

パッションフルーツ (*Passiflora edulis*) における高品質果実安定
生産のための最適環境条件解明に関する研究

Studies on the elucidation of optimal environmental conditions for
stable high-quality fruits production of passion fruit (*Passiflora edulis*)

島田 温史

2017

目 次

序 論	1
第1章 温度がパッションフルーツの光合成特性に及ぼす影響	8
第2章 パッションフルーツにおける成熟期の温度と果実品質との関係	20
第3章 遮光処理がパッションフルーツの樹体生育および果実品質に及ぼす影響	36
第4章 水管理がパッションフルーツの樹体生育および果実品質に及ぼす影響	58
第5章 総合考察	83
要 約	90
謝 辞	93
引用文献	94
Summary	110

序 論

パッションフルーツ (*Passiflora edulis* Sims) はトケイソウ科トケイソウ属のつる性多年生草本である。トケイソウ科は 12 属約 600 種が知られているが、食用として栽培されている種は 10 種程度である (米本, 2009)。中南米諸国ではオオミノトケイソウ (*P. quadrangularis* L.), ミズレモン (*P. laurifolia* L.) およびバナナパッションフルーツ (*P. mollissima* (HBK) Bailey) がある程度流通しているが、世界的に栽培され流通している種は、ムラサキクダモノトケイソウ (*P. edulis* Sims), キイロクダモノトケイソウ (*P. edulis* f. *flavicarpa* Deg.) および両者の交雑種だけである (Nakasone・Paull, 1998)。ムラサキクダモノトケイソウは比較的果実が小さく、成熟すると果皮が紫色を呈する。果汁は糖度が高く、酸含量は低く、香りは強い。キイロクダモノトケイソウはムラサキクダモノトケイソウより生育旺盛で、花および果実ともに大きい。果実は成熟すると果皮が黄色を呈する。果汁の糖度はムラサキクダモノトケイソウと差はないが、酸含量が高い。交雑種は果皮が赤紫色を呈し、果汁は両者の中間の形質を呈する (石畑, 2000a)。パッションフルーツの原産地はブラジルのアマゾン川流域からパラグアイ、アルゼンチン北部にかけてであり、ムラサキクダモノトケイソウは熱帯地域の標高の高い地方や冬季温暖な温帯地方に分布、栽培されている。一方、キイロクダモノトケイソウは熱帯や亜熱帯低緯度地方の低地で栽培されている。現在の主産地はブラジルやコロンビアなどの南米諸国、東南アジア、オーストラリアなどの熱帯から亜熱帯地域である。地域によって名称が異なり、ブラジルでは maracuja, マレーシアでは markisa, ハワイでは lilikoi などと呼ばれている (Bora・Narain, 1997; Nakasone・Paull, 1998)。

パッションフルーツは明治中期に日本へ導入され、鹿児島県へは 1923 年に導入された。無霜地帯での栽培が好ましいため、日本では鹿児島県、沖縄

県，小笠原諸島など亜熱帯地域を中心に栽培されている．鹿児島県は，2013年の収穫量が260トンと我が国の収穫量414トンのうち約63%を占め，栽培面積も38haと我が国の栽培面積63haのうち約61%を占める最大の生産地である（鹿児島県農政部農産園芸課，2016）．パッションフルーツは挿し木繁殖が可能であることや定植1年目から果実が収穫可能であること，作業の負担が少ないことなどから高齢者や女性でも栽培が容易である．また，生果用としての需要も伸びており，現在単価が約1,000円/kgと高く，ジュースやジャムなど加工品にも重宝されることから収益性も高い．そのため近年，鹿児島県や沖縄県などの亜熱帯および西南暖地だけではなく，岐阜県や三重県，千葉県，東京都八王子市など秋冬季に低温となる地域でも栽培され，全国的に注目され始めている．

しかし，パッションフルーツは熱帯高地原産であるため，夏季の高温条件下での栽培では種々の問題が発生する．パッションフルーツの花芽は日長が11時間以上で昼温が25℃，夜温が20℃の条件で安定的に分化し，気温が30℃以上になると花蕾が発達せず，開花に至らない（Chang・Cheng，1992）．そのため，日本では夏季の高温時に開花，結実しない．また，ムラサキクダモノトケイソウ（*P. edulis* Sims var. *edulis*）では昼温33℃，夜温28℃の高温により果汁量が減少し糖度が低下する（Utsunomiya，1992）．また，鹿児島県の推奨品種である‘サマークイーン’（*P. edulis* × *P. edulis* f. *flavicarpa*）および‘ルビースター’（*P. edulis* × *P. edulis* f. *flavicarpa*）では，夏季の高温時に着色が不完全なまま落果するなどの現象も観察されている．日本でのパッションフルーツ栽培はハウス栽培が主流であるため，夏場にはハウス内温度が40℃前後まで上昇する．そのため，近年の地球温暖化による影響でさらに高温障害が問題となってくると思われる．今後パッションフルーツの栽培地域を拡大していくためには，樹体生育および果実生産における最適環

境条件を解明し、高品質果実安定生産のための栽培管理法を確立することが必須である。

植物の健全な成長や果実の安定生産のためには、光合成によって炭水化物を十分に生産することが必要である。植物は種、品種ごとに光合成に最適な温度条件が異なる。アーモンドでは 28℃，リンゴでは 20℃，イチジクでは 26℃，ブドウでは 27℃，オリーブでは 24℃，モモでは 21℃，ナシでは 23℃，カンキツでは 25℃～30℃前後が光合成に最適な温度とされる（Higgins ら，1992；岩崎・大垣，1985）。いずれの種，品種においても適温以上の高温では光合成速度が低下する（Higgins ら，1992；岩崎・大垣，1985）。高温による光合成速度の低下は光合成産物である炭水化物を不足させ，樹体生育や果実収量，果実重，糖度を低下させる（後藤ら，2005；Higuchi ら，1998，1999；高垣ら，1993）。トマトでは高温条件下で，果実収量と光合成速度，蒸散速度および気孔コンダクタンスとの間に正の相関があるとされており（Nkansah・Ito，1994），高品質果実の安定生産を行う上で温度と光合成特性との関係解明は重要であるが，パッションフルーツでは解明されていない。

光合成速度や蒸散速度などのガス交換測定以外の方法で光合成特性の解明に利用されている方法としてクロロフィル蛍光測定がある。これは，光化学系 II で行われる光化学反応により放出されるクロロフィル蛍光を利用することによって光合成能力を評価する方法である。このクロロフィル蛍光測定は，ガス交換測定と組み合わせることにより，光合成全体の反応や能力を総合的に評価することができる最も有効な測定技術の一つ（牧野，2009）で，高温耐性（Camejo ら，2005；Greer，2015；Yamada ら，1996b）や低温耐性（Equiza・Francko，2010；Zhang ら，2011），塩ストレス（Yuan ら，2014；Zushi・Matsuzoe，2017）の評価など様々な耐性やストレスの指標として用いられている。パッションフルーツでは，遮光処理下での光合成能力の品種

間差異（Pires ら，2011）や同一種における光合成特性の品種間差異（Gama ら，2013）などが研究されている．しかしながら，ガス交換とクロロフィル蛍光を組み合わせることによる温度反応の評価は研究されていない．そのため，温度と光合成特性との関係を解明することは，パッションフルーツ栽培時の最適な温度環境の解明に寄与すると思われる．

我が国のパッションフルーツ栽培では主に 6 月下旬頃～8 月中旬頃に収穫する夏実と，11 月下旬～1 月に収穫する冬実の 2 種類が生産される（鹿児島県園芸振興協議会，2015）．夏実は高糖度および低酸度で食味良好であるが，高夜温（30℃）により果皮の着色が不良となり，糖度の低下により糖酸比が低下する（Kozai ら，2007）．多数の果樹や果菜類では成熟期の高温により着色不良や糖度の低下が発生する（後藤ら，2005；宇都宮ら，1982；山田ら，1988）．さらにトマトでは高温条件（昼温 32℃以上，夜温 28℃以上）で栽培した果実の色素形成能力が品種によって異なることが報告されている（城島・松添，1994）．鹿児島県の推奨品種である‘サマークイーン’は同じく推奨品種である‘ルビースター’よりも夏季の高温期に果実が着色不良のまま落果するなどの高温障害が多いとされ，品種間で高温に対する反応が異なる．

一方，低温期の生産となる冬実はクエン酸合成酵素活性が成熟中常に高く，減酸が進まない（石本ら，2007）．また，5.5～7℃の低温はオフフレーバーという果実本来の香りを無くし異臭を発生させる障害を引き起こす（邨田，1980）．そのため，冬実は高酸度および低糖酸比となり，果実の香気成分が夏実よりも減少し，食味も悪くなる（Goldenberg ら，2012）．ウンシュウミカンでは低温（15℃）により糖度の増加および減酸が抑制される（宇都宮ら，1982）．マンゴーにおいても低温によりヘプタノールなどが新たに生合成されることで果実のオフフレーバーが発生する（Shivashankara ら，2006）．パ

ッションフルーツは前述の通り、秋冬期に低温となる地域でも栽培され始めている。これらの地域では、冬の寒さによりパッションフルーツが枯死するため、一部の果実を成熟する前に収穫している地域もある。今後これらの地域で栽培する場合、高温だけではなく低温がパッションフルーツの果実品質に及ぼす影響についても考慮する必要がある。これらのことから、パッションフルーツ栽培においては高温だけでなく低温でも問題が生ずるため、高品質果実の生産のためには、果実の成熟期における最適温度を解明することが不可欠である。

植物の生育や果実の発育・成熟には光の量も大きく影響する。一般に、低光量下では光合成能力の低下により炭水化物が不足し、開花・結実が抑制され、果実収量や糖度が低下し、酸度は増加する(Kim ら, 2011; Mataa・Tominaga, 1998; Nkansah ら, 1996; 鈴木ら, 1975; Zhu ら, 2012)。パッションフルーツにおいても、遮光により花芽形成や開花が抑制され、植物体の乾物重や無機成分も低下する(Menzel・Simpson, 1988)。加えて、極端な遮光(遮光率90%以上)により花器の雌性器官に異常を起こすこと(比屋根ら, 2010)や糖度および果皮のアントシアニン含量が低下すること(宇都宮ら, 2005)が報告されている。そのため、パッションフルーツ栽培においても光の確保が重要であるが、夏季の強光条件下では高温による果実の着色不良などの問題が観察されている。そのため、高温対策が喫緊の課題となっている。遮光処理は商品果率の向上(Wada ら, 2006)や果実の日焼け防止(Lee ら, 2015)など高温・強光対策として有効な手段であるが、光合成に必要な光を制限してしまうため、光合成能力や収量、果実品質を低下させるというマイナス面も持ち合わせている(松浦・荒木, 1995; Sharma ら, 2006)。近年、ブドウ、メロンおよびトマトでは熱線(赤外光)を遮蔽する遮光ネットを用いた結果、気温や葉温を低下させ、果実収量や果皮の着色、糖度を向上させたと

いう報告がある（釘宮ら，2011；Murakami ら，2017；吉田・佐藤，2012）．このことから，パッションフルーツにおいても赤外光を遮蔽する遮光ネットを用いることで，気温や葉温の上昇を防ぎ，高温障害を緩和できる可能性がある．それに加えて，赤外光は避陰反応を誘発する（瀧澤，2008）とされ，赤外光を遮蔽することで遮光による生育阻害の軽減が可能であると思われる．

パッションフルーツの夏実収穫は6月下旬から8月中旬頃まで続く（鹿児島県園芸振興協議会，2015）が，梅雨時期は土壌が過湿になる傾向がある．過湿条件下では立枯症や円斑病などの病気が樹体や果実に発生しやすく（石畑，2000b），根腐れも発生し，樹体生育は抑制される（Roan・Cheng，1986）．一方，パッションフルーツは浅根性であるため，梅雨明け以降の高温，強光による土壌の乾燥の影響を受けやすく，新梢先端や果実の萎縮が観察され（米本，2009），乾燥ストレスにより樹体生育や花芽形成が抑制され，結実率が低下する（Menzel ら，1986；Staveley・Wolstenholme，1990）．そのため，最適な土壌水分環境を解明する必要がある．多くの作物では土壌の乾燥や過湿により樹体生育や光合成速度が抑制され，果実収量や糖度が低下し酸度が増加する（天野ら，1995；熊代・建石，1967；Marsal ら，2000；Morales ら，2013；Silber ら，2012）．しかし，カンキツやブドウでは乾燥させる時期や強度を変えることによって糖度やアミノ酸，揮発性成分の増加による品質向上も可能である（El-Ansary・Okamoto，2007；今井ら，1991；岩崎ら，2011a；佐々木，2002；鈴木ら，1969）．ナスでは土壌水分が高くなるほど樹体生育および収量が向上するとされている（鐘・加藤，1988）．これらのように，それぞれの作物によって最適な土壌水分環境は異なる．Macha ら（2006）は沖縄県石垣市において，冬期の昼温 27.3℃，夜温 20.7℃ならびに高い土壌水分（平均 18%）が，パッションフルーツ果実の酸含量を低下させたことを

報告している．しかし，我が国におけるパッションフルーツの栽培は春から夏の高温期間で生育が旺盛な時期であり，この時期の栽培に最適な土壤水分環境は解明されていない．高温期間の最適な土壤水分環境を解明することは，今後のパッションフルーツ栽培管理法の確立ならびに高温対策の一助となる可能性がある．

そこで本研究では，パッションフルーツにおける高品質果実安定生産のための最適環境条件解明を目的とし，温度，光および土壤水分が樹体生育および果実品質に及ぼす影響について検討した．まず第 1 章では，鹿児島県の推奨品種である‘サマークイーン’および‘ルビースター’を用いて，温度と光合成特性との関係を明らかにするため，異なる光，温度条件下での光合成速度，蒸散速度，気孔コンダクタンスおよび暗呼吸速度を測定した．さらに，高温条件下でのクロロフィル蛍光特性を測定し，高温がパッションフルーツの光合成特性に及ぼす影響およびその品種間差異を明らかにした．第 2 章では，パッションフルーツにおける高品質果実を安定生産するための知見を得ることを目的に，‘サマークイーン’および‘ルビースター’における成熟期の温度と果実品質との関係を検討した．第 3 章では，パッションフルーツ栽培における樹体生育および果実品質への高温障害を緩和するため，赤外光を遮蔽する遮光ネットを用いて，種々の程度の遮光処理がパッションフルーツの樹体生育および果実品質に及ぼす影響について検討した．第 4 章では，パッションフルーツ栽培における適切な土壤水分環境を解明し，高品質果実の安定生産技術を確立するため，土壤に種々の湿潤処理および乾燥条件処理を行い，それがパッションフルーツの樹体生育および果実品質に及ぼす影響について検討した．最後に第 5 章では，本研究の結果から明らかとなった最適な温度，光および土壤水分条件について総合的に考察し，パッションフルーツにおける高品質果実の安定生産のための栽培管理法を示した．

第1章 温度がパッションフルーツの光合成特性に及ぼす影響

緒 言

光合成は、植物の生育のために必要不可欠な反応であり、それにより植物は光合成産物である炭水化物を得て成長している。そのため、健全な植物体や高品質果実の安定生産のためには植物がその光合成能力を十分に発揮できることが必須である。また、植物は種、品種それぞれで光合成に最適な温度条件があり、適温以上の高温条件下では光合成能力が低下する（Higgins ら、1992；岩崎・大垣、1985）。その結果、樹体生育が抑制され、果実品質や収量が低下するとされている（Higuchi ら、1998, 1999；Nkansah・Ito, 1994）。そのため、高品質果実の安定生産を行う上で温度と光合成特性との関係解明は重要な課題である。ガス交換測定以外で光合成特性の解明に利用されている方法としてクロロフィル蛍光測定がある。これは、光化学系 II で行われる光化学反応により放出されるクロロフィル蛍光を利用することによって光合成能力を評価する方法である。クロロフィル蛍光測定はガス交換測定と組み合わせることにより、光合成全体の反応や能力を総合的に評価することができ、植物のストレスや生理障害の評価（Greer, 2015；Yamada ら、1996b）にも用いられている。

パッションフルーツは熱帯高地原産であるため、夏季の高温期に開花、結実や着色不良などの高温障害が観察される。また、‘ルビースター’よりも‘サマークイーン’で高温障害がより多く発生することから、両品種間で温度反応が異なる可能性が考えられる。温度反応の品種間差異は、数多くの野菜や果樹などで光合成特性の比較によって明らかにされている（Guo ら、2006；佐藤ら、2002；Xu ら、2014）。パッションフルーツにおいても、光合成特性に最適な温度条件を解明するとともに品種間差異も明らかにする

ことが可能であると考えられる。

そこで本研究では、パッションフルーツの温度と光合成特性との関係を明らかにするため、‘サマークイーン’および‘ルビースター’を用いて、異なる光、温度条件下での光合成速度、蒸散速度、気孔コンダクタンスおよび暗呼吸速度を測定した。さらに、高温条件下でのクロロフィル蛍光特性を測定し、高温がパッションフルーツの光合成特性に及ぼす影響を検討し、両品種間における温度反応の違いも評価した。

材料および方法

1. パッションフルーツ‘サマークイーン’および‘ルビースター’の光合成特性

鹿児島大学農学部附属農場唐湊果樹園（鹿児島県鹿児島市）加温ビニルハウス植栽のパッションフルーツ‘サマークイーン’および‘ルビースター’の鉢植え樹（9号鉢）を供試した。測定部位は先端の完全展開葉から15～20枚目の葉とし、測定は2015年9月の晴天日の9～13時（平均気温30.6℃）に携帯型光合成蒸散測定装置（LCpro+, ADC Bioscientific）を用いて行った。測定時間は約1～2分とした。

異なる光条件下での光合成特性を測定するため、光合成有効光量子束密度（PPFD）を0, 100, 200, 300, 500, 700, 900, 1,200および1,500 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ と設定し、チャンバー温度28℃, CO₂濃度380 ppm, 流量200 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ の条件で測定した。

異なる温度条件下での光合成特性を測定するため、チャンバー温度を20, 25, 30, 35および40℃と設定し、さらに明条件（PPFD：1,200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）および暗条件（PPFD：0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）も設けた。CO₂濃度および流量は前述の条件で測定した。

2. パッションフルーツ‘サマークイーン’および‘ルビースター’におけるクロロフィル蛍光の高温反応特性

鹿児島大学農学部附属農場唐湊果樹園加温ビニルハウス植栽のパッションフルーツ‘サマークイーン’および‘ルビースター’鉢植え樹を供試した。‘サマークイーン’は2012年8月～9月に，‘ルビースター’は2013年8月～9月に先端の完全展開葉から15～20枚目の葉を採取し，葉片を湿らせたろ紙とともにアルミホイルで包んで35，40および45℃に設定した恒温インキュベーター内に入れ，15，30，45，60，90および120分間静置した。静置後，2次元イメージングクロロフィル蛍光測定器（Handy FluorCam 701MF，PSI）を用いて解析を行い，クロロフィル蛍光のパラメーターとして用いられる電子伝達の実効量子収率 $[\Phi_{II} = (F_m' - F_s) / F_m']$ ，光化学系IIの最大量子収率 $[F_v / F_m = (F_m - F_o) / F_m]$ ，光化学消光 $[qP = (F_m' - F_s) / (F_m' - F_o')]$ ，非光化学消光 $[NPQ = (F_m - F_m') / F_m']$ を求めた。この一連の計算は使用した測定器で自動的に行われた。また，測定時は室温（27℃）で測定器に暗幕をかけ暗黒条件下にした。

3. 統計分析

得られたデータは，処理による有意な影響の有無を一元配置の分散分析により確認し，Tukeyの多重検定により統計解析を行った。

結 果

1. パッションフルーツ‘サマークイーン’および‘ルビースター’の光合成特性

‘サマークイーン’および‘ルビースター’の異なる光強度での光合成速度は，両品種とも $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ まで一気に増加し，その後 $300 \sim 1,500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ まで緩やかに増加した。‘サマークイーン’は $1,200 \sim 1,500$

$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, ‘ルビースター’は約 $1,200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ で最大となった (第 1-1 図).

‘サマークイーン’および‘ルビースター’における種々の温度条件下での光合成特性について第 1-2 図に示した. ‘サマークイーン’の見かけの光合成速度は 30°C まで上昇し, 35°C 以上では著しく低下した. 一方, ‘ルビースター’では $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ まではほぼ一定であり, 35°C 以上では徐々に低下した (第 1-2 図 A, B). ‘サマークイーン’の真の光合成速度は, 見かけの光合成速度と同様の傾向を示した. しかし, ‘ルビースター’では 35°C 以上でもあまり低下しなかった (第 1-2 図 A, B). 蒸散速度は, 暗条件下では両品種ともに同じ反応を示し, 温度が高くなるにつれ増加した. しかし, 明条件下では反応が異なり, ‘サマークイーン’では 35°C と 40°C に差はなかった. 一方, ‘ルビースター’では 35°C より 40°C で著しく上昇した (第 1-2 図 C, D). 気孔コンダクタンスには, 両品種とも温度反応に一定の傾向は認められなかった (第 1-2 図 E, F). 暗呼吸速度は, ‘サマークイーン’で $20\sim 40^{\circ}\text{C}$ にかけて上昇したが, ‘ルビースター’では 30°C までは一定で, その後 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ にかけて上昇した (第 1-2 図 G, H).

