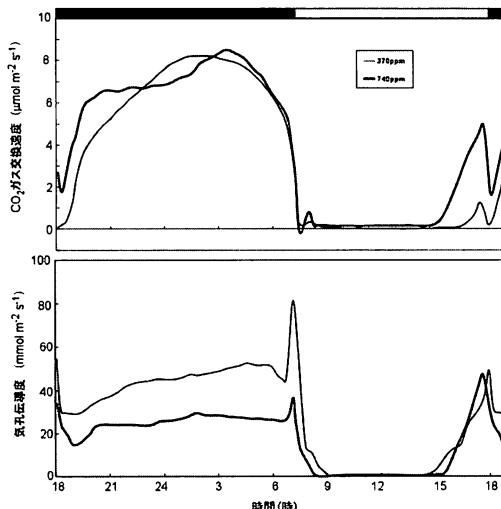


図3-1. 高CO₂濃度がCO₂ガス交換速度と気孔伝導度の日変化に与える影響。
測定は光強度600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、明/暗期温度30/20°C条件下で行った。

図3-2は光強度200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と温度30/20°Cという条件下でCO₂濃度を370、740、1400 ppmに変化させた時のCERと気孔伝導度の日変化である。この場合も光強度が600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の時と同様に、CO₂濃度が高まるとCERも上昇し、逆に、気孔伝導度は低下した。また、第2節で、この200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ という光強度ではPhase 4が発生しないことを示したが、本実験においても同様であり、高CO₂濃度の影響はPhase 1で顕著であった。Phase 1におけるCERの最高値は370ppmの時に4.38 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、740ppmでは6.15 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、1400ppmでは6.93 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に達した。

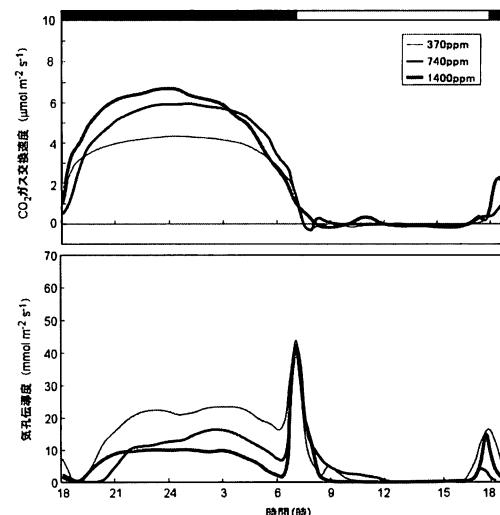


図3-2. 高CO₂濃度がCO₂ガス交換速度と気孔伝導度の日変化に与える影響。
測定は光強度200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、明/暗期温度30/20°C条件下で行った。

図3-3は光強度200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と17/13°Cという低温に設定した場合、CO₂濃度を370と740 ppmの2段階に変化させた時のCERと気孔伝導度の日変化である。ここでも高CO₂濃度によってCERは上昇し、一方、気孔伝導度は低下した。この処理ではPhase 1の変化は小さく、

CERの最高値は370, 740ppm両方において4.3 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で、高CO₂処理はPhase 1に対し影響を与えたかった。一方で、この処理区は光強度200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であるにも関わらずPhase 4が発生し、第2節で得られた結果と合致しない現象が見られた。しかし、高CO₂濃度の影響はこのPhase 4において顕著であった。図に示したように、Phase 4のCERの最高値は3.5から6.9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に増大した。これより、高CO₂濃度が及ぼす影響のパターンとしては、600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ +30/20°Cの場合と類似していた。

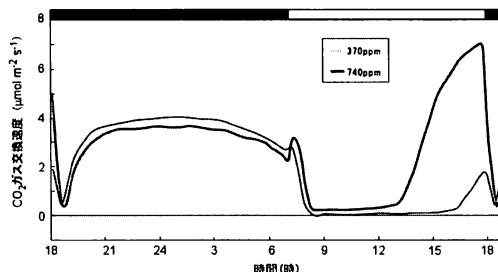


図3-3. 高CO₂濃度がCO₂ガス交換速度と気孔伝導度の日変化に与える影響。
測定は光強度200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、明/暗期温度17/13°C条件下で行った。

高CO₂濃度と光強度・温度の組み合わせがCO₂収支量に及ぼす影響

表3-1は、各処理区におけるCO₂収支量と、370ppmに対する高CO₂濃度によるCO₂収支量の増加率を示したものである。600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ +30/20°C区では、CO₂濃度が2倍になると1日の全CO₂収支量は16.6%増加した。日変化パターンの結果は、Phase 1における増加分は約8%で、Phase 4では約9倍の増加となった。200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ +30/20°C区では、1日の全CO₂収支量は740ppmで約30%，1400ppmでは約40%の増加であった。600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ +30/20°C区と異なりPhase 4は無く増加はPhase 1

のみであった。よって、この処理区では、1日の全CO₂収支量はPhase 1に大きく支配され、全CO₂収支量の増加に大きく貢献する結果となつた。200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ +17/13°C区では、Phase 1におけるCO₂収支量は740ppmで低下した。しかし、Phase 4におけるCO₂収支量は著しく増加し、740ppmにおけるPhase 4は10倍の増加となつた。

表3-1. 高温条件下における高CO₂濃度がCO₂収支量に与える影響。

光強度 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	CO ₂ 濃度 (ppm)	CO ₂ 収支量($\text{mmol m}^{-2} \text{day}^{-1}$)			増加率(%)		
		Total	Phase1	Phase4	Total	Phase1	Phase4
600	370	298.2	288.9	3.5	-	-	-
600	740	347.8	311.9	27.3	17	8	685
200	370	174.1	174.5	0	-	-	-
200	740	224.1	222.2	0	29	27	0
200	1400	242.3	240.9	0	39	38	0

注: 明/暗期温度30/20°C。

本実験で設定した、CO₂濃度と光強度、さらに温度条件を組み合わせた3つの処理区では、高CO₂処理は全処理区で1日のCO₂収支量を増加させた。特に、②のような光の不足している条件、さらに③のように光も温度も不足した条件では、栽培に不利な条件下での高CO₂処理の方がその効果は大きかった。また、増加程度を比較するとPhase 1よりもPhase 4における増加が著しかった。これより、ピタヤにおいては、高CO₂濃度は暗期のCO₂吸収よりも明期のCO₂吸収に大きく作用することが示された。高CO₂濃度がピタヤの有機酸含量の日変化に及ぼす影響