2. パッションフルーツ ‘サマークイーン’ および ‘ルビースター’ におけるクロロフィル蛍光の高温反応特性

‘サマークイーン’の NPQ 以外のクロロフィル蛍光のパラメーターは, 処理 60 分後までは温度が高くなるにつれ減少もしくは低下した (第 1-3 図). ΦII は 35°C では, 処理 120 分後まであまり変化せず, 40°C では徐々に減少した. 45°C で処理 60 分後まで著しく減少し, その後ほぼ一定で推移した. Fv/Fm は 35°C で処理 120 分後まで高い値を維持したが, 40°C では徐々に低下し, 45°C では著しく低下した. qP は 35°C で処理 30 分後までわずかに減少し, その後は変化しなかった. 40°C では処理 45 分後まで, 45°C で処理 60 分後まで

減少した．その後は処理 120 分後まで一定で推移した．NPQ は 35℃で処理後徐々に上昇した．40℃では処理 15 分後まで上昇し，その後処理 120 分後までやや低下した．一方，45℃では処理 15 分後から 120 分まで著しく低下した．

‘ルビースター’の Φ_{II} はいずれの温度でも処理 15 分後までわずかに減少し，その後は一定の値で推移した（第 1-4 図）．Fv/Fm は 35℃および 40℃で処理 120 分後まで一定で推移したが，45℃では処理 45 分から 60 分後にかけて低下し，その後はあまり変化しなかった．qP は 35℃で処理 120 分後まで一定で推移した．40℃では処理 45 分後までは減少したが，それ以降回復した．45℃では処理 15 分後まで減少しその後はあまり変化しなかった．NPQ は 35℃および 40℃で処理 15 分後まで著しく上昇し，その後は一定で推移した．45℃では処理 45 分後まで徐々に上昇し，それ以降は変化しなかった．また，45℃は 35℃および 40℃と比べ常に低い値で推移した．

考 察

‘サマークイーン’および‘ルビースター’の光合成速度は，両者とも $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ まで一気に増加し，その後は $1,500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ までわずかに増加した．両品種とも最大光合成速度は約 $1,200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の時に観察された（第 1-1 図）．光合成速度が $500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ まで一気に増加するのは C_3 植物の特徴である．一方， C_4 植物の場合は $1,000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ まで増加を続けるため（Ye ら，2013），パッションフルーツは C_3 植物であることが確認できた．

光合成速度に及ぼす温度の影響は，‘サマークイーン’と‘ルビースター’で大きく異なった．‘サマークイーン’は，見かけの光合成速度と真の光合成速度がともに 30℃で最大となった．‘ルビースター’では，見かけの光

合成速度は 35℃以上で徐々に低下したが、真の光合成速度はあまり低下しなかった（第 1-2 図 A, B）。暗呼吸速度は、両品種とも 30～40℃にかけて上昇した（第 1-2 図 G, H）。‘サマークイーン’の見かけおよび真の光合成速度は高温の影響を受けたが、‘ルビースター’の真の光合成速度は高温の影響をあまり受けなかった。カンキツ（岩崎・大垣, 1985）やブドウ（白石ら, 1996）では同一種の異品種間で温度に対する光合成速度に差異が現れることが報告されており、パッションフルーツでもそれらと同様であった。

蒸散速度および気孔コンダクタンスは、‘サマークイーン’よりも‘ルビースター’で高く、特に 35℃以上の蒸散速度が顕著に高かった（第 1-2 図 C, D, E, F）。蒸散能は高温耐性に関係するとされており、トウガラシ属では高温下での蒸散能が高いと高温耐性が強いとされている（高垣ら, 1993）。

‘ルビースター’の 35℃以上での蒸散速度は‘サマークイーン’よりも高く、気孔コンダクタンスも‘サマークイーン’よりも高かった。高い蒸散能は葉温の低下を促し、‘ルビースター’における高温下での光合成速度を維持している要因であると考えられた。

‘サマークイーン’および‘ルビースター’の光合成特性が 35℃以上で大きく異なったことから、その理由を詳細に解明するため、35℃以上でのクロロフィル蛍光特性について検討した。クロロフィル蛍光特性は‘サマークイーン’と‘ルビースター’で大きく異なった。 Φ_{II} はクロロフィル蛍光のパラメーターが低下や上昇することによって値が変化し、光合成全体の影響が反映される。そのため、 Φ_{II} が減少した場合、光合成電子伝達に何らかの異常があるとされ、その減少には、 F_v/F_m の低下、 qP の減少、 NPQ の上昇が関わってくる。 F_v/F_m が低下した場合、光化学系 II の最大量子収率および機能の低下、 qP が減少した場合、シトクロム b_6/f 複合体や光化学系 I, 炭酸固定系などの光化学系 II の下流に存在するコンポーネントの機能の喪失、

NPQ が上昇した場合、熱放散系エネルギーの上昇を示すと言われている（園池，2009）．‘サマークイーン’では，35℃で qP がわずかに減少し，NPQ は上昇した．このことから 35℃では熱放散系と光化学系 II の下流に軽い障害を受けている可能性が考えられた．40℃では Fv/Fm も低下したことから，光化学系 II 自体も障害を受け始めたものと思われた．45℃では Φ_{II} , Fv/Fm, qP および NPQ のいずれのパラメーターも顕著に減少もしくは低下したため，光化学系が大きく障害を受けていることが推察された．また，NPQ は 45℃において処理 15 分後で急激に上昇し，その後低下した．シロイヌナズナでは NPQ が 40℃の高温処理で急激に上昇し，40℃を超えると急激に低下することが報告されている（Shao ら，2007）．さらに，NPQ はキサントフィルサイクルに関わり，ゼアキサニンが蓄積することによりクロロフィルから受け取ったエネルギーを安全に熱に消去し，過剰なエネルギーを消去する安全弁として働く（園池，2007）．これらのことから‘サマークイーン’においては，40℃まで過剰なエネルギーを熱放散することで光化学系 II の障害を緩和しているが，45℃になると高温ストレスにより熱放散できなくなり緩衝効果が働かなくなる可能性が考えられた．一方‘ルビースター’では，いずれの処理区においても NPQ が上昇した．このことから高温により光化学系 II に障害を受けている可能性が考えられたが，常に高い熱放散能を有していたことから過剰なエネルギーを効率良く熱として消去していたと思われる．また，45℃では Fv/Fm が低下したが， Φ_{II} はほとんど減少しなかったため光化学系への影響はあまりなかったと推察された．同一種の品種間で高温ストレスに対するクロロフィル蛍光特性が異なることは，落葉果樹であるラズベリー（Molina-Bravo ら，2011）やマンゴー，リュウガン等の熱帯果樹（Yamada ら，1996a）などでも知られている．‘ルビースター’は常に NPQ が高く維持されたことから，‘サマークイーン’よりも過剰なエネルギーを

効率よく熱放散することができると考えられた。

以上のことから，‘サマークイーン’および‘ルビースター’の光合成特性に品種間差異が存在し，特に高温での反応に大きな違いが確認された。

‘サマークイーン’では高温による著しい障害が確認された。この光化学系の障害の要因としては，調査したいずれのクロロフィル蛍光のパラメーターも減少もしくは低下したことが考えられ，これが光化学系の機能や光合成速度を低下させた可能性がある。一方，‘ルビースター’では蒸散能およびNPQが高温でも高く維持され，過剰なエネルギーを効率良く熱放散していた。そのため，高温による障害を軽微にできたと考えられた。

以上のように，‘サマークイーン’は高温ストレスに敏感であり，‘ルビースター’よりも光合成の適温範囲が狭かった。しかしながら，光合成の適温は両品種とも 30℃以下であり，健全な栄養成長や高品質果実生産のためには 30℃以上とならないような栽培環境が望ましい。ハウス内の気温，植物体の温度や地温を下げる技術として，遮光 (Lee ら, 2015; Wada ら, 2006)，根域冷却 (木下ら, 2012)，細霧冷房 (Harel ら, 2013; Hu ら, 2009) やウォーターカーテン (岩崎ら, 2011b) などがある。パッションフルーツ栽培においてもこれらの技術を適用することで，高温が原因で起こる夏季の未開花や着色不良などの問題を解決できる可能性がある。

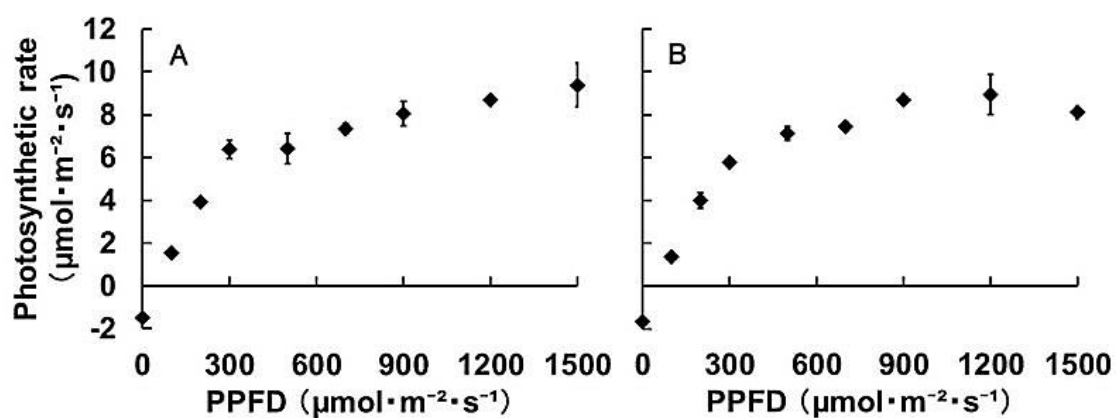


Fig. 1-1. Effect of light intensity on the photosynthetic rate of the passion fruit ‘Summer Queen’ (A) and ‘Ruby Star’ (B). Data are presented as means \pm SE ($n = 3$). Chamber temperature: 28°C, CO₂ concentration: 380 ppm, air flow: 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$.

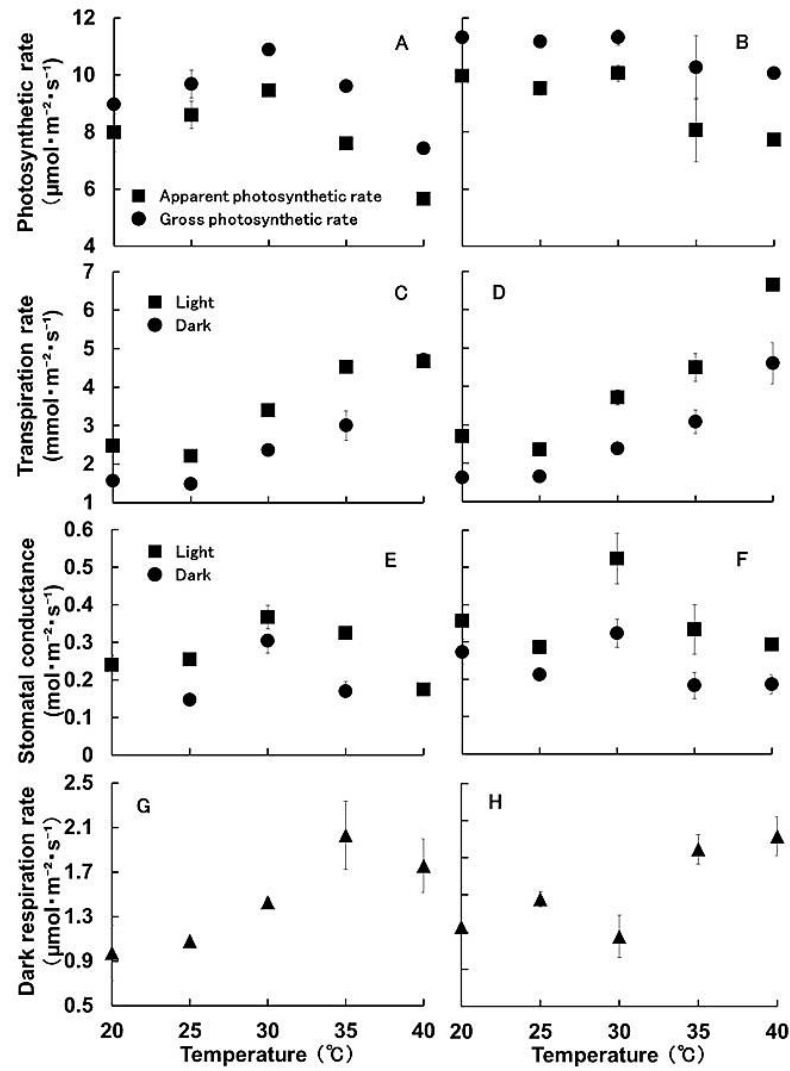


Fig. 1-2. Effects of temperature on the photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance, and dark respiration rate of passion fruit ‘Summer Queen’ (A, C, E, and G) and ‘Ruby Star’ (B, D, F, and H). Data are presented as means \pm SE (n = 3). PPFD: 1200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, CO_2 concentration: 380 ppm, air flow: 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$.

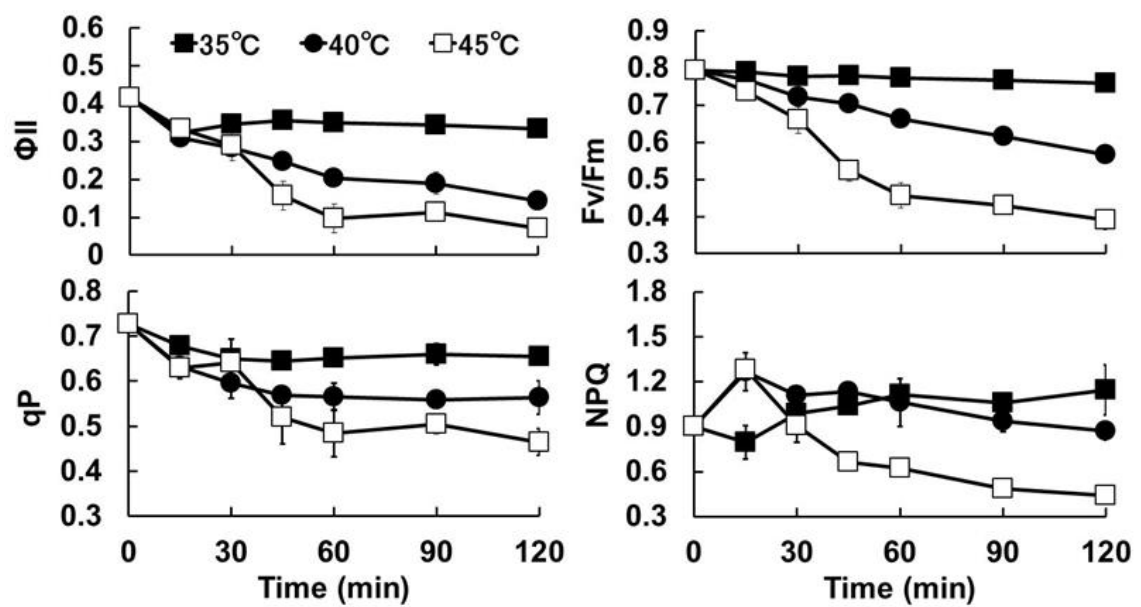


Fig. 1-3. Effects of high-temperature treatments on the chlorophyll fluorescence characteristics of the passion fruit 'Summer Queen'. Data are presented as means \pm SE (n = 3).

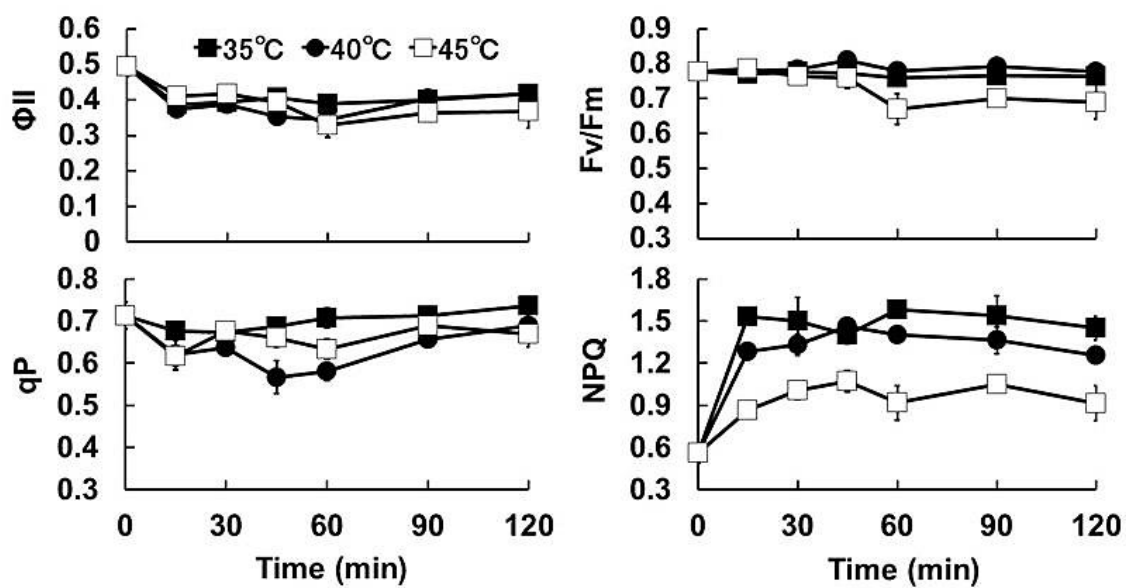


Fig. 1-4. Effects of high-temperature treatments on chlorophyll fluorescence characteristics of the passion fruit 'Ruby Star'. Data are presented as means \pm SE (n = 3).

第2章 パッションフルーツにおける成熟期の温度と果実品質との関係

緒 言

果実は成熟するにしたがって糖の増加，減酸，果肉の軟化，芳香の発現や着色の進行などさまざまな生理的变化を起こし，成熟時にはそれぞれの果実に特有の風味を発現する（中野，2015）．多くの果樹では，成熟期の温度条件によって果皮の着色や果汁成分が変化する．ウンシュウミカンにおいては，低温（15℃）で果実の糖の増加や減酸が抑制されるが，果皮の着色は良好である．しかし，高温（30℃）では減酸が促進されるものの，クロロフィルの分解とカロテノイドの蓄積が抑制され果皮の着色が不良である（宇都宮ら，1982）．ブドウでは，成熟期における果皮の着色の最適温度は15～25℃とされ，30℃以上の高温になるとアントシアニン合成関連酵素活性が抑制され，果皮のアントシアニンの蓄積が抑制される（森ら，2004）．これらのことから，果実の成熟期における温度は，果皮の着色や果汁成分に大きく影響するため，高品質果実生産を図るうえで極めて重要な要因である．

第1章ではパッションフルーツにおける温度と光合成特性との関係について検討し，光合成に最適な温度条件を解明し，その品種間差異も解明した．そこで，本章では前章で供試した‘サマークイーン’および‘ルビースター’を用いて，高品質果実を安定生産するための知見を得るため，パッションフルーツにおける成熟期の温度と果実品質との関係を詳細に検討した．

材料および方法

1. 植物材料の育成

鹿児島大学農学部附属農場唐湊果樹園（鹿児島市）の無加温ビニルハウスで生育させたパッションフルーツ‘サマークイーン’（*P. edulis*×*P. edulis* f.

flavicarpa) および ‘ルビースター’ (*P. edulis*×*P. edulis* f. *flavicarpa*) の 2 年生挿木苗を供試した．2014 年 4 月に挿し木を行い，2014 年 9 月に黒土，ぼら土細粒，ぼら土中粒，バーミキュライト，牛糞堆肥，バーク堆肥，苦土石灰およびようりん＝5：1：1：1：1：1：0.025：0.025 とチアメトキサム粒剤（シンジェンタジャパン（株））少量を混用した用土を充填した 9.6 L ポリ鉢に移植し，一本仕立てで生育させた．2015 年 2 月に 20 L プラスチック鉢に再度移植し，高さ約 1.8 m，直径約 60 cm の行灯仕立てで，1 周したところで主茎頂を摘心した．摘心後，腋芽から発生した枝を垂らして結果枝とした．着果量は 1 結果枝当たり最大 6 果までとした．なお，発生した結果枝の腋芽は適宜除去し，地面に着きそうになった結果枝は摘心した．灌水は地表面が乾いた時に行った．施肥は緩効性肥料（尿素複合バーディラージ，ジェイカムアグリ（株））（10-10-10）を $20\text{kg} \cdot 10\text{a}^{-1}$ として，1,000 倍希釈した液体肥料（タンクミックス A・B，OAT アグリオ（株））（A：B＝1：1）も週 1 回 3 L を灌水の代わりに与えた．施用した液体肥料の成分組成は 1 L 中に N：180 mg，P：130 mg，K：350 mg，Mg：35 mg，Ca：110 mg，Mn：18 mg，B：18 mg，Fe：2 mg，Cu：0.003 mg，Zn：0.009 mg，Mo：0.003 mg であった．2015 年 4 月 22 日から人工受粉を開始し，2015 年 7 月 2 日から 9 月 4 日にかけて着色開始直後の果実を採取し実験に供試した．

2. 温度処理方法

採取した着色開始直後の果実は果梗枝を除去し果梗部にビニールテープを貼り，タッパー（232×167×90 mm）に 1～3 果ずつ入れ，15，25 および 35℃に設定した恒温インキュベーター（MTI-203，EYELA）内で，3 日および 7 日間静置した後，品質調査を行った．また，一部の着色開始直後の果実は樹上で果実袋を掛け，袋掛け後 7 日または 7 日以内に落果した果実を採取し，果実品質を調査した．

3. 果実品質調査

果実品質として果実の縦径，横径，果実重，果皮重，種子重，果汁歩合，糖度，滴定酸度および果皮色を測定した．果皮色は赤道部 3 か所について簡易型分光色差計（NF333，日本電色工業（株））を用いて， $L^*a^*b^*$ 表色系の L^* （値が大きいほど明るい）， a^* （値が大きいほど赤みが増す）および b^* （値が小さいほど青みが増す）を求めた．種子は自然乾燥後，重量を測定した．果汁はガーゼで仮種皮および種子を包み，手搾りジューサーで搾汁した．糖度はポケット糖度計（PAL-1，（株）アタゴ）を用いて測定し， $^{\circ}\text{Brix}$ として表した．滴定酸度は 0.156N-NaOH を用いて中和滴定法で測定し，クエン酸%として表した．残りの果汁は L-アスコルビン酸含量の分析に用いた．果皮は赤道面 3 か所を 1 cm 角にカミソリで薄く切り取り， -45°C で酸性抽出溶媒（メタノール：水：ギ酸：トリフルオロ酢酸 = 70：27：2：1（v/v %），2 mL）に 7 日以上浸漬し抽出した．抽出液をミリポアフィルター（0.45 μm ，ADVANTEC）でろ過後，アントシアニンの分析まで -45°C で保存した．残りの果皮はカミソリで薄く剥いて真空凍結乾燥機（FD-1，EYELA）により凍結乾燥させミキサー（IFM-800DG，Iwatani）で磨砕し，クロロフィルおよびカロテノイドの分析まで -45°C で保存した．

4. 果汁中 L-アスコルビン酸含量

-45°C で凍結保存していた果汁を解凍し，果汁 2 g に 4% メタリン酸水溶液を 2 mL，2% メタリン酸水溶液を 11 mL 加え，超音波洗浄機で 10 分間攪拌した後，遠心分離機（3700，KUBOTA）を用いて 4°C ，3,000 rpm で 10 分間遠心分離した．上清を回収し高速液体クロマトグラフィー（HPLC）を用いて L-アスコルビン酸含量を測定した．分析装置および分析条件は，ポンプ：DP-8020（TOSOH），カラムオーブン：CO-8020（TOSOH），検出器：紫外可視検出器（UV-8020，TOSOH），カラム：Inertsil NH2（ジーエルサイエ

ンス, 4.6 ϕ \times 250 mm), カラム温度 40°C, 流量 1.0 mL \cdot min⁻¹, 移動相: アセトニトリル: メタノール: 0.01% リン酸二水素ナトリウム: 0.03% ホモシステイン (60: 3: 10: 3), 検出波長: 270 nm, 試料注入量: 10 μ L とした.

5. 果皮の総アントシアニン含量

-45°C で保存していた抽出液を HPLC で分析した. HPLC 分析装置と分析条件は ポンプ: CCPM (TOSOH), オートサンプラー: AS-8000 (TOSOH), 検出器: 紫外可視検出器 (UV-8010, TOSOH), カラム: TSKgel ODS-80Ts QA (TOSOH, 4.5 ϕ \times 250 mm), カラム充填剤: Cosmosil 5-C₁₈ (ナカライテスク), カラム温度 40°C, 検出波長: 525 nm, 移動相: A 液 (1.5% リン酸水溶液), B 液 (1.5% リン酸, 20% ギ酸, 25% アセトニトリル, 5% THF 水溶液), グラジエント条件: 開始~60 分, A 液 85%, B 液 15%, 60~85 分, A 液 25%, B 液 75%, 85~終了, A 液 85%, B 液 15%, 流速: 0.7 mL \cdot min⁻¹, 試料注入量: 10 μ L とし, 内部標準にナスニンを用いた. 総アントシアニン含量を Cyanidin-3-glucoside 相当量で算出した.

6. 果皮中クロロフィルおよびカロテノイド含量

Costache ら (2012), Lichtenthaler \cdot Wellburn (1983) の方法に準拠して抽出および定量を行った. すなわち, -45°C で保存していた果皮の磨砕物 0.5 g に 90% メタノール 10 mL を加え攪拌し, 遠心分離機 (2410, KUBOTA) を用いて 3,000 rpm で 10 分間遠心分離した. 試料と抽出溶媒の割合を 1: 50 にするため, 上清 0.8 mL を 2.5 倍希釈し, 分光光度計 (Gene Spec V, 日立計測器サービス (株)) を用いて, 波長 666 nm, 653 nm および 470 nm の吸光度を測定した. 換算式は以下の式を用いて算出した.

$$\text{クロロフィル a} = 15.65 A_{666} - 7.34 A_{653}$$

$$\text{クロロフィル b} = 27.05 A_{653} - 11.21 A_{666}$$

$$\text{全カロテノイド} = (1000A_{470} - 2.86\text{Chla} - 129.2\text{Chlb}) / 245$$

7. 統計処理

得られたデータは、品種ごとに処理による有意な影響の有無を一元配置の分散分析により確認し、Tukeyの多重検定により統計解析を行った。また、品種間の有意性を確認するため、処理区ごとにt検定を行った。

結 果

‘サマークイーン’の果汁歩合は、全調査日で処理区間に差は認められなかった。一方、‘ルビースター’においては、処理3日後まで処理区間に差はなかったが、処理7日後には樹上完熟区および35℃で高く、25℃および15℃で低かった。また、樹上完熟区は処理前より6.5%高かった(第2-1図)。

果実重減少率は両品種とも類似した傾向を示した。‘サマークイーン’においては、処理3日後まで処理区間に有意差はなかったが、処理7日後では35℃で9.4%と著しく高く、15℃および25℃で低かった。‘ルビースター’も、‘サマークイーン’と同様の傾向を示した(第2-1図)。

果皮色($L^*a^*b^*$)は両品種で異なる傾向を示した。 L^* 値は、‘サマークイーン’の処理3日後で35℃が高く、次いで15℃、25℃で最も低かった。処理7日後では、果実間変動が大きく有意差は認められなかった。‘ルビースター’は、処理3日および7日後で35℃が高く、15℃および25℃は低かった(第2-2図)。

a^* 値は、‘サマークイーン’の処理3日後で25℃が高く、15℃が-1.9と著しく低かった。処理7日後では、25℃が17.0と最も高く、15℃で-3.0と著しく低かった。15℃は処理前から処理7日後までほとんど変化しなかった。‘ルビースター’は、処理3日後で25℃が最も高く、15℃が4.2と最も低かった。処理7日後では、25℃が21.9と最も高く、15℃が4.5と低かった(第2-2図)。

b*値は，‘サマークイーン’の処理3日後で15℃および35℃が高く，25℃で低かった．処理7日後では，処理間での差は明確ではなかったが，樹上完熟区は処理前より7.0低かった．‘ルビースター’は，全調査日で処理区間に明確な差は認められなかった（第2-2図）．

果皮のアントシアニン含量は果皮のa*値と類似した傾向を示し，処理3日後の25℃で‘サマークイーン’が27.8 mg・g⁻¹および‘ルビースター’が37.2 mg・g⁻¹と最も多く，15℃で‘サマークイーン’が5.7 mg・g⁻¹および‘ルビースター’が12.2 mg・g⁻¹と最も少なかった．処理7日後は，両品種とも果実間変動が大きく有意差は認められなかった（第2-3図）．

果皮のクロロフィル含量は，‘サマークイーン’の処理7日後で15℃が13.4 mg・100g⁻¹と多く，25℃および35℃で約2.6 mg・100g⁻¹と少なかった．‘ルビースター’の処理7日後も，‘サマークイーン’と同様に15℃で最も多く，25℃および35℃で少なかった（第2-3図）．

果皮の総カロテノイド含量は，‘サマークイーン’の処理3日後で15℃が多く，25℃および35℃で少なかった．処理7日後では，15℃が最も多く，35℃で1.8 mg・100g⁻¹と最も少なかった．‘ルビースター’は，処理3日後で25℃が最も多く，35℃で最も少なかった．しかし，処理7日後では15℃が最も多く，35℃で3.9 mg・100g⁻¹と最も少なかった（第2-3図）．

糖度は，両品種とも処理3日後に処理区間の差はなかった．‘サマークイーン’の処理7日後は，25℃および樹上完熟区が18°以上と高く，35℃で16.9°と低かった．‘ルビースター’の処理7日後では，樹上完熟区が18.1°と最も高く，25℃および35℃で約16.3°と低かった（第2-4図）．

‘サマークイーン’の滴定酸度は，処理3日後で15℃が最も高く，35℃で著しく低かった．処理7日後では，15℃で3.5%と著しく高く，25℃で2.5%と最も減酸が促進された．‘ルビースター’は，温度が高いほど減酸が促進

され、処理期間通して 15℃が 3.9%以上と高く、35℃の処理 7 日後で 2.9%と低かった（第 2-4 図）。

‘サマークイーン’の糖酸比は、処理 3 日後で 35℃が最も高かったが、処理 7 日後では 25℃および樹上完熟区が高く、15℃で最も低かった。‘ルビースター’は、全調査日で 35℃が高く、次いで 25℃、15℃で最も低かった。樹上完熟区は 35℃の処理 7 日後と同程度であった（第 2-4 図）。

L-アスコルビン酸含量は、‘サマークイーン’の処理 3 日後で 15℃が 21.7 mg・100g⁻¹と多く、35℃で 9.4 mg・100g⁻¹と最も少なかった。処理 7 日後では、果実間変動が大きく処理区間に差はなかった。‘ルビースター’は、全調査日を通して 25℃で多く、次いで 15℃、35℃で少なかった。樹上完熟区は 6.5 mg・100g⁻¹と最も少なかった（第 2-4 図）。

考 察

本研究の結果、果実成熟期の温度がパッションフルーツ果実の果皮の着色および果汁品質に強く影響し、温度に対する反応は品種によって異なることが解明できた。

‘サマークイーン’の果汁歩合は全調査日で処理区間に差は認められなかったが、‘ルビースター’は処理 7 日後に樹上完熟区および 35℃で高く、25℃および 15℃で低かった。また、果実重減少率は両品種とも 35℃で著しく高かった（第 2-1 図）。ムラサキクダモノトケイソウでは、温度が高く、貯蔵日数が進むにつれ果汁歩合が高くなり、その要因として果実重の減少率が関係していると報告されている（Kishore ら, 2011）。ザクロでは貯蔵による果実重の減少は果皮からの蒸散による影響が大きいとされる（Elyatem・Kader, 1984）。本研究でも、35℃で果汁歩合および果実重減少率が高く、果皮重が減少する傾向にあった（データ省略）。そのため、高温により果皮からの蒸

散が増加したことで果実重減少率が上昇し、果汁歩合が高くなったと思われる。

果皮色は両品種とも 15℃では着色が進まず果皮には緑色の部分が多く残り、35℃では果皮が黄化した。25℃では着色が進み果皮は紫色であった。‘サマークイーン’では 15℃でクロロフィル a 含量は減少したが、 a^* 値およびアントシアニン含量は増加せず、果皮の外観は緑色が強く着色不良であった。一方、‘ルビースター’では a^* 値およびアントシアニン含量が増加し、クロロフィル a 含量も‘サマークイーン’より少なかったが、外観はまだ緑色が残り着色は不十分であった（第 2-2 図，第 2-3 図）。バナナは 15℃で貯蔵した場合、着色開始が遅く完熟しても果皮に緑色の部分が残る（稲葉ら，1984）。ピーマンは 10℃でクロロフィルの分解が抑制され（吉田ら，2014）、イチゴでは低夜温（10℃）によりアントシアニン含量が少なくなるとされている（松添ら，2006）。パッションフルーツにおいても、冬期（昼温 20℃／夜温 8℃）に栽培された果実は着色が不十分であると報告されており（Goldenberg ら，2012）、低温はパッションフルーツの果皮の着色を抑制すると考えられた。

25℃では両品種ともに a^* 値が上昇し、クロロフィル a 含量は減少し、アントシアニンも多く蓄積され、果皮の紫色が濃く着色が良好であった（第 2-2 図，第 2-3 図）。温帯果樹であるブドウやウンシュウミカン、リンゴでは低温（20℃未満）により着色が良好となる（苔名ら，1979；宇都宮ら，1982；山田ら，1988）が、熱帯果樹であるバナナは 20～25℃が適温である（稲葉ら，1984）。パッションフルーツも夜温が 20～25℃のときに着色が優れるとされ（Kozai ら，2007）、本研究の結果と一致した。パッションフルーツは熱帯果樹であるため、ブドウなどの温帯果樹よりも果皮の着色の適温が高くなったと考えられた。

35℃では両品種ともに a^* 値が上昇し、クロロフィル a 含量は減少し、アン

トシアニンも蓄積されたが、果皮は黄化した。これは‘ルビースター’で顕著であった（第 2-2 図，第 2-3 図）。多くの果樹や果菜類では高温により着色が進まないことが報告されている（森ら，2004；山田ら，1988；宇都宮ら，1982）。パッションフルーツも高夜温（30℃）により着色が抑制された（Kozai ら，2007）。バナナではクロロフィルが分解消失することで果皮が緑色から黄色に変化するとされる（緒方・寺井，1979）。トマトでは高温（30℃以上）により果実の黄化が多発し（前澤ら，1993），黄化の程度が強いほど L 値および b 値が高いとされる（城島・松添，1994）。本研究においてもクロロフィルの分解消失が促進され，L*値および b*値が他の処理区に比べ高かったため，35℃での果皮の黄化はクロロフィルが分解され，L*値および b*値が上昇したことが要因であると推察される。また，‘ルビースター’で黄化が顕著に観察されたのは，‘サマークイーン’よりも a*値およびアントシアニン含量が低く，果皮の総カロテノイド含量が多い傾向にあったためであると思われる。

本研究は，いずれの温度においても暗黒条件で処理を行ったが，アントシアニンの蓄積およびクロロフィルの分解が示された。一般にブドウやリンゴなど果皮にアントシアニンを含む果樹は着色に光を必要とし，低光量や暗黒下では適温であってもアントシアニンが蓄積されず，関連する遺伝子の発現も抑制される（Azuma ら，2012；近藤，1992）。さらに，カラーピーマンではクロロフィルの分解にも光が必要であると報告されている（吉田ら，2014）。これらのことから，パッションフルーツの着色は光よりも温度の影響が大きい可能性が示された。

果汁品質は両品種ともに 15℃で処理期間中糖度は変化せず，減酸も進まなかったため糖酸比も変化しなかったが，L-アスコルビン酸含量は増加した（第 2-4 図）。ウンシュウミカンおよびブドウでは，温度が低いほど減酸が

進まないとされ（苫名ら，1979；宇都宮ら，1982），パッションフルーツも温度が低いと減酸が進まない（Yonemoto ら，2004）．アスコルビン酸含量は温度が低いほど多くなることが知られており（松添ら，2006；田村，2004），本研究においても低温でアスコルビン酸の生合成が促進されたと考えられる．

25℃では両品種とも減酸が進み，L-アスコルビン酸含量は増加した．糖度および糖酸比は品種間で異なった．‘サマークイーン’では糖度および糖酸比が処理期間中増加し樹上完熟区と同程度の糖度および酸度であった（第 2-4 図）．しかし，‘ルビースター’では糖度が低下し，糖酸比はほぼ変化せず，樹上完熟区よりも低糖度および低糖酸比であった（第 2-4 図）．ブドウおよびストロベリーグァバは 20～25℃で糖度が高くなると報告されている（向井ら，1989；Poudel ら，2009）．パッションフルーツにおいても，夜温が 25℃の時に酸度が低く，糖酸比が上昇するとされ（Kozai ら，2007；Utsunomiya，1992），‘サマークイーン’においても 25℃で高糖度，低酸度および高糖酸比であった．ウメにおいて収穫後果実では樹上果実とほぼ同質の成熟現象を示すが，成熟に伴い糖含量は減少すると報告している（稲葉・中村，1981）．リンゴにおいても成熟前に収穫した果実は追熟させても樹上完熟果より糖度が低いとされ（Lin・Walsh，2008），‘ルビースター’においても貯蔵果実と樹上果実の成熟は同様に進むが貯蔵果実の糖度は低く，低糖酸比であった．

35℃では両品種とも低糖度，低酸度および低 L-アスコルビン酸含量であった．糖酸比は‘サマークイーン’で処理 3 日後に上昇し，その後処理前と差はなくなったが，‘ルビースター’は処理前よりも上昇した（第 2-4 図）．多くの果樹や果菜類では高温により糖度の低下や減酸が進む（後藤ら，2005；熊倉・宍戸，1994；苫名ら，1979；宇都宮ら，1982；山田ら，1988）．

パッションフルーツでも昼温 33℃、夜温 28℃の高温条件では糖度の低下が見られ、減酸も促進されており (Utsunomiya, 1992)、本研究においても同様の傾向を示した。イチゴやコマツナ、ホウレンソウでは夜温や平均気温が上昇するとアスコルビン酸含量が低下するとされ(松添ら, 2006; 田村, 2004)、パッションフルーツにおいても高温により果汁の L-アスコルビン酸含量が増加しなかったと推察される。

以上のように、15℃においては両品種ともに果皮の緑色が強く、低糖酸比であった。25℃では、‘サマークイーン’で高糖度、低酸度および高糖酸比となり、‘ルビースター’は果皮のクロロフィルの分解およびアントシアニンの蓄積が良好であった。35℃においては、両品種とも果皮のクロロフィルが分解され、アントシアニンは蓄積したが、果皮の外観は黄色く、低糖度であった。すなわち、パッションフルーツの果実品質にとって最適な成熟期の温度は 25℃であることがわかった。さらに、‘サマークイーン’の果皮色および果汁品質は 25℃と樹上完熟果との間に差はほとんどなかった。ムラサキクダモノトケイソウでは、着色開始期から果皮の半分が着色した果実を収穫後 25℃で貯蔵すると、樹上完熟果と同程度の果実品質になるとされている (Shiomi ら, 1996)。鹿児島県におけるパッションフルーツ栽培において開花、結実や着色不良などの高温障害は、‘ルビースター’よりも‘サマークイーン’でより多く発生し、収益性が低いため栽培する農家も減少傾向にある。これらのことから、‘サマークイーン’は着色開始期から五分着色の果実を収穫し、25℃で貯蔵して出荷することで商品果率および収益性の向上につながると推察された。しかし、‘ルビースター’は‘サマークイーン’とは異なり、貯蔵による成熟果と樹上完熟果に果汁品質の差が認められたため、完熟前の収穫は果汁品質の低下を招く可能性がある。このことから、‘ルビースター’は樹上完熟果の収穫が不可欠であるが、夏季のハウス内は 40℃

以上になることがあるため，遮光（Lee ら，2015；Wada ら，2006）やウォーターカーテン（岩崎ら，2011b）などの高温対策を行う必要があると考えられた．

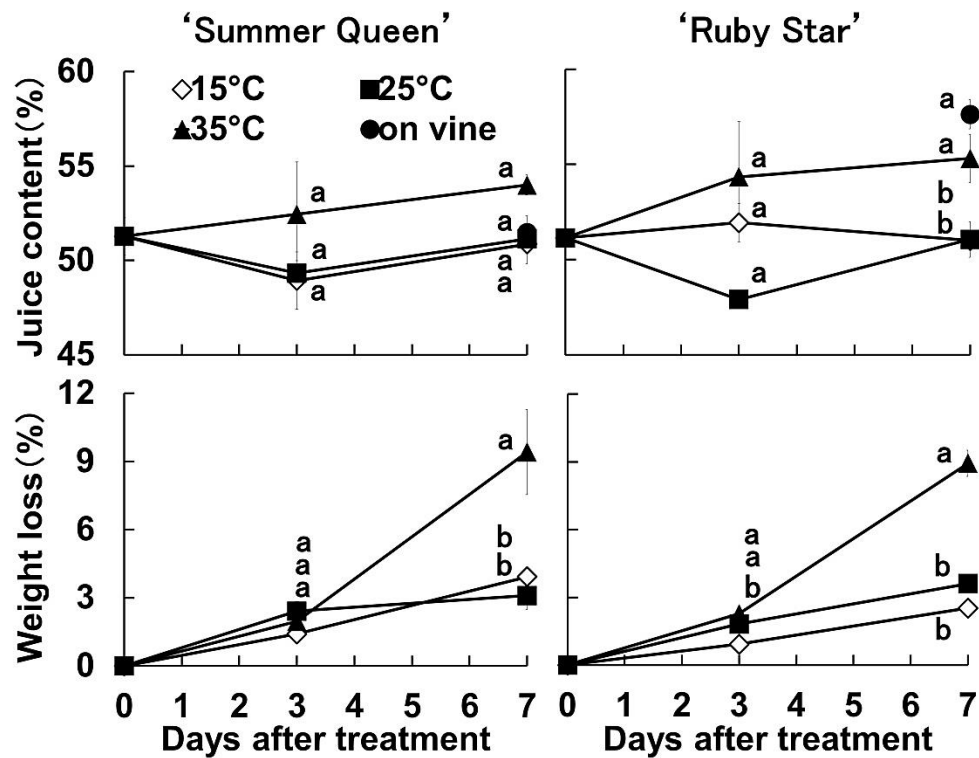


Fig. 2-1. Effects of temperature on juice content and weight loss of passion fruits.

Data are presented as means \pm SE (n = 3). Different letters indicate significant differences among the treatment at $P < 0.05$ by Tukey's test.

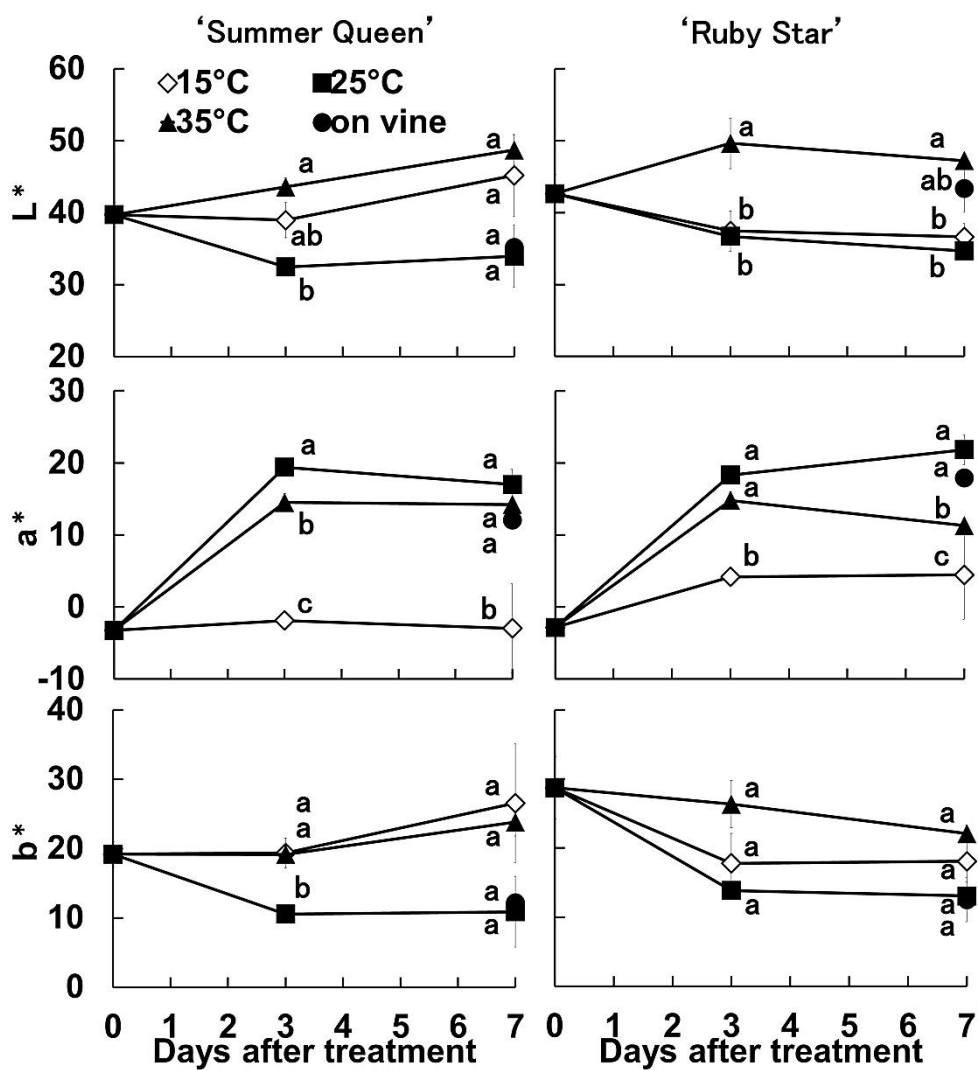


Fig. 2-2. Effects of temperature on peel color (L^* , a^* , b^*) of passion fruits. Data are presented as means \pm SE ($n = 3$). Different letters indicate significant differences among the treatment at $P < 0.05$ by Tukey's test.