図3-4に、600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ +30/20°Cにおける、370と740ppmでのリンゴ酸含量の日変化を示した。第1節より、ピタヤの茎のリンゴ酸含量は、CAM植物特有の日変化を示し、明期

はじめに最大値が得られることが明らかとなつた。一方で、リンゴ酸含量の最小値が得られるのは明期後半であった。大気中CO₂濃度が740 ppmになると、明期の初めの最大値は9.2から11.9mg g⁻¹となり、29%も増加した。また、高CO₂濃度下では含量の日較差も大きくなつた。最小値である明期後半（暗期初め）のリンゴ酸含量は740ppmのほうが少ない結果となつた。

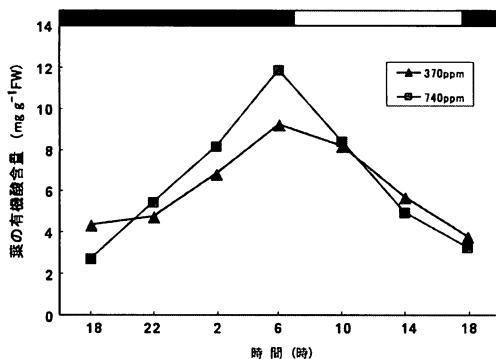


図3-4. 高CO₂濃度が茎内リンゴ酸含量の日変化に与える影響。
測定は光強度600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、明/暗期温度30/20°C条件下で行った。

高CO₂濃度と光強度・温度の組み合わせがピタヤのCAM性に及ぼす影響

CAM性は、1日の全CO₂収支量に占めるPhase 1のCO₂吸収の占める割合を表したものである（野瀬、1992）。それぞれの条件下でピタヤに高CO₂処理を行った際のCAM性について表3-2に示した。その結果、各処理区において現行のCO₂濃度に比較して、高CO₂濃度ではCAM性が減少した。特に、高CO₂濃度がピタヤのCAM性を大きく低下させたのは600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ +30/20°C区と、200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ +17/13°C区であった。上述のCERの日変化でも述べたように、この2つの処理区は高CO₂濃度によって明期のCO₂吸収量が増加した区であったため、CAM性が低下した。

表3.2. 低温条件下における高CO₂濃度がCO₂収支量に与える影響。

光強度 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	CO ₂ 濃度 (ppm)	CO ₂ 収支量($\text{mmol m}^{-2} \text{day}^{-1}$)			増加率(%)		
		Total	Phase1	Phase4	Total	Phase1	Phase4
200	370	175.5	160.0	6.3	-	-	-
200	740	240.0	147.8	77.3	37	-8	1137

注:明/暗期温度17/13°C。

考 察

異なる光および温度条件下で、ピタヤのCERは高CO₂濃度によって増加したことから、ピタヤは高CO₂に対してプラスの反応を示すことが明らかとなった。CAM植物の高CO₂濃度に対する反応についていくつかの報告がある。それらをまとめると、高CO₂濃度に対するCAM植物の反応は属や品種によって異なり、影響を受けるPhaseも種によって様々であった。例えば、充分な灌水条件下で高CO₂施肥を行った実験では、ウチワサボテン*O. ficus indica*についてはCO₂吸収と成長が促進された。しかし、リュウゼツラン*A. vilmoriniana*とパインアップル*A. comosus*においては同様な結果は得られなかった。また、充分な灌水条件下での高CO₂施肥によってウチワサボテン*O. ficus indica*は暗期のCO₂吸収が増加したが、リュウゼツラン*A. vilmoriniana*は水ストレス条件下の時にだけ高CO₂施肥によってCO₂吸収量が高まった（Nobel, 2002）。このように、CAM植物は大気中CO₂濃度に影響されるが、その特性やメカニズムは未だ不明な点が多い。ピタヤにおいても、本実験は数日間という短期間の実験であったため、今後は長期的な影響についても更なる調査が必要であると考えられる。

次に、本実験の結果を沖縄県におけるピタヤ栽培に当てはめて考えてみたい。本実験で設定した処理区のうち①600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ +30/20

°C区というのは第1, 2節で得られた、ピタヤのCERが最良となる環境条件である。②200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ + 30/20°Cは十分な日射が得られない環境を考慮したもので、③200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ + 17/13°Cは日射が不足しさらに生育適温よりも低温におかれた場合を想定したものである。表3-1より、②や③処理区のような光強度や温度が不足すると、適切でない環境条件においてはピタヤの1日の全CO₂収支量は大きく減少する。しかし、そのような環境条件下でも、大気中CO₂濃度を高めてやることで、CO₂収支量は大きく回復する。このことから、沖縄の冬季は温度、光強度共に不足がちで、これはピタヤの栽培において不利な条件ではあるが、施設栽培などによってCO₂施用を行うことで改善できる可能性もある。実際に生産現場での応用を考えると、CO₂施肥を行なうための設備コストと生産における収益、CO₂施肥を行う期間、CO₂施肥が果実品質に与える影響などについても調査する必要がある。

第4節 ピタヤ廃棄茎部の有効利用について

はじめに

ピタヤのCAM型光合成特性を調査した結果、CERは最高で 6 ~ 8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、特に茎部先端の未成熟部（樹木においては新梢に相当する部分）においては 9.16 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ となり、他のCAM植物に比べても高いことが判明した。第1, 2節においてピタヤの生育に適した環境条件が明らかとなつたが、沖縄の夏季は未成熟茎の生長が活発になり、栽培現場では茎が過繁茂状態になっている光景を良く目にする。ピタヤの栽培現場では、群落の内深部まで日射を確保するため、また、果実収穫の際の作業効率を良くするため、過繁茂となつた茎部を剪定し、整枝している。特に、ピタヤのような登攀性の

植物は、自然放任の管理下では茎部が栄養生長を続けながら垂直方向に伸長し、結果として果実の生産量にも悪影響を与え、高品質の果実の生産も困難となる。しかし、実際には、ピタヤ未成熟茎のCERの高さから分かるように、この作業によって廃棄茎が多量に発生する。さらに、ピタヤはサボテン科のCAM植物であることから乾燥に強く、剪定後茎をそのまま放置すると再び新芽を形成し根を張って成長を開始する厄介な側面をも持っている。

このようなことから、栽培の現場ではピタヤ廃棄茎の処理に苦慮しており、解決策が待たれている。本実験では、茎部を分析しその有用性と再利用方法を検討した。特に、ピタヤ茎部の有効利用を検討するために、植物体の無機元素および茎部における無機元素の時期的な変化特性を調査した。次に、廃棄される茎の有効利用を検討するためにピタヤ茎部を炭化しその成分をも調査した。