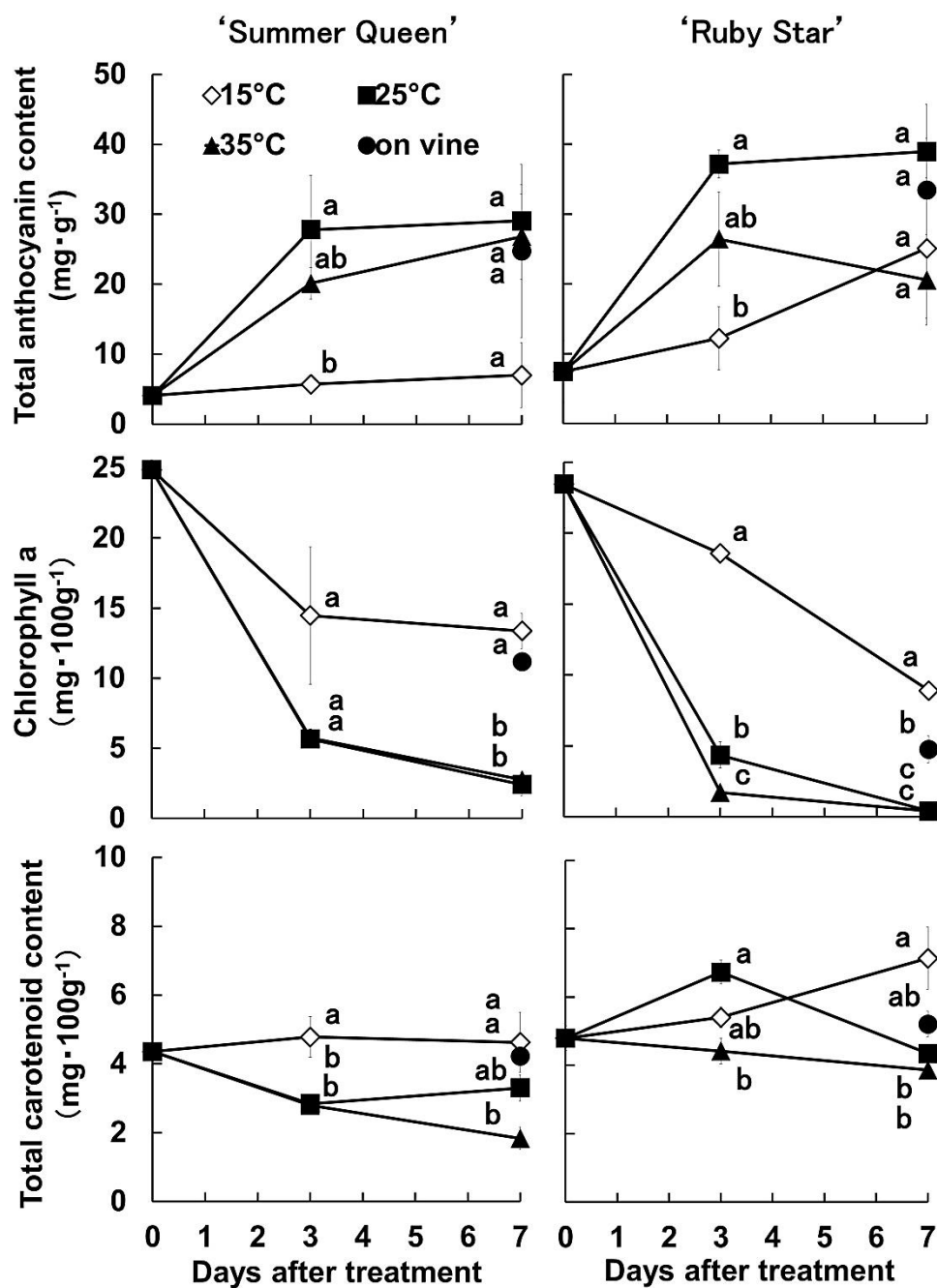


Fig. 2-3. Effects of temperature on peel color (total anthocyanin content, chlorophyll a content, total carotenoid content) of passion fruits. Data are presented as means \pm SE ($n = 3$). Different letters indicate significant differences among the treatment at $P < 0.05$ by Tukey's test.

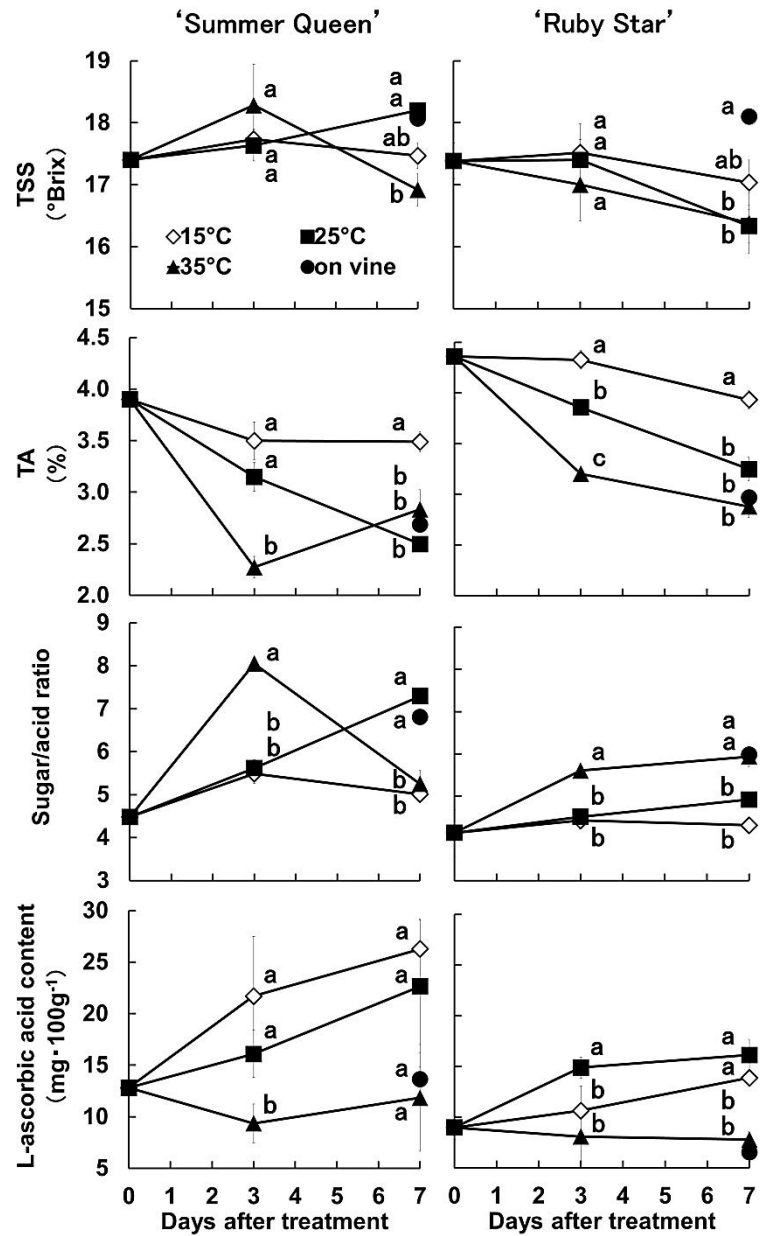


Fig. 2-4. Effects of temperature on juice quality (TSS, TA, sugar acid ratio, L-ascorbic acid content) of passion fruits. Data are presented as means \pm SE ($n = 3$). Different letters indicate significant differences among the treatment at $P < 0.05$ by Tukey's test.

第3章 遮光処理がパッションフルーツの樹体生育および果実品質に及ぼす影響

緒 言

パッションフルーツは熱帯高地原産であるため、30℃以上の高温では花蕾が発達しないため開花に至らず (Chang・Cheng, 1992), 昼温 33℃および夜温 28℃の高温条件により糖度が低下する (Utsunomiya, 1992). それに加えて、35℃以上の高温は光合成能力の低下 (第1章) および果実品質の低下 (第2章) を助長することが明らかになった. 日本でのパッションフルーツ栽培は、ハウス栽培が主流で夏場にはハウス内温度が 40℃前後まで上昇する. そのため、高温対策を考えることは今後の我が国のパッションフルーツ栽培において必要不可欠である.

高温対策としては根域冷却 (木下ら, 2012) やウォーターカーテン (岩崎ら, 2011b) などがあるが、その中でも容易に導入が可能な方法として遮光処理がある. 遮光処理は商品果率の向上 (Wada ら, 2006) や果実の日焼け防止 (Lee ら, 2015) など高温・強光対策として有効な手段である. しかし、遮光は光合成に必要な光を制限してしまうため、光合成速度や収量、果実品質を低下させるというマイナス面も持ち合わせている (松浦・荒木, 1995; Sharma ら, 2006). パッションフルーツにおいても、遮光処理によって樹体生育や花芽形成が抑制されるとされており (Menzel・Simpson, 1988; Santos ら, 2012), 光量の確保はパッションフルーツ栽培にとって重要である. 近年、白色で光透過率が高く、赤外光を遮蔽する遮光ネットが市販され、ブドウやトマトにおいて、気温や葉温の低下、着果数の増加、着色の向上などの効果が報告されている (釘宮ら, 2011; 吉田・佐藤, 2012). このことから赤外光を遮蔽する遮光ネットは、パッションフルーツ栽培における高温障害

対策に有効である可能性が考えられる。

そこで本研究では、パッションフルーツ栽培における果実の着色不良等の高温障害を緩和するため、遮熱効果のある遮光ネットを用いて、種々の程度の遮光処理がパッションフルーツの樹体生育および果実品質に及ぼす影響について検討した。

材料および方法

1. 植物材料の育成

鹿児島大学農学部附属農場唐湊果樹園（鹿児島市）の無加温ビニルハウスで生育させたパッションフルーツ‘ルビースター’（*P. edulis* × *P. edulis* f. *flavicarpa*）の1年生挿木苗を供試した。2013年8月に挿し木を行い、ミスト室で発根させ、10月に鉢上げを行った。その後、茎長約20 cmに育った苗を2014年2月に黒土，ぼら土細粒，ぼら土中粒，バーミキュライト，牛糞堆肥，バーク堆肥，苦土石灰およびようりん＝5：1：1：1：1：1：0.025：0.025とチアメトキサム粒剤（シンジェンタジャパン（株））少量を混用した用土を充填した8号ポリ鉢に植えた。第3-1図に示した仕立て方で生育させ、無加温ビニルハウス内で実験を行った。なお、発生した腋芽は適宜除去した。

2. 試験区

遮光処理は、温度上昇防止剤入りの遮光ネット（クールホワイト，ダイオ化成（株））を用いて、無処理区，弱遮光区（420SW），中遮光区（620SW）および強遮光区（1220SW）の4区とし、2014年5月8日から8月21日までそれぞれ処理を行った。この遮光ネットは、光合成に必要な可視光線を通し、作物には避けたい熱線（赤外光）を遮蔽できる。遮光ネットは第3-2図に示した方法で被覆し、通風を良くするため地上1 mは空けた。各処理区の栽培

面積は約 11 m²であった．なお，各処理区は同一ビニルハウス内で実験を行った．各処理区の 15 鉢を樹体生育，開花・結実および果実品質調査用として，それぞれ 5 鉢ずつに分けた．

3. 栽培方法

肥料として，1,000 倍希釈した 1,000 mL の液体肥料（タンクミックス A・B，OAT アグリオ（株））（A：B＝1：1）を週 1 回灌水の代わりとして施用した．施用した液体肥料の成分組成は 1 L 中に N：180 mg，P：130 mg，K：350 mg，Mg：35 mg，Ca：110 mg，Mn：18 mg，B：18 mg，Fe：2 mg，Cu：0.003 mg，Zn：0.009 mg，Mo：0.003 mg で，8 号鉢当たりの総 N 施肥量は約 2.7 g であった．樹体生育調査用は，花芽調査後に摘蕾し，開花させなかった．開花・結実調査用は，受粉した花の結実を確認した後に摘果した．また，花柱が直立または柱頭が葯に接触および接近していない花（不完全花）も摘花した．果実調査用は，処理開始から第 7 週目に摘心し，葉果比を 10 に揃えた．気温，湿度，照度はデータロガー（TR-74Ui，（株）ティアンドデイ）で 10 分ごとに記録した．照度は光合成蒸散測定装置（LCpro+，ADC Bioscientific）を用いて，lux から光合成有効光量子束密度（PPFD）に変換した．

4. 樹体生育および開花・結実調査

累積伸長量，葉数，葉色（SPAD 値）および花芽数を 2014 年 5 月 8 日から 8 月 21 日まで毎週 1 回調査した．SPAD 値は葉緑素計（SPAD-502，コニカミノルタ（株））を用いて測定した．開花数は毎日確認し，その都度人工受粉を行った．受粉後子房の長径が開花時の 2 倍の大きさになっているものを結実とし，（結実数／受粉数）×100 で結実率を算出した．

5. 光合成特性

光合成速度，蒸散速度，気孔コンダクタンスは光合成蒸散測定装置（LCpro+，

ADC Bioscientific) を用いて 6 月 25 日, 7 月 25 日および 8 月 21 日に測定した. 測定は晴天日の 9:00 から 13:00 までの間に行い, チャンバー温度は 30°C, CO₂ 濃度は 380 ppm, PPFD は 1,200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 流量は 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ とした. 各測定日の測定時間帯の平均気温は 6 月, 7 月および 8 月でそれぞれ 33.0°C, 38.1°C および 36.7°C であった. また, 無処理区および強遮光区の光—光合成曲線を検討するため, PPFD を 0, 100, 200, 400, 600, 900, 1,200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ と設定し, 光合成速度を測定した. その際のチャンバー温度, CO₂ 濃度および流量は上記と同様に行った.

6. 葉表面温度

葉表面温度は, 赤外線サーモグラフィー装置 (Thermo Shot F30, NEC Avio 赤外線テクノロジー (株)) を用いて測定した. 測定日は 7 月 1 日, 7 月 21 日および 8 月 17 日であり, 測定は晴天日の 11~14 時までの間に行った. 各測定日における測定時間帯の平均気温は, 7 月 1 日, 7 月 21 日および 8 月 17 日でそれぞれ 33.8°C, 38.7°C および 39.4°C であった.

7. 植物体の新鮮重および乾燥重

植物体の解体調査は 2014 年 8 月 21 日に行った. 各処理区の樹体生育調査用植物体は 5 個体ずつ葉, 茎および根に分けて解体し, 部位別新鮮重の測定後, 80°C で 2 日間通風乾燥し, 乾燥重を秤量した.

8. 果実品質

果実品質については, 受粉後から自然落果するまでの日数を記録し, 自然落果した果実については収穫当日に縦径, 横径, 果実重, 種子数 (完全種子, 不完全種子), 果汁歩合, 糖度 (TSS), 滴定酸度 (TA), 糖酸比 (TSS/TA) および果皮色を調査した. 果実重は果梗枝を除去してから測定した. 果汁はガーゼで仮種皮および種子を包み, 手搾りジュースで搾汁した. 糖度は屈折糖度計 (PAL-1, (株) アタゴ) で測定し, °Brix で表した. 滴定酸度の測

定は 0.156 N-NaOH による中和滴定法で行い、クエン酸%で表した。果皮色は赤道部 3 か所について簡易型分光色差計 (NF333, 日本電色工業 (株)) で測定し、 $L^*a^*b^*$ 表色系の L^* (値が大きいほど明るい), a^* (値が大きいほど赤みが増す) および b^* (値が小さいほど青みが増す) を求めた。

9. 統計処理

得られたデータは、処理による有意な影響の有無を一元配置の分散分析により確認し、Tukey の多重検定により統計解析を行った。また、結実率および果汁歩合についてはアークサイン変換後に統計解析を行った。

結 果

遮光処理は 2014 年 5 月 8 日から 8 月 21 日まで行い、照度 (PPFD)、気温および湿度を経時的に記録した。この期間の気温の推移を第 3-3 図に示した。最高気温は、7 月中旬以降いずれの遮光処理区においても無処理区より低かった。平均気温および最低気温には処理区間で差はなかった。晴天日 (7 月 30 日) および曇天日 (8 月 12 日) の照度、気温および湿度の推移を第 3-4 図に示した。照度は天候によって高い時間帯が異なり、晴天日は 12:00~13:30、曇天日は 11:00~12:30 であった。この時間帯の平均照度 (PPFD) は、晴天日が無処理区で約 $1,417 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、弱遮光区で約 $966 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (遮光率 31.8%)、中遮光区で約 $802 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (遮光率 43.4%) および強遮光区で約 $515 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (遮光率 63.7%) であった。曇天日は無処理区で約 $872 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、弱遮光区で約 $619 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (遮光率 29.1%)、中遮光区で約 $499 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (遮光率 42.8%) および強遮光区で約 $341 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (遮光率 60.9%) であった。気温および湿度は 12:00~15:00 の間で処理区間に差が認められ、気温は天候による差も見られた。晴天日の気温は無処理区に比べ弱遮光区が 1.5°C 、中遮光区が 1.8°C 、強

遮光区が 2.9℃低かったが，曇天日ではそれぞれ 1.0℃，1.1℃，1.2℃低かった．湿度は晴天日と曇天日ともに無処理区に対して弱遮光区および中遮光区が約 4.2%，強遮光区が約 8.5%高かった．葉表面温度は，全調査日を通して無処理区よりも遮光処理区で有意に低く，遮光率が高いほど低い傾向にあった（第 3-1 表）．

累積伸長量，節間長，葉数および葉面積は遮光率が高くなるにつれ促進されたが，SPAD 値は遮光率が高くなるにつれ低下した．花芽数には処理区間で有意差は認められなかった（第 3-2 表）．開花期間は，無処理区で 6 月 1 日～6 月 24 日，7 月 3 日～7 月 13 日および 7 月 19 日，弱遮光区で 5 月 30 日～6 月 24 日および 7 月 4 日～7 月 14 日，中遮光区で 5 月 31 日～6 月 19 日および 7 月 5 日～7 月 14 日，強遮光区で 5 月 30 日～6 月 16 日および 7 月 6 日～7 月 8 日であった．総開花数は弱遮光区で最も多く，強遮光区で最も少なかった．結実率は強遮光区を除いて 100.0%であった（第 3-2 表）．

光合成速度，蒸散速度および気孔コンダクタンスは，6 月で強遮光区が他の処理区より高かったが，7 月では弱遮光区で最も高く，8 月には強遮光区の光合成速度および気孔コンダクタンスが最も低く，特に光合成速度は 6 月の半分以下であった（第 3-3 表）．強遮光区における 8 月の光合成速度の低下の原因を解明するため，無処理区および強遮光区の光—光合成曲線を作成した．光合成速度は無処理区で $1,200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ まで上昇したが，強遮光区では $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ までしか上昇しなかった（第 3-5 図）．

葉および茎の新鮮重は処理区間で差がなかった．根は無処理区が 162.4 g と最も重く，強遮光区で 91.8 g と最も軽かった．葉の乾燥重は新鮮重と異なり処理区間で有意差が見られ，無処理区および中遮光区で重く，次いで弱遮光区，強遮光区で軽かった．茎および根には処理区間で差はなかった（第 3-4 表）．

果実品質については、強遮光区で成熟日数が他の処理区より長く、果実は小さく軽かった。完全種子数は強遮光区で少なく、不完全種子数は強遮光区で多かった。果汁歩合は無処理区が最も高く、強遮光区で最も低かった。糖度は処理区間に差はなかったが、滴定酸度は強遮光区で他の処理区より高く、その結果糖酸比も他の処理区より低かった（第 3-5 表）。さらに、収穫果実の糖酸比について検討したところ、弱遮光区は他の処理区よりも糖酸比 6.0 以上の果実が多かった（第 3-6 図）。果皮色 (L^* , a^* , b^*) は処理区間で有意差は認められなかった（第 3-6 表）。

考 察

光の少ない環境で植物は、茎を伸長させ、葉を大きくすることでより多くの光を受けようとする。これを避陰反応と呼び、茎の伸長が促進されることによって生殖成長が抑制される（瀧澤，2008）。本研究では、累積伸長量、節間長、葉数および葉面積は遮光率が高くなるにつれ促進され、強遮光区では開花数も減少した（第 3-2 表）。また、開花日数も無処理区より中遮光区は 6 日、強遮光区は 15 日も短くなった。遮光処理により避陰反応が現れることは、キュウリやブドウで知られている（Abu-Zahra・Ateyyat, 2016; Kose, 2014）。パッションフルーツにおいても、低光量により新梢の伸長が促進され、開花数が減少すると報告されており（Menzel・Simpson, 1988）、本研究の結果と一致した。しかし、弱遮光区は無処理区と樹体生育および開花・結実に有意差が認められなかった（第 3-2 表）。本研究で用いた遮光ネットは、植物体の避陰反応を誘発する遠赤色光（近赤外光）（瀧澤，2008）を遮蔽する効果がある。そのため、弱遮光区では避陰反応を抑制し、生殖成長を維持したと思われる。本研究において、パッションフルーツは約 43% 以上の遮光により樹体生育に避陰反応が現れ、生殖成長を抑制することがわかった。

加えて、本研究で用いた遮光ネットは約 30%の遮光までであれば、樹体生育を抑制しないと確認できた。

光合成速度は、6月には強遮光区が他の処理区より高かったが、7月では弱遮光区で最も高く、8月には強遮光区の光合成速度が最も低かった(第3-3表)。多くの植物は光合成に光が必要であるが、強光下では光合成速度が低下するとされ、この過剰な光エネルギーによる光合成の低下を光阻害と呼ぶ(園池, 2007)。イネでは光阻害と高温ストレスとの複合ストレスにより光合成能力が低下する(Yin ら, 2010)。マンゴーは遮光処理をすることで葉温が低下し、光阻害が軽減されたことにより光合成能力が高まったが、曇天日は低光量により光合成能力が低下した(Jutamaneer・Onnom, 2016)。パッションフルーツの光飽和点は約 $1,200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ である(第1章)が、強遮光区の光飽和点は $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ であった(第3-5図)。低光量により光合成速度および光飽和点が低くなることはペカンでも報告され(Lombardini ら, 2009)、このような反応を葉の陰葉化と呼び、クリにおいても樹冠内の遮光された葉で同様の傾向を示した(Proietti ら, 2000)。これらのことから、弱遮光区および中遮光区では葉温が低下し、光阻害が軽減されたことで光合成速度が無処理区より高いか同程度であったが、強遮光区では低光量が続き陰葉化したことにより光合成速度が低下したと思われる。

強遮光区は根の新鮮重および葉の乾燥重が最も軽く(第3-4表)、葉のデンプン含量も少なかった(データ省略)。アメリカグリの実生は遮光により光合成速度および植物体の乾物量が低下する(Wang ら, 2006)。ポンカンでは遮光によって葉の炭水化物含量および光合成速度が低下するとされ(Mataa・Tominaga, 1998)、強遮光区は光合成速度の低下により同化産物が不足したと思われた。一方、弱遮光区は葉の乾燥重が無処理区よりも軽かった(第3-4表)が、葉の全糖含量および根のデンプン含量が多かった(デー

タ省略). 甘果オウトウにおいて、夏季の遮光処理は無処理よりも光合成速度が高く、樹体の糖含量およびデンプン含量を増加させた(別府・片岡, 2005). 本研究においても弱遮光区は無処理区よりも光合成速度が常に高く(第 3-3 表), 炭水化物を増加させたと考えられる.