材料及び方法

植物体

レッドピタヤ (*Hylocereus*属) とホワイトピタヤ (*H. undatus*) の茎部を用いた。茎部の時期別の無機成分含有量について調査した実験では、八重瀬町東風平の栽培農家のハウス内で、植え付け後3年が経過し、果実生産も良好なピタヤ植物体を用いた。ハウス内でレッドピタヤとホワイトピタヤの植物体をそれぞれランダムに6個体選出し、同じ植物体上から成熟茎及び未成熟茎を採取した。サンプリングした茎節は平均して30cm程度のものであった。サンプリングはそれぞれ5, 7, 10, 1月に行い、試料は含水率、無機成分含有量を測定した。ピタヤの植物体内（器官別）元素の分布を調べた実験では、2005年5月にプランターに植えつけビニ

ルハウス内にて栽培させた植物体を用いた。2006年2月にレッドピタヤ、ホワイトピタヤそれぞれ5株について根、成熟茎、未成熟茎、気根 (Aerial root)、棘 (棘座) に分解し、各部の無機成分含有量を測定した。

無機成分分析

採取した茎部サンプルを80°Cのオーブンで3日間乾燥させた。乾燥させた試料を粉碎機にかけ、その粉末を0.25 g 計量し0.5%硝酸を50ml加えて24時間抽出し、濾紙 (No. 6) で濾過したものとICPプラズマ発光分析装置 (ICPS-2000、島津製作所) で測定した。また、窒素、炭素含量はN/Cアライザ (NC-90A、島津製作所) で測定した。

ピタヤ茎部炭化物の生成と無機成分含量、pH、電気伝導度の測定

炭化に供試したのは、7月に採取したレッドピタヤとホワイトピタヤの成熟茎およびレッドピタヤ未成熟茎の3種類であった。これらの茎部は、上述の農家ハウス内の植物体から採取したもの用いた。試料をバッチ式炭化装置

(MBA668N、明和工業) で窒素ガス雰囲気下で炭化温度500°C、昇温速度10°C/min、炭化保持時間3時間の条件下で炭化した。製造した炭化物は80°Cで2～3日乾燥機に入れて水分を除き、粉碎した後無機成分及びpH、ECを測定した。ピタヤから作成した炭化物の無機成分分析は、炭化物の粉末0.25 g を超純水50mlで1時間浸透抽出した後、濾紙 (No. 6) で濾過したものをICPプラズマ発光分析装置 (ICPS-2000、島津製作所) で測定した。また、ピタヤ炭化物の窒素、炭素含量はN/Cアライザ (NC-90A、島津製作所) で測定した。炭化物のpHはガラス電極法で、ECは1:5水浸出法により測定した。

結果

ピタヤ茎部の含水率、無機成分含有量について

ピタヤの茎部は含水率が高く、調査した全試料において90%を超えた。また、成熟茎に比べて、表皮が発達していない未成熟茎は水分含量が95%以上であった。図4-1、4-2には、ピタヤ

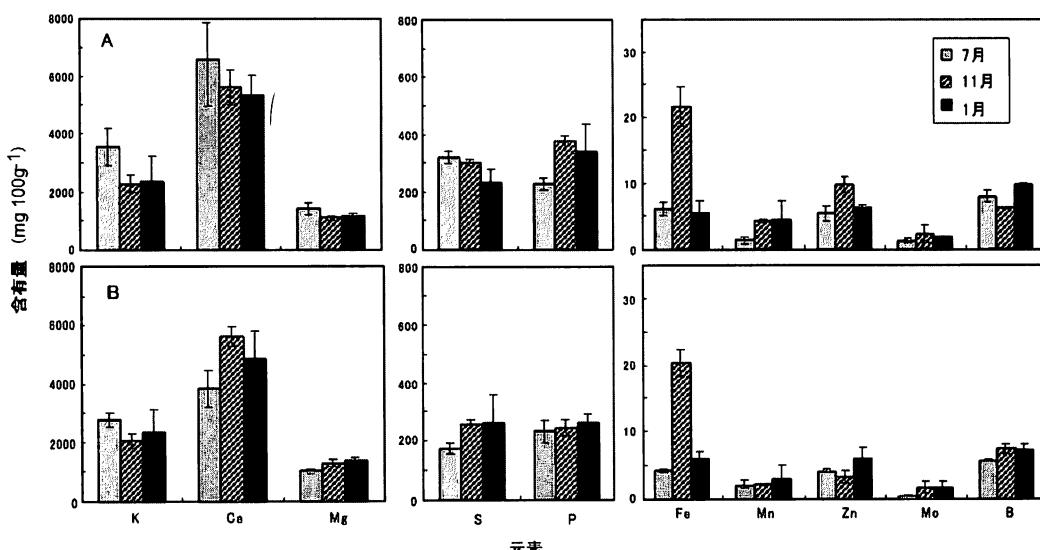


図4-1. 赤成熟茎部 (A) と白成熟茎部 (B) における時期ごとの無機元素含有量。

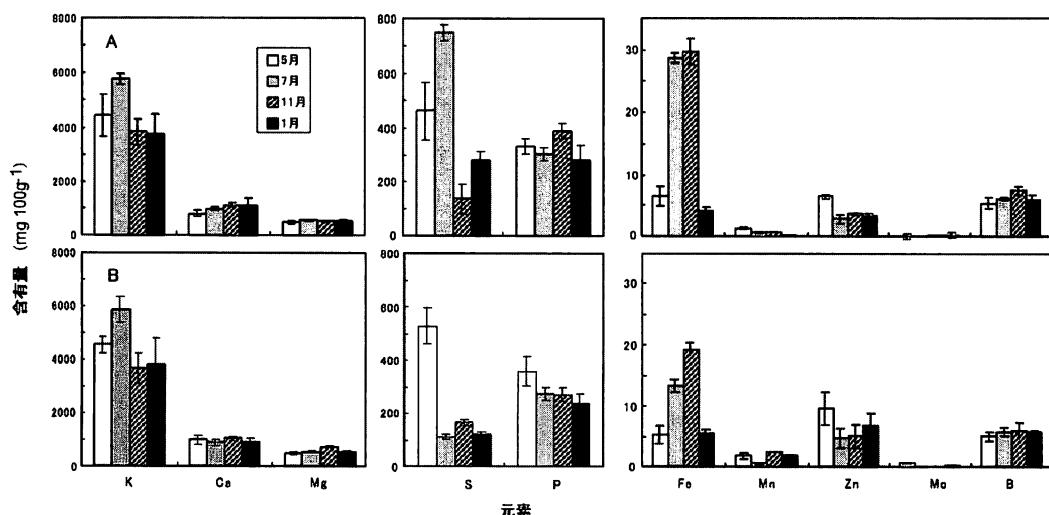


図4-2. 赤未成熟茎部 (A) と白未成熟茎部 (B) における時期ごとの無機元素含有量.

の茎部における無機成分の季節的变化を、レッドピタヤとホワイトピタヤの成熟茎と未成熟茎についてそれぞれ示した。まず、全体の推移の特徴としては、茎部の無機成分含有量は、生長が旺盛になる5月、開花結実が盛んになる7月に高く、1月になると低くなる傾向にあった。元素ではK, N, Mgなどの必須元素の含量が高かった。一方、Caと微量元素 (Znなど) では季節に関係なく推移した。特にFeは、サンプリング時期によって含有量に違いが見られ、夏にかけて含有量が増加し、その後は減少した。

次に、発達段階の違いによる茎内無機成分含量についてみると、成熟茎と未成熟茎とでは異なる結果になった。例えば、成熟茎はレッドピタヤ、ホワイトピタヤ両方において、未成熟茎に比べてMg, Caが多く、その含有量は乾物当たりで約2~3倍であった。一方、Kの含有量は未成熟茎の方が高く、全窒素と全炭素含量も未成熟茎の方が高かった。

次に、レッドピタヤ、ホワイトピタヤの体内における各元素含量の分布を表4-1, 4-2と図4-3, 4-4に示した。レッドピタヤとホワイトピ

タヤの間では、植物体内における各元素の分布量とバランスには大きな差は見られなかった。元素別に見ると、MgとCaは成熟茎に多く蓄積され、Kは未成熟茎と棘（棘座）に多く見られた。また、レッドピタヤとホワイトピタヤ両方において、棘は無機元素含有量が高く、特にK, Pの含量が高かった。また、地下根と気根では元素のバランスが類似していることから、両根では組成および役割がほぼ同じであると考えられる。

ピタヤ炭化物の特性について

炭化処理によって得られたピタヤ茎部の炭化物は黒色で無臭であり、処理後は大きく体積は減少したが、炭化前の形状を維持していた。しかし、炭化物自体は非常にもろい性質であり、触るとすぐに崩れてしまった。また、火気を近づけるとすぐに着火した。

表4-3はピタヤ茎部を炭化させた際の減量率及び炭化物の収率を示したものである。本実験では、レッドピタヤ成熟茎、ホワイトピタヤ成熟茎、そしてレッドピタヤ未成熟茎の3種類を用いたが、炭化前材料の含水率の高さが反映さ

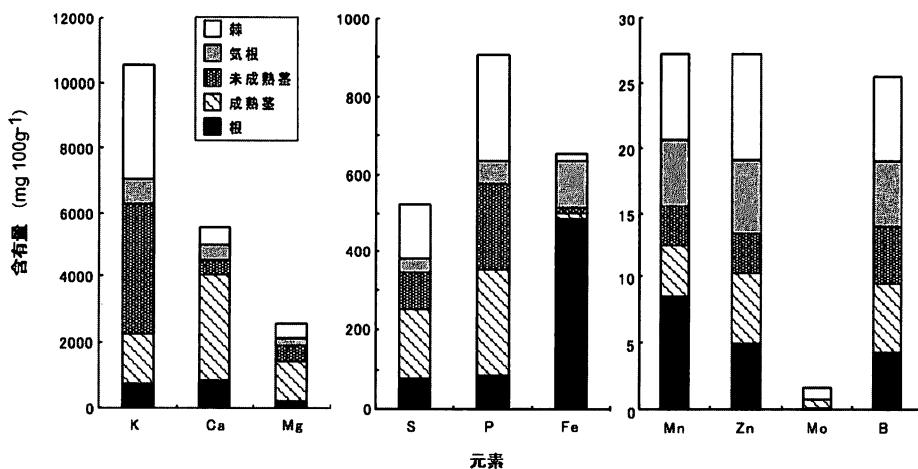


図4-3. レッドピタヤ植物体における各部の無機元素含有量.

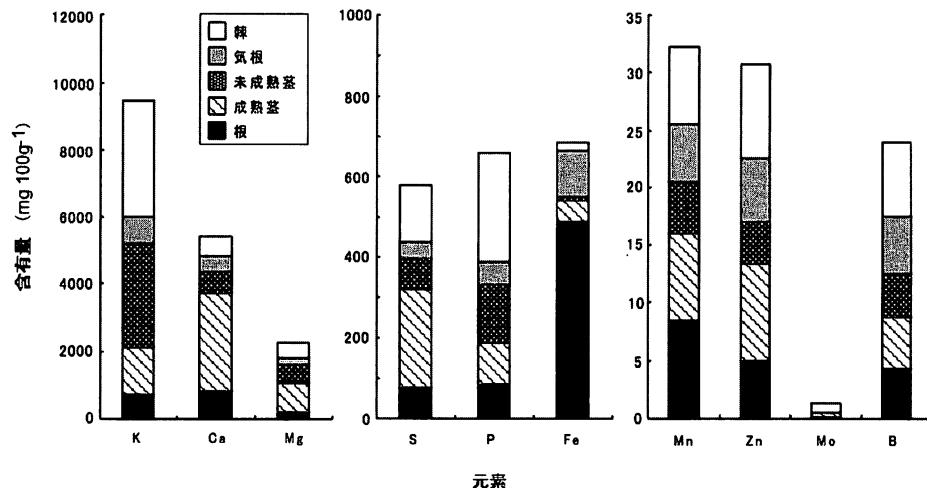


図4-4. ホワイトピタヤ植物体における各部の無機元素含有量.

れ、炭の収率は低かった。しかし、炭化処理による減容という点からみると、3種類とも減重量率は95%を超える結果となった。各炭化物の元素含有量などの化学性を表4-4に示した。ピタヤ炭化物のpHは10~11でアルカリ性を示し、他の炭化物、例えばバガス炭と比べてもさらに高いpHであった。また、EC電気伝導度も100を超えた。

次に、無機成分含有量については、3種ともにMg, S, Ca, Kが高い値となった。一方で、

植物にとって重要な栄養となるPの含有量は少ないものであった。また、今回炭化物として供試したレッドピタヤとホワイトピタヤの成熟茎、レッドピタヤ未成熟茎3種類では成分含量に大きな差は見られなかった。

考 察

ピタヤは、緒言でも述べたように、沖縄における重要な熱帯果樹である。しかし、ピタヤはサボテン科に属する多肉植物であり、特殊な

表4-1. レッドピタヤ植物体における各部の無機元素含有量.