強遮光区の果実は成熟日数が長く、小果で軽く、種子数および果汁歩合が少なかった. 強遮光区は酸度も他の処理区より高く、糖酸比も低かった(第 3-5 表). 遮光処理により成熟日数が長くなることはイチジクで報告されている(松浦・荒木, 1995). 遮光により高酸度になることはカンキツやブドウで知られ、これらの報告では糖度の低下および果皮の着色不良も認められている(Shinomiya ら, 2015; 鈴木ら, 1975). 以上のことから、強遮光区では光合成速度の低下により果実への同化産物の転流が減少し、果実発育が抑制され高酸度および低糖酸比であったと思われる. さらに、パッションフルーツの果汁量は種子数との相関が大きい(石畑ら, 1984). そのため、種子の発達が抑制されたことで果汁歩合が減少したと考えられる. しかし、弱遮光区および中遮光区は無処理区よりも糖酸比 6.0 以上の高い果実が多かった(第 3-6 図). メロンでは赤外光を遮蔽するネットを使用することにより、果実の糖度および甘味が向上すると報告されている(Murakami ら, 2017). 弱遮光区および中遮光区は無処理区よりも葉表面温度は低く、弱遮光区は光合成速度が高く、中遮光区は同程度であった(第 3-1 表, 第 3-3 表). これらのことから、弱遮光区および中遮光区は果実への同化産物の転流が十分に行われ、無処理区よりも糖酸比の高い果実が多くなったと思われる. しかし、中遮光区は果汁歩合が減少した. パッションフルーツの果汁は仮種皮に蓄積される(石畑ら, 1987). そのため、中遮光区では不完全種子が多かったことにより、果汁歩合が減少したと推察される. 本研究において、果皮色(L^* , a^* , b^*)は処理区間で有意差は認められなかった(第 3-6 表). 第 2 章では果

皮の着色に光の影響は少ない可能性があることを示された。そのため、果皮色には処理区間での差がなかったと考えられる。

これらの結果から、パッションフルーツにおける 100 日以上に渡る 60% 以上の遮光処理は、樹体が避陰反応を呈し、開花数の減少、開花期間の短縮を起こすことがわかった。さらに、葉は陰葉化したため、光合成速度および光飽和点が低下し、葉面積が増加することも確認された。そして、同化産物の不足により果実発育が抑制され、果実品質も低下した。約 43% の遮光処理も樹体が避陰反応を呈し、開花期間の短縮を起こすが、葉の陰葉化は認められなかった。高糖酸比の果実を生産したが、種子の発達が抑制されたことで果汁歩合は減少した。一方、約 30% の遮光処理は樹体生育への影響はほとんどなく、光合成速度が高く、同化産物が多くなったことで、高糖酸比の果実が多かった。以上のことから、今後パッションフルーツを栽培する際には、遮光率約 30% の赤外光を遮蔽する遮光ネットを用いることにより、果実品質の向上が期待できることが示唆された。また、ハウス内の遮光は気温および体感温度を低下させることで作業性が向上するとされ(石井ら, 2001), ハウス全体を遮光する栽培管理方法の確立が期待される。



Fig. 3-1. Cultivation method of passion fruit adopted in the present study.



Fig. 3-2. Method of shading treatment adopted in the present study.

A: control, B: low, C: middle, D: heavy.

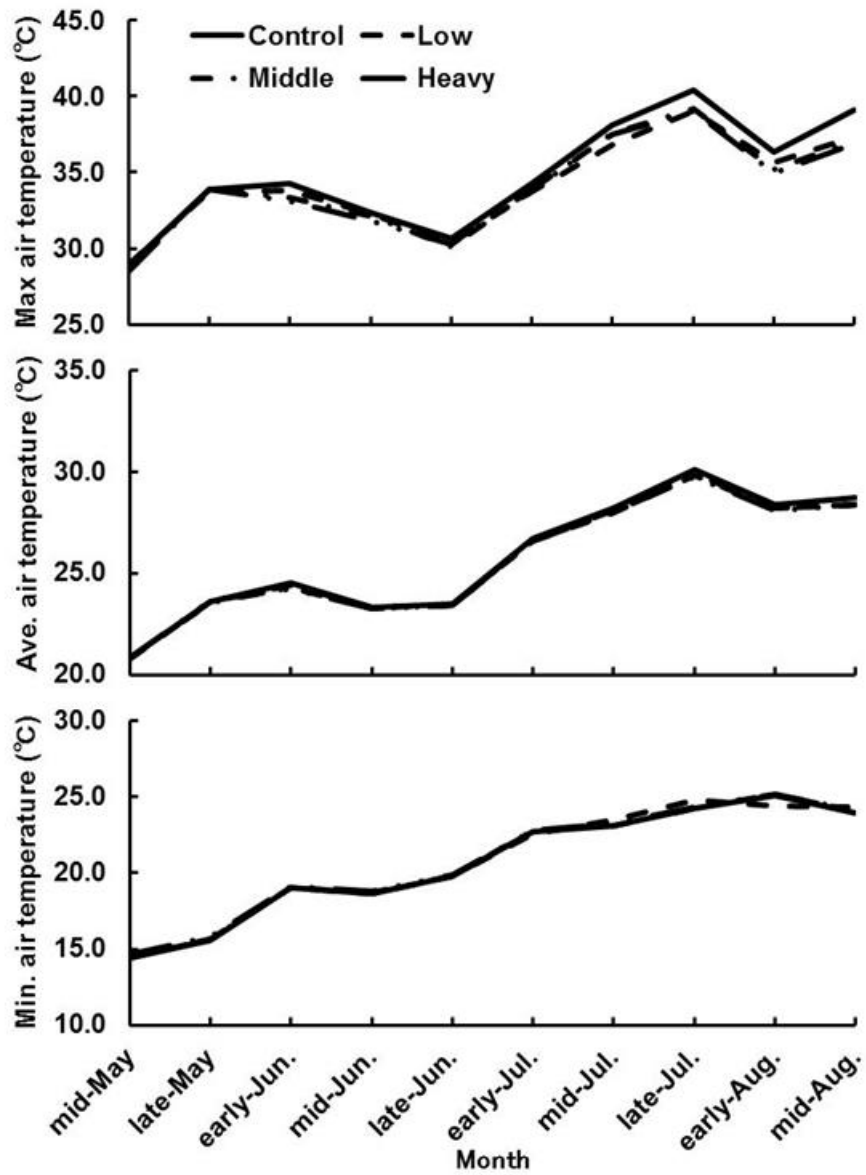


Fig. 3-3. Mean values of cultivation period changes maximum air temperature, average air temperature, and minimum air temperature in the greenhouse and shaded environments (May 8 - Aug. 21).

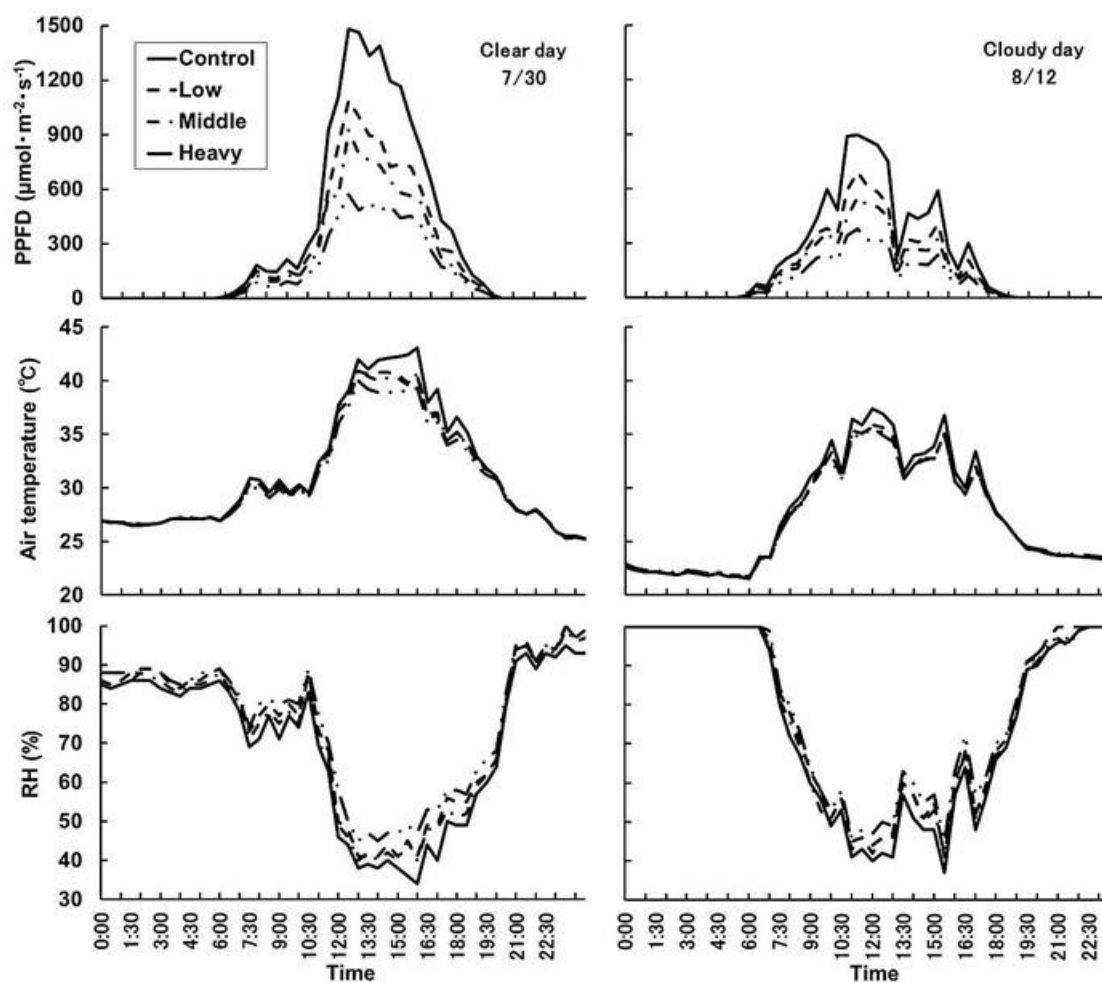


Fig. 3-4. Mean values of daily changes PPFD, air temperature, and relative air humidity (RH) in the greenhouse and shaded environments. Left: Clear day (Jul. 30), right: Cloudy day (Aug. 12).

Table 3-1. Effects of shading treatment on leaf surface temperature (°C) in passion fruit ‘Ruby Star’.

Shading treatment	Jul. 1	Jul. 21	Aug. 17
Control (0%) ^z	39.7 a ^y	42.4 a	39.5 a
Low (31.8%)	36.5 b	41.0 b	36.1 b
Middle (43.4%)	36.7 b	40.9 b	35.2 bc
Heavy (63.7%)	36.7 b	36.5 c	34.3 c

^z Shading level.

^y Different letters within the column indicate significance by Tukey’s test at $p < 0.05$ ($n = 3$).

Table 3-2. Effects of shading treatment on vine growth, flowering, and fruit set in passion fruit ‘Ruby Star’^z.

Shading treatment	Vine length (cm)	Node length (cm)	No. of leaves per plant	SPAD index	Leaf area (cm ²)	No. of flower buds per plant	No. of flowers per plant	Percentage of fruit set ^y
Control (0%) ^x	604.2 c ^w	9.7 b	61.3 c	47.6 a	205.3 b	55.3	12.3 ab	100.0
Low (31.8%)	630.4 bc	10.2 a	61.7 bc	46.0 ab	215.6 b	57.0	15.0 a	100.0
Middle (43.4%)	638.3 b	10.2 a	63.3 ab	44.5 b	221.3 b	56.0	13.7 ab	100.0
Heavy (63.7%)	674.9 a	10.4 a	65.0 a	43.7 b	260.8 a	49.3	11.3 b	88.9

^z These values were obtained at the end of the experiment.

^y Fruit set was estimated when the ovary length was twice as long as the flowering length.

^x Shading level.

^w Different letters within the column indicate significance by Tukey’s test at $p < 0.05$ ($n = 3$).

Table 3-3. Effects of shading treatment on photosynthetic characteristics^z in passion fruit ‘Ruby Star’.

Shading treatment	Photosynthetic rate ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)			Transpiration rate ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)			Stomatal conductance ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		
	Jun.	Jul.	Aug.	Jun.	Jul.	Aug.	Jun.	Jul.	Aug.
Control (0%) ^y	8.0 c ^x	8.6 ab	6.8 a	2.0 d	1.8 b	2.2 b	0.17 c	0.19 a	0.45 a
Low (31.8%)	9.9 b	10.2 a	7.3 a	2.9 b	2.2 a	2.8 a	0.29 b	0.19 a	0.39 ab
Middle (43.4%)	9.8 b	8.4 b	6.9 a	2.5 c	1.6 b	2.8 a	0.21 bc	0.15 b	0.38 b
Heavy (63.7%)	10.6 a	9.8 ab	4.0 b	3.5 a	1.8 b	2.4 ab	0.47 a	0.17 ab	0.25 c

^z Chamber temperature: 30°C, PPFD: 1,200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, CO₂ concentration: 380 ppm, air flow: 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$.

^y Shading level.

^x Different letters within the column indicate significance by Tukey’s test at $p < 0.05$ ($n = 3$).

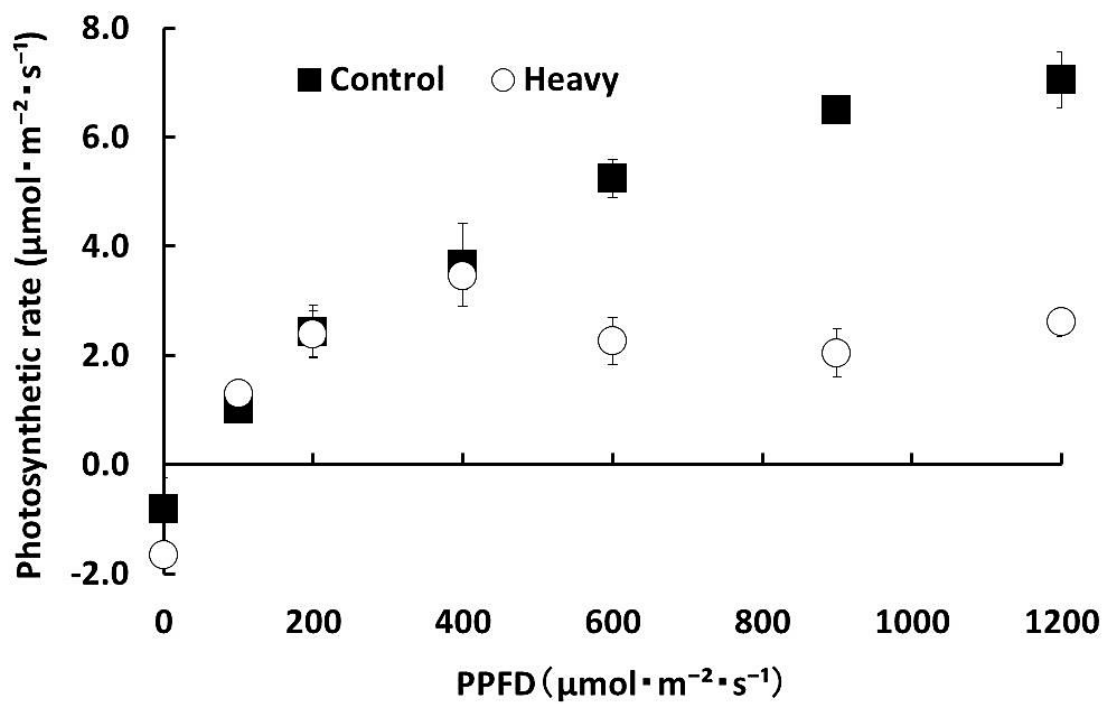


Fig. 3-5. Curves of the photosynthetic rate in response to the PPFD for passion fruit at two shading treatment (control and heavy), 15th weeks after started study. Data are presented as means \pm SE (n = 3).

Table 3-4. Effects of shading treatment on fresh and dry weights of each plant part in passion fruit ‘Ruby Star’.

Shading treatment	Fresh weight ^z (g/plant)			Dry weight (g/plant)		
	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root
Control (0%) ^y	374.6	204.6	162.4 a ^x	110.2 a	48.9	20.1
Low (31.8%)	360.6	207.6	129.3 ab	98.5 b	52.1	18.4
Middle (43.4%)	382.1	202.9	138.1 ab	104.9 ab	47.9	19.6
Heavy (63.7%)	351.5	201.8	91.8 b	77.3 c	51.6	14.2

^z Date of sampling: Aug. 21, 2014.

^y Shading level.

^x Different letters within the column indicate significance by Tukey’s test at $p < 0.05$ ($n = 3$).

Table 3-5. Effects of shading treatment on fruit quality in passion fruit ‘Ruby Star’.

Shading treatment	Maturation (days)	Fruit			Peel weight ^z (g)	No. of seeds per fruit		Juice content ^y (%)	TSS (°Brix)	TA (%)	Sugar/acid ratio
		Length (mm)	Diameter (mm)	Weight (g)		Perfect	Imperfect				
Control (0%) ^x	69.2 b ^w	69.6 ab	59.5 a	92.1 a	34.3 ab	234.8 a	5.9 b	57.8 a	17.5	3.1 b	5.6 a
Low (31.8%)	69.5 b	71.2 a	60.4 a	90.2 a	35.0 ab	227.7 a	7.3 b	56.1 ab	17.8	3.0 b	5.9 a
Middle (43.4%)	69.2 b	70.7 ab	59.6 a	88.2 a	35.6 a	216.2 a	18.2 b	54.6 bc	17.7	3.1 b	5.7 a
Heavy (63.7%)	72.2 a	68.7 b	57.6 b	76.0 b	32.4 b	179.9 b	38.1 a	52.7 c	17.6	3.4 a	5.2 b

^z Peel weight = peel + albedo.

^y Juice content = (fruit weight - peel weight - seed weight)/fruit weight × 100.

^x Shading level.

^w Different letters within the column indicate significance by Tukey’s test at p < 0.05 (n = 3).

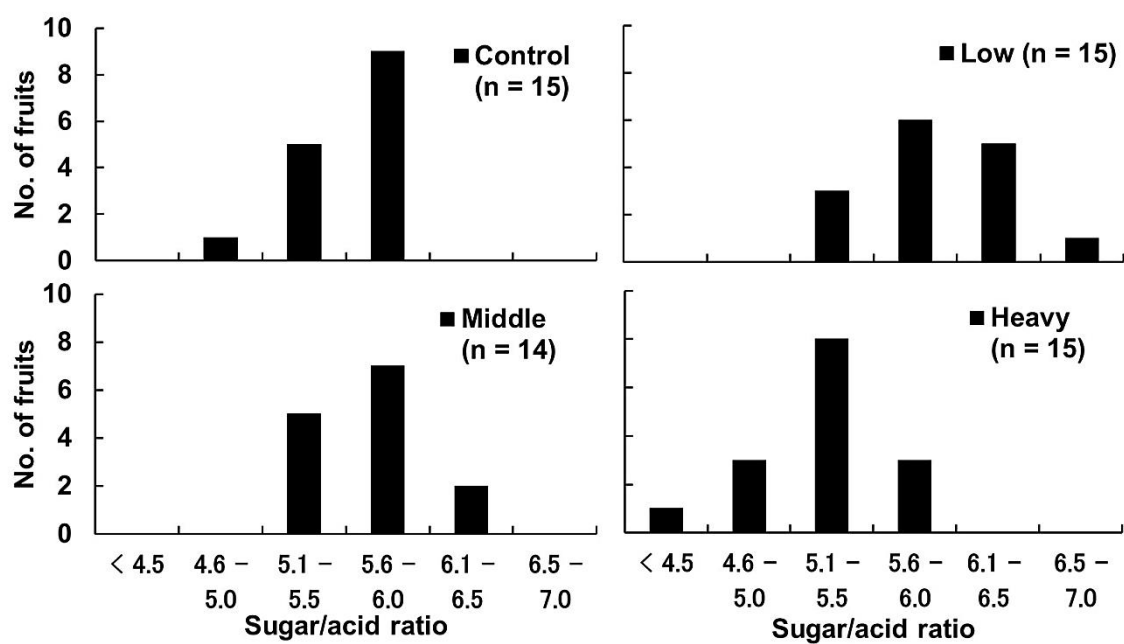


Fig. 3-6. Effects of shading treatment on relationships between sugar/acid ratio and number of fruits in passion fruit 'Ruby Star'.

Table 3-6. Effects of shading treatment on peel color in passion fruit ‘Ruby Star’.

Shading treatment	L *	a *	b *
Control (0%) ^z	30.4 ± 0.5 ^y	8.1 ± 0.6	25.0 ± 1.6
Low (31.8%)	28.4 ± 1.0	8.9 ± 1.1	24.4 ± 0.6
Middle (43.4%)	27.9 ± 0.9	7.8 ± 0.8	22.6 ± 0.5
Heavy (63.7%)	28.0 ± 0.6	7.7 ± 0.9	22.8 ± 0.5

^z Shading level.

^y The values are the means ± SE (n = 15, 15, 14, 15).