部位	K	Ca	Mg	S	P	Fe	Mn	Zn	Mo	B	Al	Si	Na	TN	TC
	mg 100g ⁻¹													%	
根	713.3	830.0	212.2	75.6	86.3	487.6	8.5	4.9	0.1	4.3	528.5	387.0	81.8	1.5	40.9
成熟茎	1536.6	3210.8	1197.1	176.9	266.4	14.4	4.1	5.4	0.7	5.1	24.2	42.8	140.3	1.2	39.7
新芽茎	4014.8	460.1	475.8	89.6	223.3	14.1	3.0	3.1	0.0	4.5	13.3	25.7	26.4	1.4	40.2
気根	779.6	475.0	215.6	39.7	57.9	118.9	5.1	5.7	0.0	5.0	123.8	133.5	45.6	1.6	45.8
棘	3496.2	561.3	445.0	144.0	273.7	18.9	6.6	8.1	0.8	6.5	18.3	32.0	80.9	0.7	46.0

表4-2. ホワイトピタヤ植物体における各部の無機元素含有量.

部位	K	Ca	Mg	S	P	Fe	Mn	Zn	Mo	B	Al	Si	Na	TN	TC
	mg 100g ⁻¹													%	
根	713.3	830.0	212.2	75.6	86.3	487.6	8.5	4.9	0.1	4.3	528.5	387.0	81.8	1.5	41.6
成熟茎	1398.2	2890.6	819.6	242.3	103.1	53.4	7.6	8.5	0.1	4.5	49.3	47.9	738.2	1.1	39.3
新芽茎	3078.8	631.3	534.3	77.0	140.6	8.1	4.5	3.5	0.0	3.7	12.9	27.2	63.0	1.2	40.4
気根	779.6	475.0	215.6	39.7	57.9	118.9	5.1	5.7	0.0	5.0	123.8	133.5	45.6	1.6	45.8
棘	3496.2	561.3	445.0	144.0	273.7	18.9	6.6	8.1	0.8	6.5	18.3	32.0	80.9	0.7	46.0

表4-3. ピタヤ茎部を炭化させた際の収率, 減量率及び得られた熱分解液量.

サンプル名	炭化前 (g)	炭化後 (g)	収率		減量率 (%)	熱分解液 (ml)
			炭化前 (g)	炭化後 (g)		
レッドピタヤ茎部	1380	50	3.6	96.4	475	
ホワイトピタヤ茎部	1870	68	3.6	96.4	500	
未成熟茎(レッドピタヤ)	960	26	2.7	97.3	350	

表4-4. ピタヤ茎部から作成した炭化物の化学性.

サンプル名	pH	EC	TN	TC	B	Mg	Al	Si	P	S	Ca	Fe	Zn	Na	K
	ms m ⁻¹	%	mg 100g ⁻¹												
レッドピタヤ茎部炭	10.91	134.8	0.89	53.1	0.14	117.9	0.08	5.5	1.3	1194.5	17.9	0.09	0.00	90.8	5059.1
ホワイトピタヤ茎部炭	10.88	105.3	1.41	43.6	0.34	130.1	0.67	2.2	4.0	3604.5	54.2	0.09	0.00	70.5	8350.1
レッドピタヤ(未成熟茎炭)		1.41	37.8	1.52	217.1	0.32		4.7	5.2	3643.7	66.4	0.11	0.00	59.2	9000.0
バガス炭	7.63	3.4	0.53	56.3	0.00	4.5	7.07	139.6	24.6	9.0	5.4	1.19	0.00	43.5	110.2
ゴーヤー炭	9.27	103.1	2.28	60.7	0.42	97.0	0.00	4.1	208.8	89.5	75.3	0.00	0.02	90.7	6589.6
芝生炭	9.74	123.6	2.86	59.2	11.81	43.0	7.46	1283.7	573.8	732.5	4.7	4.97	0.45	198.1	7956.1

+CAM型光合成を行っている。そのため一般的な果樹類とはその生理生態的特性が大きく異なり、従来の果樹栽培技術を適用することは難しい。例えば、一般的な果樹類はその殆どが永年性の木本作物である。しかし、ピタヤは樹になる果実ではなく、植物体（樹体）の寿命に関しても正確にはわかっていない。また、年間通しての開花結実の回数が他の果樹類に比べ多く、夏季には開花結実のピークが10回訪れる場合もあるという。このようなピタヤの果樹生産能力の多さが植物体内の栄養分に、そして隔年結果にどう影響するのかなど未だ分かっておらず、今後の調査が待たれるところである。

本実験では、ピタヤ果実ではなくその茎部に着目してその特性を調査した。まず、ピタヤの茎部は殆どが水分であり非常に多汁質であることを明らかにした。ピタヤ茎部は含水率が90%以上で、特に未成熟茎の含水率は成熟枝に比べると高かった。成熟茎は、表皮が発達し、表皮組織の下にも厚膜組織が見られ、木質化している部分も多く堅かつたが、新芽はそれらの組織がなく、細胞壁も発達させていないため柔らかく、含水率も高くなつたと考えられる。

また、茎部の無機成分を調査したところ、成熟茎ではCaとMgが多く、未成熟茎はKが高かつた。レッドピタヤとホワイトピタヤは品種レベルで異なるが、無機元素の含有量には大きな違いは無かつた。両品種ともHylocereus属に属し、繁殖時には容易に交雑可能であることから、遺伝的に類似していると報告されている（山本ら、2002）。このことも関連して、茎成分の特性には品種間差異は殆ど無いと考えられる。しかし、茎内無機成分含有量の季節変動には、両品種間で必ずしも一致せず、さらなる調査が必要である。

上述のように、茎部の無機元素含有量は成熟

度合いで変化し、発達段階による違いが認められ、両品種に共通して観察された。未成熟茎は栄養生长期の組織であり、伸長を続けている部分である。そのため、K元素を積極的に集積し生長を活発に行っているが、結実期以降減少する傾向がみられたため、肥培管理面で注意する必要がある。

以上より、レッドピタヤおよびホワイトピタヤの茎部にはMg、Kなどの無機成分が多く含まれている事が明らかとなった。そのため、ピタヤ茎の有効利用として、廃棄された剪定茎を堆肥化することが考えられる。特に、未成熟茎は成熟茎に比べてK含量が高く、剪定の際に切断される廃棄茎の中ではこの未成熟茎が占める割合は高い。また、木質化が進んでおらず表皮も柔らかいため、堆肥を作成する際にも成熟茎に比べ分解が容易であると考えられる。しかし、ピタヤ茎は水分含量が極めて高いことが明らかとなった。農業総合研究所（1997）の調査によると水分含量が高い試料を用いて堆肥化した実験で（野菜屑）、堆積中に、アンモニアガスや悪臭を伴う廃液が大量に発生することが報告している。そのため、ピタヤで堆肥を作る場合もこの問題を考慮する必要がある。ピタヤ廃棄茎から堆肥を作成する際は、乾燥させるか、もしくは適当な水分調節材（おがくず、炭など）を添加し、堆肥化に適した含水率60%程度に調節できれば、良質の堆肥の生産が可能になるかもしれない。

ピタヤ茎部の炭化物も無機成分が豊富に含まれていることが明らかとなった。炭化物は、土壤に施用することによって土壤改良効果があることが明らかになっており、近年、利用が進められている資材である。炭化物は多孔質な内部構造をしており、そのため土壤の保水性及び排水性を改善する効果があるといわれる。このこ

とから、ピタヤ炭化物もハウス内の土壤に施用したりポット栽培の際に土と混合して使用したりすることで、同様の効果が望める。特に、植物にとって重要な元素であるK, Mgが多く含まれており、肥料効果も高く、これまで廃棄されていた茎部を炭化し再利用する事は、有効な資源活用方法の1つであると考えられる。

総合考察

本実験では、ピタヤのCAM型光合成特性を明らかにすることを目的として、温度、光強度及び大気中CO₂濃度条件がピタヤのCERに及ぼす影響について調べた。その詳細については第1節から3節で述べた通りであるが、ピタヤのCERは、環境条件によって大きく影響を受けることが明らかとなった。また、第4節ではピタヤの栽培現場で多量に発生している剪定茎の成分を調査し、その有効利用について検討した。

1. ピタヤのCAM型光合成の特性について

ピタヤは、第1節でも述べたように、暗期に気孔を開きCO₂吸収の殆どを行い、葉緑組織中のリンゴ酸も日変化を示したことから、CAM型光合成を行っているCAM植物である。Neales (1975) は、高等植物におけるCO₂交換の日変化型を分類しており、暗期のCO₂吸収がまったく見られないnon CAM、暗期のCO₂吸収がわずかに生じるweak CAM、暗期と暗期の両方で活発にCO₂吸収が生じるfull CAM、完全に暗期でしかCO₂吸収が生じないsuper CAMとしている。この分類に従うと、ピタヤはPhase 1とPhase 4が観察されたため、full CAMに近いと考えられる。

ただし、本実験では様々な環境条件を設定したが、ある環境条件下では暗期のPhase 4におけるCO₂吸収が減少、または消失しCO₂吸収を夜間にしか行わないsuper CAMとなる場合も

あった。また、暗期開始直後のCO₂吸収であるPhase 2の発生が観察されるのは非常に限られた機会であった。今回具体的なデータとして掲載はしていないが、Phase 2が発生するのは1つの実験区間での測定が終了し、次の処理区に順化を開始した際、順化開始直後の数日間にのみ、発生する傾向が見られた。例えば、第2節の光強度の影響を調べた実験において、光強度を徐々に強めた際、より強い光強度下においてはPhase 2の発生が見られた。しかし、日数が経過し、植物体が順化していくにつれてPhase 2は徐々に減少していき、データが安定した頃には見られなくなった。一方、今回データを採用しなかった植物体で、Phase 2が明確に発生した場合もあり、ピタヤのPhase 2は環境条件や、個々の植物体によって全く異なる反応を示すことが示され、規則性も見出せなかつた。このように、ピタヤの暗期のCO₂吸収は不安定なものであり、この事はピタヤのCO₂吸収パターンの特徴であると考えられた。

次に、ピタヤのCERからみたCAM型光合成について考えてみたい。本実験で得られたピタヤのCERについてだが、レッドピタヤの、良好な環境条件下におけるCERの最高値は、Phase 1では平均6～8 μ mol m⁻² s⁻¹、Phase 4では3～5 μ mol m⁻² s⁻¹であった。CAM植物は一般的な植物に比べ、CO₂交換速度が低くそのことが生育が緩慢なことの原因となっている。

しかし、本実験の結果、レッドピタヤはCAM植物の中では比較的高いCERを示した。これはCAM植物の中でも高いパインアップルに匹敵するもので、同じような熱帯湿潤地域を生息地とするラン類（デンドロビウムは4～5 μ mol m⁻² s⁻¹、関塚、1996）に比べても高かった。特に、未成熟茎のCERは成熟茎にくらべ高かった（10 μ mol m⁻² s⁻¹以上）。これは、ピ

タヤの生長において、未成熟茎は先端に生長点を持っており、伸長が特に速いという生育調査の結果と一致している。本実験では、第2節において、光強度とCERとの関係を茎の発達段階と関連させて調査を行ったが、今後は光強度だけでなく、温度など他の環境条件においても発達段階が異なる茎部の反応を調査することで興味深いデータが得られる可能性がある。

本実験では、環境条件がピタヤのCAM性に及ぼす影響についても調査を行った（野瀬、1979, 1992; CAM性 (%) = (Phase 1 のCO₂収支量) / (1日のCO₂収支量))。CAM性には、暗期 (Phase 1) のCO₂吸収の影響が大きく反映される。これは、1日の全CO₂収支量がどのくらいPhase 1での収支量に依存しているかを表しているとも考えられる。他の植物におけるCAM性については、野瀬（1986）がパインアップルで、関塚（1996）がファレノプシスにおいて報告している。それらのデータと比較すると、ピタヤは今回設定したどの処理区もCAM性が80%を下回ることは無く、CAM植物の中でもCAM性が高い結果となった。また、様々な環境下においても90~100%付近で推移し安定度高いものであった。そのためピタヤは、全CO₂収支量に占める暗期のCO₂吸収量の支配力がとても強いと考えられる。野瀬（1986）は、CAM型光合成を炭素獲得系として捉えた時、液胞の貯藏能力によって制限されてしまうPhase 1のCO₂吸収よりは、上限が存在しない明期のCO₂吸収を増やすことが重要であるとしている。しかし、実際にパインアップルにおけるCAM性と各種環境条件との関係を検討した結果、パインアップルにおいてはCAM性を低下させるような条件よりは増大させた条件において炭素収支を改善できると結論付けている（野瀬、1986, 1992）。