第4章 水管理がパッションフルーツの樹体生育および果実品質に及ぼす影響

緒 言

第1章ではパッションフルーツの光合成，第2章では果実の成熟期にそれぞれ最適な温度環境を解明した．第3章では赤外光を遮蔽する遮光ネットを用いることによって，遮光による避陰反応および陰葉化を起こさず果実品質を向上させる高温対策法を示した．第3章までにおいて，環境条件として重要な温度・光条件は解明したので，この章はパッションフルーツ栽培に最適な土壤水分の解明を目的として実施した．

パッションフルーツは浅根性であるため，土壤の過湿および乾燥による影響を受けやすく，土壤水分が過剰になると根腐れが発生し，樹体生育は抑制される（Roan・Cheng, 1986）．極端な乾燥状態では樹体生育や花芽形成が抑制され，結実率が低下する（Menzel ら, 1986; Staveley・Wolstenholme, 1990）．しかし，これらの研究では過湿および乾燥状態における果実品質については検討されておらず，特に過湿状態における開花や結実，光合成特性など不明な点が多い．Macha ら（2006）は沖縄県石垣市において，冬期の昼温 27.3℃，夜温 20.7℃ならびに高い土壤水分（平均 18%）が，パッションフルーツ果実の酸含量を低下させたことを報告している．しかし，我が国におけるパッションフルーツの栽培は春から夏の高温期間で生育が旺盛な時期であり，この時期の栽培に最適な土壤水分環境は解明されていない．

そこで本研究では，パッションフルーツ栽培における適切な土壤水分環境を解明し，高品質果実の安定生産のための知見を得るため，種々の湿潤および乾燥条件処理を行い，パッションフルーツの樹体生育および果実品質に及ぼす影響について検討した．

材料および方法

1. 植物材料の育成

2014 年の研究には，鹿児島大学農学部附属農場唐湊果樹園（鹿児島市）の無加温ビニルハウスで生育させたパッションフルーツ‘サマークイーン’（*P. edulis* × *P. edulis* f. *flavicarpa*）の 1 年生挿し木苗を供試した．2013 年 8 月に挿し木を行い，ミスト室で発根させ，10 月に鉢上げを行った．その後，茎長約 20 cm に育った苗を 2014 年 2 月に黒土，ぼら土細粒，ぼら土中粒，バーミキュライト，牛糞堆肥，バーク堆肥，苦土石灰およびようりん＝5：1：1：1：1：1：0.025：0.025 とチアメトキサム粒剤（シンジェンタジャパン（株））少量を混合した用土を充填した 8 号ポリ鉢に鉢替えを行い，第 4-1 図に示した仕立て方で生育させ，無加温ビニルハウス内で実験を行った．なお，発生した腋芽は適宜除去した．

2015 年も 2014 年と同品種の 1 年生挿し木苗を供試した．2014 年 8 月に挿し木を行い，ミスト室で発根させ，10 月に鉢上げを行った．その後，2015 年 1 月に前年と同様の方法で鉢替えおよび生育・管理を行った．

2. 試験区

2014 年の処理区は乾燥区，標準区および湿潤区の 3 区とし，生育の揃った個体から無作為に選んだ各区 15 鉢に対して，5 月 2 日から 8 月 15 日までそれぞれ 1 回・1 鉢当たり 250 mL，500 mL および 1,000 mL を標準区の地表面が乾いた際にビーカーを用いて徐々に灌水する処理を行った．各月の灌水回数は，5 月に 17 回，6 月に 21 回，7 月に 25 回，8 月に 12 回であった．各処理区の 15 鉢は樹体生育，開花・結実および果実品質調査用として，それぞれ 5 鉢ずつに分けた．

2015 年の処理区は標準区，前期乾燥区，後期乾燥区および全期間乾燥区（以下乾燥区とする）の 4 区とした．生育の揃った個体について 5 月 1 日か

ら 8 月 14 日までそれぞれ処理を行った。標準処理は 500 mL, 乾燥処理は 250 mL を標準区の地表面が乾燥したときにビーカーを用いて徐々に灌水した。各月の灌水回数は, 5 月に 17 回, 6 月に 15 回, 7 月に 26 回, 8 月に 18 回であった。前期乾燥区は試験開始から第 7 週 (着果後約 20 日) まで乾燥処理を行い, それ以降は標準処理を行った。後期乾燥区は第 8 週 (着果後約 30 日) まで標準処理を行い, それ以降乾燥処理を行った。乾燥区は試験開始から終了時点まで乾燥処理を行った。各処理区の 15 鉢は樹体生育, 開花・結実および果実品質調査用として, それぞれ 5 鉢ずつに分けた。

3. 栽培方法

2014 年には肥料として, 1,000 倍希釈した 500 mL の液体肥料 (タンクミックス A・B, OAT アグリオ (株)) (A : B = 1 : 1) を週 1 回灌水の代わりとして施用した。施用した液体肥料の成分組成は 1 L 中に N : 180 mg, P : 130 mg, K : 350 mg, Mg : 35 mg, Ca : 110 mg, Mn : 18 mg, B : 18 mg, Fe : 2 mg, Cu : 0.003 mg, Zn : 0.009 mg, Mo : 0.003 mg で, 8 号鉢当たりの総 N 施肥量は約 1.4 g であった。乾燥処理は, 1 回に 250 mL の灌水のため, 週 2 回に分けて液体肥料を施用した。樹体生育調査用は, 花芽調査後に摘蕾し, 開花させなかった。開花・結実調査用は, 受粉した花の結実を確認した後に摘果した。また, 花柱が直立または柱頭が葯に接触および接近していない花 (不完全花) も摘花した。果実調査用は, 処理開始から第 7 週目に摘心し, 葉果比を 10 に揃えた。気温はデータロガー (TR-52, (株) ティアンドデイ) で 30 分ごとに記録した。

2015 年には肥料として, 1,000 倍希釈した 500 mL の液体肥料 (タンクミックス A・B, OAT アグリオ (株)) (A : B = 1 : 1) を週 1 回灌水の代わりとして施用した。乾燥処理は, 1 回に 250 mL の灌水のため, 週 2 回に分けて液体肥料を施用した。また, 緩効性肥料 (尿素複合バーディラージ, ジェ

イカムアグリ（株）（10-10-10） $20\text{ kg} \cdot 10\text{ a}^{-1}$ を処理開始時，5 週後，10 週後の 3 回に分けて施用し，8 号鉢当たりの総 N 施肥量は約 2.3 g であった．樹体生育，開花・結実および果実品質調査用の栽培方法および気温の記録は 2014 年と同様に行った．

4. 生育，土壌 pF および開花・結実調査

2014 年は 5 月 2 日から 8 月 15 日，2015 年は 5 月 1 日から 8 月 14 日まで伸長量，葉数，葉色（SPAD 値）および花芽数を毎週 1 回調査した．SPAD 値の測定には葉緑素計（SPAD-502，コニカミノルタ（株））を用いた．土壌 pF の調査は，ポータブル土壌 pF/EC 計（PFC-42，（株）藤原製作所）を用いて処理開始 4 週目から測定を始めた．2014 年は 5 月 29 日～8 月 11 日，2015 年は 5 月 27 日～8 月 12 日の間，毎週 1 回測定した．ポータブル土壌 pF/EC 計のセンサは土壌中に 24 時間以上埋没させ，さらに水により土とセンサを密着させることで測定値が安定する．そのため，測定する際は前日の午前中にセンサを土壌表面下約 10 cm に埋没後灌水し，翌日の午前中に pF を測定した．しかし，2015 年の処理 12，13 週目はセンサの値が安定しなかったため測定できなかった．開花数は毎日確認し，人工受粉を行った．結実率は，受粉後子房の長径が開花時の 2 倍の大きさになっているものを結実とし， $(\text{結実数} / \text{受粉数}) \times 100$ で算出した．また，2015 年には開花した花の長径も調査した．

5. 光合成特性

光合成速度，蒸散速度，気孔コンダクタンスは光合成蒸散測定装置（LCpro+，ADC Bioscientific）を用いて毎月測定した．測定は晴天日の 9：00 から 13：00 までの間に行い，2014 年は 6 月 25 日，7 月 16 日および 8 月 7 日，2015 年は 6 月 1 日，7 月 18 日および 8 月 11 日に行った．チャンバー温度は 2014 年には 30°C ，2015 年には 28°C ， CO_2 濃度は 380 ppm ，光合成有効光量子束

密度 (PPFD) は $1,200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 流量は $200 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ とした. 各測定日の測定時間帯の平均気温は, 2014 年 6 月, 7 月および 8 月でそれぞれ 29.5°C , 31.6°C および 30.6°C , 2015 年 6 月, 7 月および 8 月でそれぞれ 27.7°C , 31.6°C および 34.4°C であった. 灌水は, 光合成特性を測定する前日の午後に行った.

6. 土壌水分量および部位別炭水化物含量の測定

植物体の解体は, 2014 年 8 月 15 日および 2015 年 8 月 14 日に行った. 各処理区の生育調査用植物体は 5 個体ずつ葉, 茎および根に分けて解体し, 部位別新鮮重の測定後, 80°C で 2 日間通風乾燥し, 乾燥重を秤量した. 同時に, 用土を 100 g 以上採取し秤量した. その後 1 か月風乾し, 再度秤量後土壌水分量を算出した. 算出方法は, 土壌水分量 (%) = (採取時土壌重量 - 風乾後土壌重量) / 採取時土壌重量 $\times 100$ とした. 植物体の炭水化物含量の測定は, 葉, 茎および根の乾燥粉末 0.5 g から 80% エタノール抽出により糖を抽出し, その残渣から過塩素酸抽出によりデンプンを抽出した. 全糖含量およびデンプン含量はソモギネルソン法により定量した.

7. 果実品質

果実品質については, 受粉後から自然落果するまでの日数を記録し, 自然落果した果実については収穫当日に縦径, 横径, 果実重, 種子数 (完全種子, 不完全種子), 果汁含量, 糖度 (TSS), 滴定酸度 (TA), 糖酸比 (TSS/TA), 果皮色および果皮のアントシアニン含量を調査した. 果実重は果梗枝を除去してから測定した. 果汁はガーゼで仮種皮および種子を包み, 手搾りジュースァーで搾汁した. 糖度は屈折糖度計 (PAL-1, (株) アタゴ) で測定し, $^{\circ}\text{Brix}$ で表した. 滴定酸度の測定は 0.156 N-NaOH による中和滴定法で行い, クエン酸 % で表した. 果皮色は赤道部 3 か所について簡易型分光色差計 (NF333, 日本電色工業 (株)) で測定し, $L^*a^*b^*$ 表色系の L^* (値が大きいほど明るい), a^* (値が大きいほど赤みが増す) および b^* (値が小さいほど青みが増す) を

求めた．カミソリで表面を薄く削った果皮（厚さ約 0.24 mm）をアントシアニン含量測定の方法とした．アントシアニン含量は，果皮 0.5 g に 1% 塩酸 - メタノール 5 mL を加え，4℃・暗黒下で 24 時間抽出し，分光光度計（Gene Spec V，日立計測器サービス（株））で 530 nm の吸光度を計測した．なお，測定値はシアニジン-3-グルコシド当量に換算して示した．

8. 統計処理

得られたデータは，処理による有意な影響の有無を一元配置の分散分析により確認し，Tukey の多重検定により統計解析を行い，土壌水分量および結実率についてはアークサイン変換後に統計解析を行った．また，2015 年の果実の成熟日数と果皮色（ a^* ）との関係（第 4-3 図）について無相関検定を行った．

結 果

1. 2014 年

栽培期間中の土壌 pF は，標準区で pF1.8～2.2，乾燥区で pF2.1～2.6 および湿潤区で pF1.3～1.9 で推移した（第 4-2 図）．試験終了時における各処理区の土壌水分量は，標準区で 18.6%，乾燥区で 10.5%，湿潤区で 37.7% であった（第 4-1 表）．累積伸長量および葉数は乾燥区および湿潤区で抑制された．SPAD 値は，乾燥区で最も高く，湿潤区で最も低かった．花芽数は乾燥区および湿潤区で抑制された．開花期間は，標準区で 5 月 26 日～6 月 10 日および 7 月 6 日～7 月 11 日，乾燥区で 6 月 3 日～6 月 12 日および 7 月 6 日～7 月 12 日，湿潤区で 5 月 25 日～6 月 11 日および 7 月 6 日～7 月 19 日であった．総開花数は処理区間で差がなかった．結実率は乾燥区で 54.8% と最も高く，標準区が 34.0%，湿潤区が 20.6% であった（第 4-2 表）．光合成速度，蒸散速度および気孔コンダクタンスは，乾燥区では 6 月に標準区より低

くなったが、7月には標準区との差はなくなった。8月には湿潤区の光合成速度および蒸散速度が最も低かった(第4-3表)。葉の新鮮重は標準区で299.9 gと最も重く、乾燥区で186.4 gと最も軽くなり、茎では処理区間で差がなかった。根は標準区で173.0 gと最も重く、湿潤区で84.6 gと最も軽かった。葉および根の乾燥重は新鮮重と同様の結果となり、茎でも処理区間で有意差が見られ、標準区で重く、乾燥区および湿潤区で軽かった(第4-4表)。部位別の全糖濃度は、処理区間で差は認められなかったが、デンプン濃度は処理区間で差が認められた。葉では標準区で最も高く、次いで湿潤区、乾燥区で最も低かった。茎では標準区および湿潤区で高く、乾燥区で低かったが、根では標準区および乾燥区で高く、湿潤区で低かった(第4-5表)。

果実品質については、成熟日数が乾燥区で標準区より長く、湿潤区で標準区より短くなった。乾燥区の果実は標準区よりも直径が小さく果皮は軽かったが、果汁含量および種子数に処理区間での有意差は認められなかった。糖度は標準区で17.4°と最も高く、乾燥区で16.4°と最も低かったが、滴定酸度および糖酸比は処理区間に差はなかった(第4-6表)。果皮色(L*, a*, b*)およびアントシアニン含量は処理区間に差はなかった(第4-7表)。

2. 2015 年

栽培期間中の土壌 pF は、標準区で pF1.9~2.4、乾燥区で pF2.1~2.8 で推移した。前期乾燥区は乾燥処理期間中に pF2.2~2.7、乾燥処理終了後は pF2.1~2.4 で、後期乾燥区は乾燥処理前が pF1.9~2.3、乾燥処理開始後は pF2.5~2.7 で推移した(第4-2図)。試験終了時における各処理区の土壌水分量は、標準区で19.5%、前期乾燥区で19.3%、後期乾燥区で9.6%、乾燥区で11.1%であった(第4-1表)。累積伸長量および葉数は後期乾燥区および乾燥区で著しく抑制された。SPAD 値は、前期乾燥区で最も高く、次いで乾燥区、標準区および後期乾燥区で低かった。花芽数は標準区で最も多く、次いで前期

乾燥区，後期乾燥区および乾燥区で少なかった．開花期間は，標準区で 5 月 24 日～6 月 3 日および 6 月 29 日～7 月 19 日，前期乾燥区で 5 月 24 日～6 月 6 日および 6 月 17 日～7 月 13 日，後期乾燥区で 5 月 24 日～6 月 3 日，6 月 19 日～7 月 11 日および 8 月 3 日～8 月 4 日，乾燥区で 5 月 24 日～6 月 6 日および 6 月 17 日～7 月 13 日であった．総開花数は花芽数とは異なり後期乾燥区が 15.0 花と最も多く，標準区で 11.0 花と最も少なかった．結実率には，処理区間で有意差は認められなかった（第 4-2 表）．花の長径は，5 月 29 日～6 月 5 日（4～5 週）まで標準区および後期乾燥区で大きく，前期乾燥区および乾燥区で小さかった．6 月 17 日～6 月 24 日（7～8 週）には標準区では開花せず，他の処理区間の花の長径に有意差はなかった．6 月 28 日～7 月 13 日（9～11 週）では，前期乾燥区で 77.8 mm と最も大きく，乾燥区で 75.6 mm と最も小さかった．子房の長径も花の長径と同様の結果であった（第 4-8 表）．光合成速度，蒸散速度および気孔コンダクタンスは，6 月では処理区間で差はなかったが，7 月には標準区および前期乾燥区に比べ，後期乾燥区および乾燥区で著しく低かった．8 月には，後期乾燥区および乾燥区でさらに低下し，前期乾燥区でも標準区より低かった（第 4-3 表）．葉，茎および根の新鮮重はいずれの部位においても標準区および前期乾燥区で重く，後期乾燥区および乾燥区で軽かった．根の新鮮重は標準区の方が前期乾燥区より重くなった．葉および根の乾燥重は新鮮重と同様の結果となったが，茎は後期乾燥区および標準区で重く，乾燥区で 32.8 g と最も軽かった（第 4-4 表）．各部位別の全糖濃度は，葉および茎で処理区間に有意差が認められた．葉では標準区で高く，乾燥処理を行った区で低かった．茎では乾燥区で最も高く，次いで標準区，前期乾燥区および後期乾燥区で低かった．デンプン濃度は部位，処理区間で差が認められた．葉では，標準区および前期乾燥区で高く，後期乾燥区および乾燥区で低かった．茎では，乾燥区で最も高く，次いで後

期乾燥区，前期乾燥区，標準区で最も低かった．根では，乾燥区で他の処理区よりも高かった（第 4-5 表）．

果実品質については，成熟日数では処理区間に差は認められなかったが，果実は前期乾燥区および乾燥区で標準区より小さく，果汁含量も乾燥区で 28.9 g と最も少なかった．しかし，種子数には処理区間で差はなかった．糖度は標準区で他の処理区よりも高く，乾燥区で 15.9° と最も低かった．滴定酸度は標準区および前期乾燥区で高く，乾燥区で 3.2% と最も低かった．糖酸比は処理区間で差は認められなかった（第 4-6 表）．果皮色においては，L* 値および b* 値で前期乾燥区が最も高く，後期乾燥区で前期乾燥区より低く，乾燥区で標準区および前期乾燥区より低かった．a* 値では処理区間に有意差は認められなかったが，果皮のアントシアニン含量は後期乾燥区および乾燥区で多く，標準区および前期乾燥区で少なかった（第 4-7 表）．

考 察

パッションフルーツに対して，土壌の湿潤あるいは乾燥処理を行った結果，樹体生育および果実品質に及ぼす影響は両者で大きく異なった．土壌 pF1.5 前後で，土壌水分量が約 37% の湿潤な土壌はパッションフルーツの樹体生育を抑制し，果実品質を低下させた．湿潤区では，累積伸長量，葉数，SPAD 値，花芽数および光合成速度が低下した（第 4-2 表，第 4-3 表）．特に処理 10 週目以降の伸長量，SPAD 値，光合成速度の低下が顕著であった（データ省略）．根の新鮮重および乾燥重，根のデンプン含量も低下しており（第 4-4 表，第 4-5 表），それは実験終了後に確認された根腐れによるものと推察された．パッションフルーツでは，湛水処理 4～8 日後に葉の黄化が始まり，処理 20 日後には根腐れを示す（Roan・Cheng, 1986）．本研究においても，湿潤区のすべての個体は葉の黄化および根腐れを起こしていた．このことから

ら、本試験で用いた土壌においては、土壌 pF1.5 以下、約 37% の土壌水分量によって根腐れが発生し、養分吸収の抑制および光合成速度が低下して樹体生育が抑制されたと推察される。他の果樹や果菜類の耐湿性については以下の知見がある。リンゴにおいては、土壌が最大容水量の 80~75% (約 pF1.4~1.7) の湿潤状態で最も樹体生育が優れ (熊代・建石, 1967), カンキツでも土壌 pF1.0 の多湿区で最も樹体生育が優れた (鈴木ら, 1969)。土壌水分含量約 40% の粘土質土壌で栽培したトマトには光合成速度の低下は確認されなかった (Bhattarai ら, 2006) が、土壌水分含量 30~35% の土とバークを等量混合した土壌では、植物体生育が抑制された (鐘・加藤, 1988)。これらのことから、パッションフルーツはリンゴやカンキツよりも耐湿性が弱く、トマトとは同程度かやや弱い可能性がある と推察された。

湿潤区の果実品質は標準区と差はほとんどなかったが、成熟日数が短くなり果皮が緑色で収穫 (落果) した果実が多かった。メロンでは、土壌 pF1.5 以下の湿潤状態で生育および葉身光合成能が抑制される (後藤ら, 2005)。本研究の湿潤区では 8 月に光合成速度が低下し、SPAD 値も低下したことから、果実の成熟に必要な炭水化物が不足し、早期落果につながった可能性が考えられた。しかし、2015 年の乾燥区では光合成速度が低下したにも関わらず早期落果は認められなかった。そのため、光合成速度の低下による炭水化物不足だけが落果の原因とは考えられない。早期落果の要因については、エチレンの発生 (持田・板村, 2007) など他の要因も知られているので、この点については総合的に検討する必要がある。

一方、土壌 pF2.5 前後で、土壌水分量が約 10% の乾燥した土壌は、パッションフルーツの樹体生育および果実品質を低下させただけでなく向上の効果も確認された。すなわち、乾燥ストレスは累積伸長量、葉数および花芽数を低下させた (第 4-2 表)。この点に関して、土壌乾燥がパッションフル

ーツの樹体生育および花芽形成を抑制することは既に報告されている (Menzel ら, 1986 ; Staveley・Wolstenholme, 1990). 一方, SPAD 値および結実率は前期乾燥区および乾燥区により高くなる傾向にあった(第 4-2 表). ジャガイモでは乾燥により葉のクロロフィル含量が増加したとされ (Ghosh ら, 2000), パッションフルーツでも乾燥により葉色が濃くなることが報告されている (Menzel ら, 1986 ; Staveley・Wolstenholme, 1990). ポンカンでは, 乾燥により樹高および花芽数は抑制されるが結実率は向上したとされ (Mataa ら, 1998), パッションフルーツにおいても乾燥処理により結実率は向上する傾向にあった (第 4-2 表).