ピタヤにおいても、同様に本実験で得られた各環境条件下のCO₂収支量とCAM性とを比較検討した結果、CAM性が低下するのは明期のCO₂吸収が増大した時であり、それは多くの場合暗期のCO₂吸収量が減少した場合を伴っていた。CAM性が高く、また上述のように明期のCO₂吸収が不安定であるピタヤにおいては、暗期のCO₂吸収量が重要な役割を果たしている。そのため、ピタヤのCO₂収支量を改善するには、暗期のCO₂吸収を増加させる方向で制御することで物質生産の増加が望めるのではないか考えられる。

2. 沖縄におけるピタヤの栽培環境の改善について

本実験の結果、ピタヤのCERは環境条件によって大きく影響を受けた。その結果に基づき、沖縄県におけるピタヤ栽培環境と、その改善について考えてみる。まず、第1節の結果より、ピタヤの最適温度域は明暗期温度30/20°Cであり、一般的な植物よりも高いことが分かった。また、17/13°Cという温度条件ではCO₂収支量は大きく減少したことから、沖縄の冬の温度条件はピタヤにとって好適ではない。特に、1~2月にかけては気温が10度を下回る日もある。したがって、この時期のピタヤのCO₂吸収量は、大きく減少していると予想される。また、光強度については、600~800 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ においてCERが良好となった。パインアップルやランの最適光強度と比較すると、ピタヤの最適光強度は、同じ温度条件下ではランよりは高く、パインアップルよりは低い結果となった。ランではおよそ200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ （川満ら、1995）、パインアップルでは800~1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ （野瀬、1992）でCO₂収支量が飽和に達すると報告されている。また、ピタヤの茎部は発達段階によって適した光環境が異なり、未成熟茎は

成熟茎よりも最適光強度は弱かった。

これらの結果をふまえて沖縄県の栽培環境をみると、夏季は気温、光強度、共に十分であるが、冬季はピタヤの栽培に適しているとは言い難い。沖縄の冬季は日射量、温度、共に不足がちで、熱帯地方を原産とする作物や果樹類においてもマイナスの要素となっている。ピタヤは原生地の温度環境を好み沖縄の冬季はピタヤにとっては明らかに温度不足である。光環境は、第2節で示されたように、低い光強度下でも比較的高いCERと未成熟茎の生長に重点を置く際は、それほど大きな問題ではないと考えられる。一方、ピタヤは、一般的には、茎節を充分に伸長させた後、樹体頂部から茎を下垂させる栽培形態をとっているが、この下垂させた成熟茎においてのみ花芽を形成し、果実を結実させることができる。したがって、果実生産において重要な役割を占めるのは成熟茎である。そのため、成熟茎にとっては冬季の光環境は恵まれているとはいえず、その後の果実形成への影響も懸念される。

以上で述べたように、冬季の沖縄の気象はピタヤ栽培の大きな制限となっている。この問題を改善するには、光環境や温度といった環境条件を制御できる、施設内での栽培が望ましいと考えられた。本島内のピタヤの栽培農家は、ビニルハウス内で行っているところもあるが、露地栽培が主流となっている。そのため、現状では多くのピタヤが気象の影響を大きく受けていると考えられる。また、最近は本島北部地域で鳥による果実の食害が増えているため、気象環境だけではなく、他の栽培における問題点を低減するためにも有効な栽培方法ではないかと考えられた。

施設栽培を推薦するもう一つの理由は、ピタヤにおけるCO₂施用の可能性である。本実験で

は、第3節において、高CO₂濃度がピタヤのCERに与える影響を調査したが、ピタヤは高CO₂濃度下でCO₂収支量が増加する結果となった（表3-1, 3-2）。特に、弱光下、低温条件下における光合成増大が顕著であり、生育に不利な条件下のほうがCO₂施用効果は大きい結果となった。具体的には、最適条件である600 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ + 30/20°CでのCO₂収支量は298.2 mmol $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ だが、沖縄の冬季を考慮した200 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ + 17/13°Cという条件ではCO₂収支量は175 mmol $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ となり42%減少した。しかし、同じ条件でCO₂濃度を740ppmにするとCO₂収支量は240mmol $\text{m}^{-2}\text{day}^{-1}$ となり、減少分も20%程度にまで抑える効果があった。実際に生産現場に応用する際は、CO₂施用の時期や時間、濃度、施用方法、CO₂発生源の選択等が今後に残された問題である。

また、第4節ではピタヤの剪定茎の有効利用について述べた。上述のように、ピタヤは好適な環境下ではそのCERが高い。これを反映してか、夏季のピタヤ未成熟茎は生長が旺盛であり、適時剪定を行わないと過繁茂となってしまう。特に、ピタヤ果実を結実させるのは下垂させた成熟茎であり、未成熟茎はこの上に覆い被さるように上方向へと伸長を行うため、群落内部に侵入する太陽光を低減させる。また、未成熟茎を生長させつづけるとシンクとソースのバランスが崩れ、果実生産や品質に大きく影響を与える。そのため農家は常に、繁茂している未成熟茎の剪定作業を行う必要があるが、その発生量の多さと処理の困難さから、多くの労力がかかっているのが現状である。茎部を分析した結果から、ピタヤ茎部にはMg、Kなどの有用な成分が多く含まれていることが分かった。剪定した茎部は堆肥化する、もしくは炭化することによって栽培の際に施用することで、

再び土壤に還元することができ、資源の循環活用が成り立つと考えられた。

以上、本実験結果から得られた、沖縄のピタヤ栽培における改善についての考えを述べた。本実験で得られた光合成のデータは、短期間ににおける測定で得られたものであった。果樹は多年生であり、同じ植物体で、連年安定した収穫をすることが前提の栽培である。そのため、今回設定した環境条件が長期的に及ぼす影響については更なる検討が必要であると考えられる。また、CAM型光合成測定に用いた植物体は、植え付けてから日が浅く、測定した茎部も上に向かって栄養生長を行っている茎節であった。ピタヤは、上述のように、果実形成は下垂された茎部のみで行われる。上に向かって伸長している茎は下垂させることによって栄養生長から生殖生長に切り替わるためである（王、2000）。そのため、栄養生長を続けている茎部と、生殖成長期の茎部とではCERのパターンも変わってくるものと予想され、また適した環境条件も変わるものと予想される。また、剪定茎の有効利用についても、現在、食品としての利用の可能性など様々な方面から研究が行われているところであり注目も高まっている。

要 約

本研究の目的は、ピタヤのCAM型光合成特性を調べ、最適栽培環境を明らかにすることである。温度、光強度、CO₂濃度を種々組み合わせて設定し、各条件下におけるCER、気孔伝導度を連続測定した。得られた結果の概要は次のとおりである。