乾燥区の光合成速度は, 2014 年は 6 月に低下したものの, その後回復し標準区と差はなくなった. ブルーベリーでは, 乾燥後に再灌水しても光合成速度は回復しない (堀内ら, 2011). しかし, パッションフルーツでは一旦乾燥させても灌水をすることで光合成速度が回復したと報告されている (Turner ら, 1996). 本研究においても灌水は, 少量ではあるが継続して行っていたため, 光合成速度が維持されたと考えられる. これらのことから, パッションフルーツは比較的乾燥に強いと思われる. 一方, 2015 年は 6 月に処理区間での差はなかったが, 7 月以降になると後期乾燥区および乾燥区で光合成速度, 蒸散速度および気孔コンダクタンスが著しく低下した. このように, 7 月以降に気孔閉鎖によって後期乾燥区および乾燥区の光合成速度が著しく低下したのは, 前年の土壤水分状態が pF 約 2.5 であったのに対して, 2015 年には pF 約 2.7 と乾燥の程度がやや強かったことによるものと考えられる. 土壤 pF2.7 は下層からの水の供給が途絶える毛管連絡切断点に当たり (渡辺ら, 2012), このことによって吸水が抑制され光合成速度が低下したと思われる. 2014 年よりも 2015 年で乾燥の程度がやや強くなった要因としては, 両年における気象条件の違いが影響したものと考えられた. 2015

年は 2014 年よりも 7 月以降試験終了までの平均気温が 0.7℃ 高く（データ省略）、日照時間も 69.0 時間長かったため（気象庁データベース, 2014・2015）、水分の蒸発散がより多くなった可能性がある。

葉の新鮮重および乾燥重は後期乾燥区および乾燥区で軽くなった。また、2015 年では乾燥処理により標準区に比べて根の新鮮重および乾燥重が軽くなったが、2014 年では標準区と有意差は認められなかった（第 4-4 表）。乾燥処理区で新鮮重および乾燥重が軽くなった原因は、光合成速度の低下にあると思われる。パパイアでは乾燥重と光合成速度との間には正の相関があるとされており（de Lima ら, 2015）、乾燥処理により光合成速度が低下し、光合成産物の転流や蓄積が不十分となったことで乾燥重が軽くなったと考えられる。カンキツでは、葉や根にデンプンが多く蓄積すると着花が良好になるとされている（武藤ら, 2010）。本研究においても、葉のデンプン含量が多かった標準区および前期乾燥区では花芽数が多かった（第 4-2 表）。一般に植物は乾燥ストレスに遭遇した場合、浸透圧調節機能によりデンプン合成から糖の合成へと炭水化物代謝が変化すると考えられている（Meyer・Boyer, 1981）。標準区および前期乾燥区では葉のデンプン含量が全糖含量よりも多かったのに対して、後期乾燥区および乾燥区における葉のデンプン含量は、葉の全糖含量よりも少ないか同程度であった（第 4-5 表）。このことから、パッションフルーツでは、乾燥ストレスを受けることにより浸透圧調節機能が働き、デンプン合成から糖合成へと炭水化物代謝が起こると考えられ、特に葉での代謝が活発になることが示唆された。

果実品質については、前期乾燥区および乾燥区で成熟日数が長く、果実が小さく、果汁含量が減少する傾向にあった。糖度は乾燥処理により著しく低下した。滴定酸度は 2014 年では処理区間に差はなかったが、2015 年には乾燥区で減少した（第 4-6 表）。果皮色は 2014 年では標準区と差はなかったが、

2015 年には前期乾燥区で果皮色が劣り，後期乾燥区および乾燥区で果皮色が良好であったが（第 4-7 表），果皮の萎凋が観察された．乾燥ストレスによって，多くの果樹や果菜類では果実が小さくなり，糖度や酸度などが上昇し，果皮色も良好となるとされている（岩崎ら，2011a；熊代・建石，1967；圖師ら，2005）．パッションフルーツでも土壤乾燥により成熟が遅延し果実が小さくなった．一方で，滴定酸度は低く，果皮色が一部良好となったが，糖度は顕著に低下した．2015 年には花および子房の長径を測定した．その理由としては，2014 年の乾燥区の花が他の処理区に比べ小さい印象を受けたためである．その結果，花および子房の長径は乾燥処理によって抑制されることがわかり（第 4-8 表），パッションフルーツにおいて乾燥ストレスにより果実が小型化するのには，開花時の花および子房が小さくなるためである可能性が考えられた．しかし，本研究では収穫果実の花および子房の大きさを測定せず，果実肥大についても未測定であったため，この点については今後の検討課題である．乾燥ストレスによる糖度の低下はセイヨウナシ（Marsal ら，2000）で，酸度の低下はブドウ（Niculcea ら，2014）で報告されている．しかし，糖度と酸度ともに低下したという報告はない．乾燥ストレスでは，気孔閉鎖による蒸散の低下によって樹体温度や葉温が上昇する（Garcia-Tejero ら，2012；Karimi ら，2015）．そのため，乾燥ストレスがある場合，同時に高温ストレスも生じている可能性を考慮する必要がある．パッションフルーツでは高温による糖度および酸度の低下（Utsunomiya, 1992），高温乾燥による糖の蓄積の遅れ（Macha ら，2006）や高夜温による着色不良（Kozai ら，2007）などが報告されている．本研究では乾燥ストレスによって光合成速度，蒸散速度および気孔コンダクタンスの低下が見られたため，光合成産物の減少に加え，気孔閉鎖や蒸散の低下による植物体温度，葉温や果実温度の上昇による高温ストレスが付与され，より一層の糖度および酸度

の低下や着色不良が起きた可能性が考えられた。しかし，後期乾燥区および乾燥区では着色が良好であった。そこで，2015 年の果実の成熟日数と果皮色（ a^* ）との間に関係があるかについて確認したところ，成熟日数が長くなるにつれて果皮色が良好になる傾向にあった（第 4-3 図）。また，標準区に比べ乾燥処理区でその傾向が強く，成熟日数の遅延により果皮色が良好になったと考えられた。

これらのことから，パッションフルーツにおいて乾燥ストレスは樹体生育や花芽分化を抑制し，果実の成熟を遅延させ，小果で糖度の低い果実を生産することが明らかになった。さらに，乾燥ストレスを付与する時期によっては反応に違いがあることもわかった。栽培前期（着果後約 20 日まで）の乾燥ストレスは，花および子房を小さくし小果になるが，SPAD 値や結実率が向上した。栽培後期（着果後約 30 日以降）の乾燥ストレスでは，樹体生育や花芽分化を著しく抑制し植物体のデンプン含量は少なくなったが，果皮の着色を良好にした。

以上のことから，パッションフルーツ栽培において土壌 pF1.5 以下，土壌水分量 37%以上の湿潤条件は，樹体生育を抑制して果実品質の低下を招くため，栽培期間中は避ける必要がある。土壌 pF2.4～2.7，土壌水分量 10%以下の乾燥条件は樹体生育を抑制するが，着果後約 20 日までは結実率の向上，着果後約 30 日以降では減酸や着色の向上につながると考えられる。しかし，乾燥により果実の小型化や糖度の低下が発生するため，乾燥処理は適期に短期間とする必要がある。しかし，本研究では植物体内における水分ストレスの指標である葉内最大水ポテンシャル（LWP）（間苧谷・町田，1980）を測定しておらず，土壌水分と植物体の乾燥ストレスとの関係は未検討である。今後は，土壌水分と LWP との関係を詳細に把握し，樹体生育および果実品質ともに向上させる土壌水分管理条件を解明していく必要がある。



Fig. 4-1. Cultivation method of passion fruit adopted in the present study.

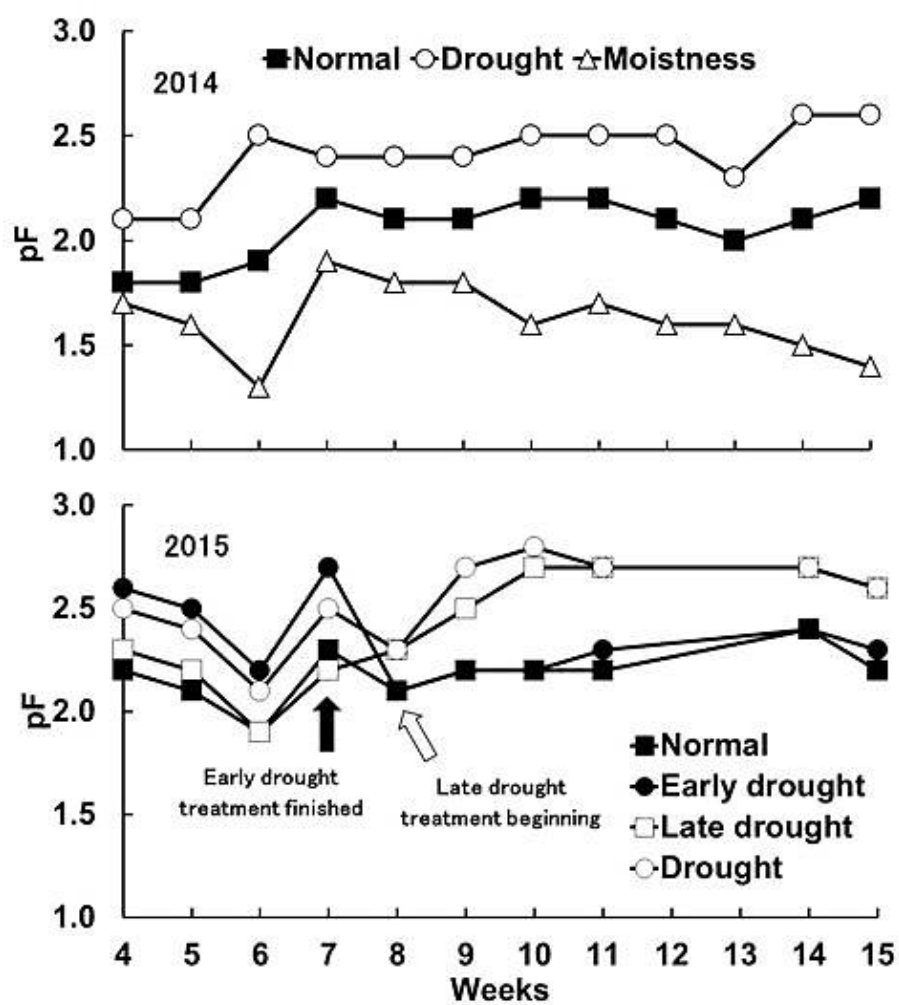


Fig. 4-2. Soil pF level during the cultivation period.

Table 4-1. Soil water content of each treatments in passion fruit ‘Summer Queen’.

Year	Treatment	Soil water content ^z (%)
2014	Normal (pF 1.8-2.2)	18.6 b ^y
	Drought (pF 2.1-2.6)	10.5 c
	Moistness (pF 1.3-1.9)	37.7 a
2015	Normal (pF 1.9-2.4)	19.5 a
	Early drought ^x	19.3 a
	(pF 2.2-2.7, 2.1-2.4)	
	Late drought ^w	9.6 c
	(pF 1.9-2.3, 2.5-2.7)	
	Drought (pF 2.1-2.8)	11.1 b

^z Date of sampling: Aug. 15, 2014 and Aug. 14, 2015.

^y Different letters within the column indicate significance by Tukey’s test at $p < 0.05$ ($n = 3$).

^x Duration of early drought treatment: 1 - 7 weeks.

^w Duration of late drought treatment: 8 - 15 weeks.

Table 4-2. Effects of water management on vine growth, flowering, and fruit set in passion fruit ‘Summer Queen’^{yz}.

Year	Treatment	Vine length (cm)	No. of leaves per plant	SPAD index	No. of flower buds per plant	No. of flowers per plant	Percentage of fruit set ^y
2014	Normal (pF 1.8-2.2)	424.0 a ^x	57.0 a	49.9 a	51.3 a	7.3	34.0 b
	Drought (pF 2.1-2.6)	303.7 b	47.3 b	55.9 a	42.3 b	7.7	54.8 a
	Moistness (pF 1.3-1.9)	309.7 b	46.7 b	41.8 b	40.7 b	10.3	20.6 b
2015	Normal (pF 1.9-2.4)	481.7 a	62.7 a	46.8 b	57.0 a	11.0 b	45.8
	Early drought ^w	411.3 b	57.3 a	53.7 a	51.3 b	14.3 ab	62.3
	Late drought ^v	320.6 c	47.3 b	44.1 b	44.7 c	15.0 a	51.1
	Drought (pF 2.1-2.8)	325.9 c	48.0 b	48.6 ab	46.0 c	12.7 ab	60.0

^z These values were obtained at the end of the experiment.

^y Fruit set was estimated when the ovary length was twice as long as the flowering length.

^x Different letters within the column indicate significance by Tukey’s test at $p < 0.05$ ($n = 3$).

^w Duration of early drought treatment: 1 - 7 weeks.

^v Duration of late drought treatment: 8 - 15 weeks.

Table 4-3. Effects of water management on photosynthetic characteristics^z in passion fruit ‘Summer Queen’.

Year	Treatment	Photosynthetic rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)			Transpiration rate ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)			Stomatal conductance ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)		
		Jun. ^y	Jul.	Aug.	Jun.	Jul.	Aug.	Jun.	Jul.	Aug.
2014	Normal (pF 1.8-2.2)	5.6 a ^x	6.4	6.5 a	1.3 a	1.3	1.6 ab	0.10 a	0.12	0.19
	Drought (pF 2.1-2.6)	2.8 b	5.2	4.9 ab	0.8 c	1.4	2.4 a	0.05 b	0.11	0.17
	Moistness (pF 1.3-1.9)	5.3 a	6.9	2.9 b	1.1 b	1.2	1.2 b	0.06 b	0.09	0.09
2015	Normal (pF 1.9-2.4)	8.4	5.4 a	10.1 a	2.1	1.9 a	3.5 a	0.21	0.21 a	0.33 a
	Early drought ^w (pF 2.2-2.7, 2.1-2.4)	7.2	6.0 a	8.0 b	2.3	1.6 a	2.6 b	0.16	0.13 a	0.21 b
	Late drought ^y (pF 1.9-2.3, 2.5-2.7)	7.7	1.3 b	0.4 c	2.5	0.5 b	0.6 c	0.22	0.03 b	0.03 c
	Drought (pF 2.1-2.8)	8.8	2.6 b	0.3 c	2.3	0.7 b	0.6 c	0.21	0.04 b	0.03 c

^z Chamber temperature: 30°C (2014) or 28°C (2015), PPFD: 1,200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, CO₂ concentration: 380 ppm, air flow: 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$.

^y Date of measuring: Jun. 25, Jul. 16, and Aug. 7 (2014). Jun. 1, Jul. 18, and Aug. 11 (2015).

^x Different letters within the column indicate significance by Tukey’s test at $p < 0.05$ ($n = 3$).

^w Duration of early drought treatment: 1 - 7 weeks.

^y Duration of late drought treatment: 8 - 15 weeks.

Table 4-4. Effects of water management on fresh and dry weights of each plant part in passion fruit ‘Summer Queen’.

Year	Treatment	Fresh weight ^z (g/plant)			Dry weight (g/plant)		
		Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root
2014	Normal (pF 1.8-2.2)	299.9 a ^y	144.1	173.0 a	90.2 a	32.5 a	33.6 a
	Drought (pF 2.1-2.6)	186.4 b	118.1	131.1 ab	51.1 b	26.7 b	31.2 a
	Moistness (pF 1.3-1.9)	271.7 ab	114.2	84.6 b	78.4 a	24.4 b	18.3 b
2015	Normal (pF 1.9-2.4)	325.1 a	198.6 a	156.8 a	87.3 a	48.0 a	20.7 a
	Early drought ^x (pF 2.2-2.7, 2.1-2.4)	331.0 a	187.6 a	123.8 b	83.3 a	43.5 ab	15.6 b
	Late drought ^w (pF 1.9-2.3, 2.5-2.7)	233.4 b	141.2 b	76.5 c	59.7 b	50.8 a	11.6 c
	Drought (pF 2.1-2.8)	250.7 b	135.7 b	73.8 c	57.1 b	32.8 b	11.4 c

^z Date of sampling: Aug. 15, 2014 and Aug. 14, 2015.

^y Different letters within the column indicate significance by Tukey’s test at $p < 0.05$ ($n = 3$).

^x Duration of early drought treatment: 1 - 7 weeks.

^w Duration of late drought treatment: 8 - 15 weeks.

Table 4-5. Effects of water management on carbohydrate concentration of leaf, stem, and root in passion fruit ‘Summer Queen’.

Year	Treatment	Total sugar (mg•g ⁻¹ DW)			Starch (mg•g ⁻¹ DW)		
		Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root
2014	Normal (pF 1.8-2.2)	80.1	34.7	70.6	174.1 a ^z	33.2 a	30.4 a
	Drought (pF 2.1-2.6)	61.7	39.0	65.7	58.7 b	22.6 b	32.9 a
	Moistness (pF 1.3-1.9)	64.9	33.1	48.9	104.6 a	33.5 a	10.5 b
2015	Normal (pF 1.9-2.4)	87.3 a	22.8 ab	37.1	120.8 a	30.8 c	39.5 b
	Early drought ^y (pF 2.2-2.7, 2.1-2.4)	65.2 b	15.6 b	32.6	114.1 a	32.2 bc	43.1 b
	Late drought ^x (pF 1.9-2.3, 2.5-2.7)	70.9 b	17.4 b	25.2	42.5 b	38.8 b	41.6 b
	Drought (pF 2.1-2.8)	62.6 b	29.7 a	39.0	61.6 b	50.4 a	56.1 a

^z Different letters within the column indicate significance by Tukey’s test at $p < 0.05$ ($n = 3$).

^y Duration of early drought treatment: 1 - 7 weeks.

^x Duration of late drought treatment: 8 - 15 weeks.

Table 4-6. Effects of water management on fruit quality in passion fruit 'Summer Queen'.

Year	Treatment	Maturation		Fruit		Peel weight ^z		No. of seeds per fruit		Juice content ^y (g)	TSS (°Brix)	TA (%)	Sugar/acid ratio
		(days)	Length (mm)	Diameter (mm)	Diameter (mm)	Weight (g)	(g)	Perfect	Imperfect				
2014	Normal (pF 1.8-2.2)	58.7 b ^x	67.7	61.1 a	87.8	39.0 a	172.5	0.7	45.2	17.4 a	3.6	4.8	
	Drought (pF 2.1-2.6)	69.0 a	57.9	51.6 b	52.9	19.2 b	131.2	4.4	31.5	16.4 b	3.6	4.5	
	Moistness (pF 1.3-1.9)	52.2 c	61.1	57.0 ab	76.1	42.2 a	127.6	2.4	31.3	16.9 ab	3.8	4.5	
2015	Normal (pF 1.9-2.4)	58.6	66.3 a	59.0 a	86.1 a	39.7 a	203.3	3.1	42.6 a	17.4 a	3.7 a	4.8	
	Early drought ^w (pF 2.2-2.7, 2.1-2.4)	62.6	59.2 b	53.6 b	65.9 bc	29.2 bc	163.4	4.9	33.7 ab	16.5 b	3.7 a	4.5	
	Late drought ^y (pF 1.9-2.3, 2.5-2.7)	60.1	66.0 a	58.3 a	76.7 ab	34.3 ab	211.5	4.4	38.4 ab	16.4 b	3.4 ab	4.9	
	Drought (pF 2.1-2.8)	63.3	57.7 b	52.2 b	55.8 c	24.2 c	151.5	4.6	28.9 b	15.9 b	3.2 b	5.1	

^z Peel weight = peel + albedo.

^y Juice content = fruit weight - peel weight - seed weight.

^x Different letters within the column indicate significance by Tukey's test at $p < 0.05$ (n = 6, 12, 5, 16, 17, 14, 10 (Normal - Drought)).

^w Duration of early drought treatment: 1 - 7 weeks.

^v Duration of late drought treatment: 8 - 15 weeks.

Table 4-7. Effects of water management on peel color in passion fruit ‘Summer Queen’.

Year	Treatment	L *	a *	b *	Total anthocyanin content (mg•g ⁻¹ FW)
2014	Normal (pF 1.8-2.2)	38.1	5.2	16.4	1.7
	Drought (pF 2.1-2.6)	39.8	7.2	17.4	1.1
	Moistness (pF 1.3-1.9)	46.1	- 5.0	25.4	0.4
2015	Normal (pF 1.9-2.4)	43.0 ab ^z	1.2	22.0 ab	0.7 b
	Early drought ^y (pF 2.2-2.7, 2.1-2.4)	45.0 a	- 1.8	24.8 a	0.5 b
	Late drought ^x (pF 1.9-2.3, 2.5-2.7)	35.2 bc	6.6	14.3 bc	1.8 a
	Drought (pF 2.1-2.8)	34.9 c	8.5	12.6 c	1.5 a

^z Different letters within the column indicate significance by Tukey’s test at $p < 0.05$ (n = 6, 12, 5, 16, 17, 14, 10 (Normal-Drought)).

^y Duration of early drought treatment: 1 - 7 weeks.

^x Duration of late drought treatment: 8 - 15 weeks.

Table 4-8. Effects of water management on flower and ovary diameter in passion fruit ‘Summer Queen’ (2015).

Treatment	Flower length (mm)				Ovary length (mm)			
	May 29-Jun. 5	Jun. 17-Jun. 24	Jun. 28-Jul. 13	May 29-Jun. 5	Jun. 17-Jun. 24	Jun. 28-Jul. 13		
	4-5 weeks	7-8 weeks	9-11 weeks	4-5 weeks	7-8 weeks	9-11 weeks		
Normal (pF 1.9-2.4)	75.2 a ^z	— ^y	76.7 ab	7.3 a	— ^y	7.1 ab		
Early drought ^x (pF 2.2-2.7, 2.1-2.4)	70.1 b	72.7	77.8 a	6.4 b	6.6	7.3 a		
Late drought ^w (pF 1.9-2.3, 2.5-2.7)	74.1 a	76.2	75.7 ab	7.3 a	7.3	7.1 ab		
Drought (pF 2.1-2.8)	70.7 b	74.2	75.6 b	6.6 b	6.8	7.0 b		

^z Different letters within the column indicate significance by Tukey's test at $p < 0.05$ (4-5 weeks: $n = 14, 13, 19, 12$.

7-8 weeks: $n = 18, 2, 17$. 9-11 weeks: $n = 28, 33, 35, 28$).

^y No flowering.

^x Duration of early drought treatment: 1 - 7 weeks.

^w Duration of late drought treatment: 8 - 15 weeks.

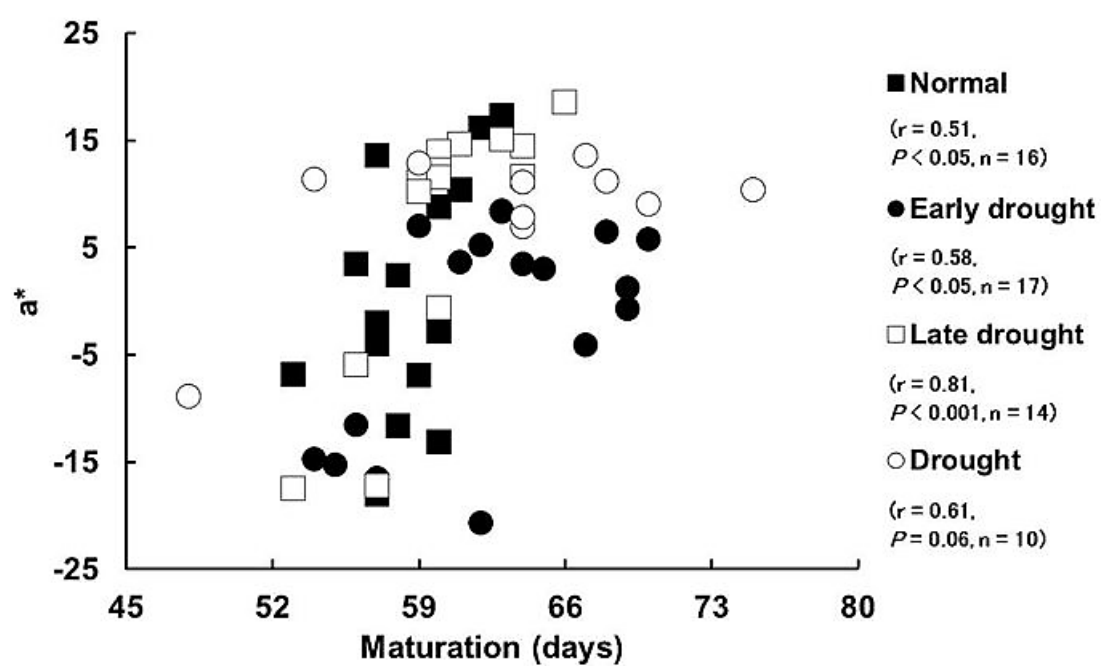


Fig. 4-3. Effects of water management on relationships between maturation days and fruit peel color in passion fruit 'Summer Queen' (2015).