1. ピタヤのCERと気孔伝導度を連続測定した結果、CAM型光合成植物特有の日変化パターンであった。また、茎中に含まれる有機酸の内、リンゴ酸だけが暗期に上昇

し明期に減少する日変化を示した。これより、ピタヤはCAM型光合成植物である。

2. ピタヤのCERは温度によって大きく変動し、最も高くなる温度は30/20°Cで、17/13°Cでは著しく低下した。
3. ピタヤのCO₂収支量は光強度の上昇に伴い増加し、600~800 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ で定常値に達した。光強度に対するCER反応は茎の発達段階によって異なり、表皮が未発達な薄い未成熟茎は、成熟茎に比べて最適光強度域が低かった。
4. 異なる温度、光強度条件下でCO₂施肥を行ったところCO₂収支量は増加した。特に、弱光下、低温条件におけるCO₂収支量の増大が顕著であり、ピタヤの生育において不利な条件下のほうがCO₂施肥効果は大きかった。
5. ピタヤの栽培現場で発生している剪定茎の有効利用を検討するため、その無機成分含有量などを調査した結果、ピタヤの茎部にはMg、Ca、Kといった元素が多く含まれているとわかった。また、土壤に施用する資材とするため、茎部を用いて炭化物を生成した。結果としては、ピタヤの廃棄茎は炭化することで大きく減容できた。また、生成された炭化物にもKやMgといった有用な無機成分が多く含まれていたことから、廃棄されるピタヤ茎は堆肥化、もしくは炭化によって有効利用が望める可能性がある。
6. ピタヤの沖縄での栽培を考慮すると、冬季は温度と日射が不足するためピタヤの生育に不利である。しかし、高CO₂濃度によってCO₂吸収は回復したためCO₂施肥が有効な対策であると考えられる。特に、ピタヤのCO₂収支量は環境によって大きく影響されたことから、きめ細かな環境制御ができる

よう施設における栽培が望ましい。

謝 辞

本実験の遂行にあたり、実験材料としての苗を快く分譲いただき、栽培に関してご助言を戴いた安里農園の安里氏、平栄ファームの平良氏に深く感謝いたします。また、実験遂行にあたり多くのご協力を戴いた白川ファームの神谷氏に心から深く感謝を捧げる次第です。

また、作物学研究室で、実験遂行に当たって終始ご指導戴いた修士課程の宮城勝美氏に深く感謝申し上げます。そして実験にご協力戴いた4年次の安座間健氏、新垣裕子氏、佐々木海氏、四釜研之介氏、本論分の取りまとめにご協力戴いた3年次の新垣尚子、金城可南子、財部俊、徳原祐一、古川昇、前田圭一諸君に御礼申し上げます。

参考文献

1. Eran Raveh and Yosef Mizrahi 1998. Responses of two hemiepiphytic fruit crop cacti to different degrees of shade. *Scientia Horticulturae* 73:151-164.
2. Osmond, C. B. and W. G. Allaway 1978. Crassulacean acid metabolism: a curiosity in context. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 29:379-414.
3. 王群光 2000. ドラゴンフルーツのすべて。カミス。
4. Kluge, M and Ting, I. P. 1993. 砂漠植物の生理・生態。野瀬昭博訳。九州大学出版会。
5. 川満芳信 1996. 高CO₂濃度環境とC₃, C₄型光合成。生物環境調節。34:3-9.
6. 川満芳信・中山博之 1999. 高CO₂濃度がCAM型植物のガス交換速度とCO₂収支量に与える影響。琉球大学農学部学術報告。46:15-27.
7. 川満芳信・名嘉みつき 1995. 高CO₂濃度がファレノプシス（コショウラン）Crassulacean Acid Metabolismに及ぼす影響。琉球大学農学部学術報告。42:23-32.
8. 関塚史朗 1996. ファレノプレス系デンドロビウムのCAM型光合成に関する研究。沖縄農業試験場研究報告。第17号別冊。
9. 野瀬昭博 1979. CAM植物における光合成作用とその制御。農業技術。34:341-347.
10. 野瀬昭博 1986. パインアップルのCAM型光合成に関する研究。琉大農学報。33:1-70.
11. 野瀬昭博 1996. CAM型光合成の進化的側面。生物環境調節。34:97-104.
12. 野瀬昭博 1992. CAM型光合成の変異と制御。日作紀。61:161-171.
13. Nobel, P. S. and P. M. Drennan 2000. Responses of CAM species to increasing atmospheric CO₂ concentrations. *Plant Cell and Envir.* 23:767-781.
14. Nobel, P. S. and Eran Raveh 1995. CO₂ uptake and fluorescence for a shade-tolerant cactus *Hylocereus undatus* under current and doubled CO₂ concentrations. *Physiol. Plant.* 93:505-511.
15. Nobel, P. S. and E. A. Graham 1996. Long-term effects of a doubled atmospheric CO₂ concentration on the CAM species *Agave deserti*. *J. Exp. Bot.* 47:61-69.
16. Nobel, P. S. and E. A. Graham 2005. Daily changes in stem thickness and related gas exchange patterns for the hemiepiphytic cactus. *Inter. J. of Plant Sciences.* 166:13-20.

17. Nobel, P. S. and De la Barrera E. 2002c. High temperatures and net CO₂ uptake, growth, and stem damage for the hemiepiphytic cactus, *Hylocereus undatus*. *Biotropica* 34:225-231.
18. Nobel, P. S. and De la Barrera E. 2004. CO₂ uptake by the cultivated hemiepiphytic cactus, *Hylocereus undatus*. *Ann. Appl. Biol.* 144:1-8.
19. 山本宗立・井上裕嗣 2004. 沖縄におけるドラゴンフルーツのアイソザイム分析. 热帶農業. 48(別2):115-119.
20. 井上裕嗣・栗国佳史 2001. ピタヤ果実の特性. 热帶農業. 45(別2):7-8.
21. 神奈川県農政部農業技術課(農業総合研究所農業環境部) 1997. 未利用資源堆肥化マニュアル(堆肥化システム推進事業・研究開発事業まとめ).
22. 久保倉博一 2004. 剪定枝堆肥化物を用いた段ボールコンポスト法による宅配弁当食べ残しの堆肥化に関する研究. 福岡市保健環境研究所報. 29:90-94.
23. 和歌山県農林水産総合技術センター農業試験場環境保全部 2000. 廃棄クズ柿の堆肥化方法と製造堆肥の品質.