第5章 総合考察

パッションフルーツは定植 1 年目から果実が収穫可能で、単価が約 1,000 円/kg と高く、ジュースやジャムなど加工品にも重宝され収益性も高い。そのため近年、鹿児島県や沖縄県などの亜熱帯および西南暖地だけではなく、岐阜県や三重県、千葉県、東京都八王子市など秋冬季に低温となる地域でも栽培され、全国的に注目され始めている。しかし、パッションフルーツは春から夏にかけての栽培が主であるため、梅雨時期は土壌が過湿になる傾向があり、立枯症や円斑病などの病気が樹体や果実に発生しやすく(石畑, 2000b)、根腐れ (Roan・Cheng, 1986) も発生する恐れがある。一方、梅雨明け以降は高温、強光になるため、果皮が着色不良のまま落果するなどの高温障害が発生する。さらに、パッションフルーツは浅根性であるため土壌の乾燥の影響を受けやすく、新梢先端や果実が萎縮すること(米本, 2009)や樹体生育や花芽形成が抑制されること(Menzel ら, 1986)などの障害も観察される。これらの問題を解決するためには、パッションフルーツ栽培における最適な環境条件を解明することが必要である。そして、今後パッションフルーツの栽培地域を拡大していくためにも高品質果実の安定生産技術の確立が不可欠であると考え、本研究を実施した。

その結果、温度と光合成特性との関係、成熟期における温度と果実品質との関係を解明し、温度反応に品種間差異があることも明らかにした。また、樹体生育および果実生産を安定させ、果実品質を向上させる光環境や土壌水分条件も明らかとなった。

パッションフルーツは熱帯高地原産であるため、夏季の高温期に開花、結実不良や果皮の着色不良などの高温障害が観察される。また、‘ルビースター’よりも‘サマークイーン’で高温障害がより多く発生することから、両

品種間で温度反応が異なる可能性が考えられる。しかし、両品種間の温度反応について比較した研究はなく、温度反応の差異の要因について不明であった。

第 1 章では‘サマークイーン’および‘ルビースター’を供試し、温度と光合成特性との関係について検討した。その結果、両品種ともに光合成速度は 30℃で最も高く、35℃以上の高温では光合成能力が低下した。さらに、光合成の温度反応には品種間差異も確認された。‘サマークイーン’は 35℃から光合成能力が低下し始め、40℃以上になると著しく低下した。30℃以下でも光合成速度が低下した。一方、‘ルビースター’は 35℃から光合成能力が低下し始めるがその程度は軽く、40℃以上でも光合成能力を維持した。‘サマークイーン’とは異なり 30℃以下でも光合成速度は低下しなかった。

様々な作物において、高温耐性のある品種は高温条件下でも光合成速度や蒸散速度が高い (Kitroongruang ら, 1992; Nkansha ら, 1996; Nkansha・Ito, 1994; 高垣ら, 1993)。植物の葉はストレスを受けた時、ゼアキサンチンが蓄積することによりクロロフィルから受け取ったエネルギーを安全に熱に消去し、過剰なエネルギーを消去する安全弁としてキサントフィルサイクルが機能する (園池, 2007)。これは NPQ の増減と関わりがあり、イネの高温処理 (35℃以上) において、キサントフィルサイクルが正常に機能している葉は NPQ が上昇して Fv/Fm の低下を軽減するが、機能を阻害された葉は NPQ が上昇せず、Fv/Fm が著しく低下する (Yin ら, 2010)。本研究でも‘ルビースター’は高温条件下において蒸散能および NPQ が高く維持された。このことから、‘ルビースター’は過剰なエネルギーを効率良く熱放散することで光化学系 II を保護し、高温条件下でも光合成能力を維持したと考えられる。

本研究の結果、パッションフルーツの光合成に最適な温度は 30℃である

ことがわかった．さらに，‘サマークイーン’は‘ルビースター’よりも高温耐性が弱く，光合成の適温範囲も狭いことが認められ，‘ルビースター’よりも高温障害が多く発生する要因の一つである可能性が示された．

第 2 章ではパッションフルーツにおける成熟期の温度と果実品質との関係解明を検討した．その結果，15℃では果皮の着色が不十分で減酸も進まず，35℃では果皮が黄化し糖度が低下した．25℃において，‘サマークイーン’は果皮色および果汁品質ともに良好となり，樹上完熟果と同程度であった．パッションフルーツでは，着色開始期から果皮の半分が着色した果実を収穫後 25℃で貯蔵すると，樹上完熟果と同程度の果実品質になるとされ（Shiomi ら，1996），本研究でも同様の結果となった．一方，‘ルビースター’はクロロフィルの分解およびアントシアニンの蓄積が良好であったが，樹上完熟果に比べ糖度が低かった．ウメにおいて収穫後果実では樹上果実とほぼ同質の成熟現象を示すが，成熟に伴い糖含量は減少する（稲葉・中村，1981）．リンゴにおいても成熟前に収穫した果実は追熟させても樹上完熟果より糖度が低いとされ（Lin・Walsh，2008），‘ルビースター’においても貯蔵果実の成熟は樹上果実と同様に進むが，糖度は低下したと思われる．

本研究の結果から，パッションフルーツ果実の成熟に最適な温度は 25℃であることがわかった．それに加えて，収穫果実および樹上果実の成熟特性に関する品種間差異も明らかにした．

第 1 章では光合成に最適な温度環境が 30℃であること，第 2 章では果実の成熟期における最適な温度環境が 25℃であることが明らかとなった．石畑ら（1989）はパッションフルーツの交雑種（*P. edulis* f. *flavicarpa* Deg. × *P. edulis*）の栄養成長に好適な地温が 25℃であると報告している．加えて，パッションフルーツの花粉発芽適温は 25～30℃（石畑，1983），着果適温は昼温 28～32℃（松田・樋口，2014）とされる．以上のことから，パッショ

ンフルーツ栽培における最適温度環境は 25～30℃であることが裏付けられた。そして、温度反応には‘サマークイーン’と‘ルビースター’との間に差異も認められた。‘サマークイーン’は高温耐性に欠けるが高糖度，低酸度および高糖酸比となり，‘ルビースター’は高温に強く果皮の着色が良好であることもわかった。しかしながら，夏場のハウス内の気温は 40℃以上になることがあるため，高温対策を考える必要がある。

そこで，第 3 章では高温対策として容易に導入が可能である遮光処理を行い，種々の程度の遮光処理がパッションフルーツの樹体生育および果実品質に及ぼす影響について検討した。その結果，遮光処理により気温および葉表面温度が低下し，体感的にも涼しくすることができた。約 30%の遮光処理は糖酸比の高い果実を多く生産した。多くの植物において，強光下では光合成速度が低下するとされ，この過剰な光エネルギーによる光合成の低下を光阻害と呼ぶ（園池，2007）。光阻害は多くの植物で知られており（Barman ら，2008；Fu ら，2013），マンゴーやイネでは高温ストレスとの複合ストレスにより光合成能力が低下する（Jutamanee・Onnom，2016；Yin ら，2010）。本研究において約 43%までの遮光処理は無処理区よりも光合成速度が高いか同程度であり，これは遮光により光阻害を軽減したためであると思われた。また，本研究では赤外光を遮蔽する遮光ネットを用いた。メロンでは赤外光を遮蔽するネットを使用することにより，果実の糖度および甘味が向上するとされる（Murakami ら，2017）。これらのことから，約 30%の遮光処理では光阻害の軽減および赤外光の遮蔽をすることによって高糖酸比の果実を多く生産したと推察される。約 43%の遮光処理でも高糖酸比の果実を生産したが，不完全種子が多かったため果汁歩合が減少した。一方，約 60%の遮光処理は避陰反応および陰葉化を呈し，生殖成長が抑制され果実品質も低下した。ブルーベリーでは約 60%以上の遮光により避陰反応や陰葉化を呈し，

開花，結実，収量および光合成能力が抑制される（Kim ら，2011）．パッションフルーツにおいても低光量により光合成速度が低下し，雌性器官（花柱，柱頭，子房）が小さく，胚のうの奇形が多いとされる（比屋根ら，2010）．本研究においても，約 60%の遮光は低光量が続いたことにより光合成速度が低下し，同化産物が不足したことで胚のうの発達不良による不完全種子の増加や酸度上昇による果実品質の低下を引き起こしたと推察される．以上のことから，パッションフルーツ栽培において，赤外光を遮蔽する遮光ネットによる遮光処理は気温および葉温を低下させ，約 30%の遮光までであれば光阻害の軽減により光合成速度を高くし，果実品質を向上させることがわかった．しかし，約 43%の遮光では果汁歩合が低下し，60%以上では低光量により光合成速度が低下し，同化産物が不足することで果実品質の低下を起こすため避ける必要がある．また，本研究では栽培期間中常に遮光処理を行ったが，トマトでは夏季の高温期に一定の積算日射量以上のときに遮光処理を行った場合，常に遮光した区よりも光合成速度や商品果率，糖度が向上したとされる（井手ら，2011）．今後は遮光処理を行う時期などを検討することによって，さらなる果実品質の向上につながると考えられた．

第 1 章ではパッションフルーツの光合成，第 2 章では果実の成熟期にそれぞれ最適な温度環境を解明し，品種間差異も明らかにした．第 3 章では赤外光を遮蔽する遮光ネットを用いることによって，遮光による避陰反応および陰葉化を起こさず果実品質を向上させる高温対策法を示した．これらの解明された環境条件を栽培に反映することで，パッションフルーツの高温障害を軽減させ，高品質果実の安定生産が可能になると思われる．それに加えて，遮光処理を実施することにより体感温度も低下させることができるため，栽培管理作業の効率も向上すると思われる．しかし，春から夏にかけての栽培が主流であるパッションフルーツでは，梅雨時期に土壌が過湿になる傾向が

ある．過湿条件下では根腐れが発生し樹体生育が抑制される（Roan・Cheng, 1986）．一方，梅雨明け以降は高温，強光になるため土壌が乾燥しやすく，極端な乾燥は樹体生育や花芽形成が抑制され，結実率が低下する（Menzel ら, 1986 ; Staveley・Wolstenholme, 1990）．そのため，最適な土壌水分環境を解明する必要がある．

そこで，第 4 章では春から夏の高温期間の生育が旺盛な時期におけるパッションフルーツ栽培に適した土壌水分管理方法を検討した．その結果，パッションフルーツ栽培において土壌 pF1.5 以下，土壌水分量 37% 以上の湿潤条件は，樹体生育を抑制して果実品質を低下させるため，栽培期間中は避ける必要があることが判明した．土壌 pF2.4～2.7，土壌水分量 10% 以下の乾燥条件は樹体生育を抑制するが，着果後約 20 日までは結実率の向上，着果後約 30 日以降では減酸や着色の向上につながると考えられた．飯田ら（2016）はパッションフルーツにおいて，LWP が -1.0 MPa 程度の一時的な水ストレスにより光合成速度は低下するが，開花数は向上すると報告しており，一時的な乾燥処理はパッションフルーツ栽培にとって有効である可能性が示された．しかし，カンキツでは乾燥ストレスを与える時期によって果実肥大や果皮の着色，糖度などが抑制される場合があると報告している（佐々木, 2002 ; 鈴木ら, 1969）．本研究においても，乾燥により果実の小型化や糖度の低下が発生するため，乾燥処理は適期に短期間とする必要がある．今後，様々な果樹で行われている LWP による指標（間苧谷・町田, 1980）や水分ストレス表示シートの利用（森永ら, 2016）などを検討することによって，さらにパッションフルーツ栽培に適した土壌水分管理法を確立することが可能になると思われる．

以上，本研究の結果から，パッションフルーツ栽培に最適な温度環境は $25\sim 30^{\circ}\text{C}$ であることが解明された．高温対策として遮光率約 30% の赤外光

を遮蔽する遮光ネットを被覆することで、気温や葉温、体感温度を低下させ、光阻害の軽減により光合成速度が高くなることで果実品質が向上し、栽培管理作業の効率向上にもつながることがわかった。また、土壌水分は pF2.0～2.2、土壌水分量約 20% に維持することで樹体生育および果実品質が安定し、一時的に乾燥ストレス (pF2.4～2.7) を与えることで結実率や果皮の着色向上につながることも明らかにした。今後パッションフルーツを栽培する際には約 30% の赤外光を遮蔽する遮光ネットを被覆し、ハウス内の気温を 30℃ 前後に保つために換気や細霧冷房 (Harel ら, 2013 ; Hu ら, 2009) を行い、土壌水分は pF2.0～2.2 を基準に灌水し、一時的に乾燥ストレス (pF2.4～2.7) を与える管理をすることで高品質果実の安定生産が可能になる。また、‘サマークイーン’ は果皮の着色開始期から果皮の五分着色程度の果実を早採りし、25℃ で貯蔵後に出荷することでさらなる収益性の向上にもつながると推察された。

要 約

本研究では、パッションフルーツ (*Passiflora edulis*) における高品質果実安定生産のための最適環境条件解明を目的として、温度、光および土壌水分が樹体生育および果実品質に及ぼす影響について研究を行い、以下のような知見を得た。

1. パッションフルーツ ‘サマークイーン’ (*P. edulis* × *P. edulis* f. *flavicarpa*) および ‘ルビースター’ (*P. edulis* × *P. edulis* f. *flavicarpa*) の光合成速度、蒸散速度、気孔コンダクタンスおよび暗呼吸速度に及ぼす光、温度条件の影響を検討した。さらに、高温条件下でのクロロフィル蛍光特性に及ぼす影響についても検討した。‘サマークイーン’ および ‘ルビースター’ の光－光合成曲線は、両者とも $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ まで直線的に増加し、それ以上では緩やかに増加し、 $1,200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 付近で光飽和点に達した。温度と見かけの光合成速度との関係を見ると、‘サマークイーン’ の見かけの光合成速度は 30°C で最大となり、 30°C 以上および 30°C 以下ではそれぞれ低下した。一方、‘ルビースター’ の見かけの光合成速度は、 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$ で最大であり、 35 および 40°C では低下した。 $35 \sim 40^{\circ}\text{C}$ の高温域において ‘サマークイーン’ の 真の光合成速度は低下したが、‘ルビースター’ では低下が小さかった。 40°C における蒸散速度は、‘サマークイーン’ よりも ‘ルビースター’ で高くなった。暗呼吸速度は、両品種とも $20 \sim 40^{\circ}\text{C}$ の範囲では高温となるほど上昇した。クロロフィル蛍光特性をみると、‘サマークイーン’ では 40°C で高温障害を示し、 45°C ではいずれのパラメーターも著しく低下もしくは減少した。一方、‘ルビースター’ では、 45°C でも高温障害の程度は小さかった。以上のことから、‘サマークイーン’ は ‘ルビースター’ よりも高温ストレスの影響を受けやすく、光合成の適温範囲が狭かった。
2. パッションフルーツにおける果実成熟期の最適な温度を解明するため、

‘サマークイーン’および‘ルビースター’を供試し、成熟期の温度と果実品質との関係を検討した。15℃では、両品種とも果皮の緑色が強く、低糖酸比であった。25℃では、‘サマークイーン’で高糖度、低酸度および高糖酸比となり、‘ルビースター’では果皮の着色が優れた。35℃では、両品種ともクロロフィルは分解されアントシアニンが蓄積されていたが果皮の外観は黄色く、低糖度であった。以上のことから、パッションフルーツの果実品質にとって最適な成熟期の温度は25℃であることがわかった。また、‘サマークイーン’は25℃の貯蔵果実と樹上完熟果の果実品質に差がなかった。このことから、緑熟（着色開始期）～果皮の半分着色の果実を樹上完熟する前に収穫し、25℃で貯蔵後に出荷することで商品果率および収益性の向上につながると推察された。

3. パッションフルーツ栽培における果実の着色不良等の高温障害を緩和するため、遮熱効果のある寒冷紗を供試し、種々の程度の遮光処理がパッションフルーツの樹体生育および果実品質に及ぼす影響について検討した。樹体生育は遮光率が高くなるにつれ避陰反応が現れ、葉は陰葉化が進み、開花が抑制された。強遮光区（遮光率約60%）では果実の成熟日数が長くなり、小果で糖酸比の低い果実となった。弱遮光区（遮光率約30%）では他の処理区よりも糖酸比6.0以上の果実が多かったことから、約30%の遮光は果実品質を向上させることがわかった。

4. 土壌の過湿および乾燥が、パッションフルーツの樹体生育および果実品質に及ぼす影響について検討した。湿潤区（pF1.3～1.9）では、樹体生育が抑制され結実率が低下した。光合成速度は7月以降に著しく低下し、葉の黄化や根腐れが発生した。その結果、根のデンプン含量が低下した。果実の成熟日数はいずれの処理区よりも短くなった。乾燥区（pF2.1～2.8）では樹体生育や花芽分化を抑制し、果実の成熟を遅延させた。果実は小さく、糖度が

低かった．乾燥ストレスを付与する時期によっても植物体の反応が異なり，栽培前期（着果後約 20 日まで）では，花，子房および果実が小さくなるが，SPAD 値や結実率は向上した．栽培後期（着果後約 30 日以降）では，樹体生育，花芽形成や光合成速度が抑制され植物体のデンプン含量が低下するが，果皮の着色は良好であった．以上のことから，パッションフルーツ栽培では，土壌の過湿あるいは乾燥は樹体生育および果実品質を抑制するが，一時的な乾燥ストレスは結実率や果皮の着色を向上させることがわかった．

5. 本研究で解明したパッションフルーツの最適環境条件に関する知見は，高品質果実の安定生産技術の確立に寄与するものと考えられた．

謝 辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり，終始懇切丁寧な助言と御指導をいただいた，鹿児島大学農学部教授 山本雅史博士に心より感謝いたします．また，本論文の作成にあたり御校閲と貴重な御示唆を受け賜った鹿児島大学農学部教授 遠城道雄博士，佐賀大学農学部准教授 古藤田信博博士，佐賀大学農学部教授 一色司郎博士，鹿児島大学農学部教授 橋本文雄博士，鹿児島大学名誉教授（現かごしまCOCセンター特任教授） 富永茂人博士，鹿児島大学農学部元准教授 久保達也博士に対して，心より深甚の謝意申し上げます．

本研究の遂行にあたり技術的なご支援をいただいた鹿児島大学農学部准教授 朴 炳宰博士に心より感謝の意を表します．さらに，鹿児島大学農学部附属農場唐湊果樹園職員ならびに鹿児島大学農学部園芸生産学講座果樹園芸学研究室の在学生諸氏に対して厚く御礼申し上げます．

引用文献

- Abu-Zahra, T. R. and M. A. Ateyyat. 2016. Effect of various shading methods on cucumber (*Cucumis sativus* L.) growth and yield production. *Int. J. Environ. Sustain.* 5: 10–17.
- 天野勝司・遠藤寿英・水谷房雄・日野 昭・門屋一臣. 1995. 台木の異なるキウイフルーツの光合成速度並びにそれらの挿し木苗の樹体内エタノール含量に及ぼす湛水处理の影響. *愛媛大農学報*. 16: 19–23.
- Azuma, A., H. Yakushiji, Y. Koshita and S. Kobayashi. 2012. Flavonoid biosynthesis-related genes in grape skin are differentially regulated by temperature and light conditions. *Planta*. 236: 1067–1080.
- Barman, T. S., U. Baruah and J. K. Saikia. 2008. Irradiance influences tea leaf (*Camellia sinensis* L.) photosynthesis and transpiration. *Photosynthetica*. 46: 618–621.
- 別府賢治・片岡郁雄. 2005. 暖地条件における夏季の遮光が甘果オウトウの光合成, 炭水化物の蓄積および翌春の結実性に及ぼす影響. *園学研*. 4: 69–73.
- Bhattarai, S. P., L. Pendergast and D. J. Midmore. 2006. Root aeration improves yield and water use efficiency of tomato in heavy clay and saline soils. *Sci. Hortic.* 108: 278–288.
- Bora, P. S. and N. Narain. 1997. Passion fruit. p. 375–386. Mitra, S. K. *Postharvest physiology and storage of tropical and subtropical fruits*. CAB International. U.K.
- Camejo, D., P. Rodrigues, M. A. Morales, J. M. Dell’Amico, A. Torrecillas and J. J. Alarcon. 2005. High temperature effects on photosynthetic activity of two tomato cultivars with different heat susceptibility. *J. Plant Physiol.* 162: 281

- Chang, Y. S. and C. Y. Cheng. 1992. Effects of temperature and light on growth and flower formation of passionfruit. *J. Chin. Soc. Hort. Sci.* 38: 30–36 (In Chinese with English abstract).
- Costache, M. A., G. Campeanu and G. Neata. 2012. Studies concerning the extraction of chlorophyll and total carotenoids from vegetables. *Rom. Biotechnol. Lett.* 17: 7702–7708.
- de Lima, R. S. N., F. A. M. M. de Assis Figueiredo, A. O. Martins, B. C. S. de Deus, T. M. Ferraz, M. M. de Assis Gomes, E. F. de Sousa, D. M. Glenn and E. Campostrini. 2015. Partial rootzone drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) effects on stomatal conductance, growth, photosynthetic capacity, and water-use efficiency of papaya. *Sci. Hortic.* 183: 13–22.
- El-Ansary, D. O. and G. Okamoto. 2007. Vine water relations and quality of ‘Muscat of Alexandria’ table grapes subjected to partial root-zone drying and regulated deficit irrigation. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 76: 13–19.
- Elyatem, S. M. and A. A. Kader. 1984. Post-harvest physiology and storage behaviour of pomegranate fruits. *Sci. Hortic.* 24: 287–298.
- Equiza, M. A. and D. A. Francko. 2010. Assessment of freezing injury in palm species by chlorophyll fluorescence. *HortScience.* 45: 845–848.
- Fu, X., L. Zhou, J. Huang, W. Mo, J. Zhang, J. Li, H. Wang and X. Huang. 2013. Relating photosynthetic performance to leaf greenness in litchi: A comparison among genotypes. 152: 16–25.
- Gama, V. N., J. T. Cunha, I. M. Lima, M. A. Bacarin and D. M. Silva. 2013. Photosynthetic characteristics and quality of five passion fruit varieties under field conditions. *Acta. Physiol. Plant.* 35: 941–948.

- Garcia-Tejero, I., V. H. Duran-Zuazo, J. Arriaga, A. Hernandez, L. M. Velez and J. L. Muriel-Fernandez. 2012. Approach to assess infrared thermal imaging of almond trees under water-stress conditions. *Fruits* 67: 463–474.
- Ghosh, S. C., K. Asanuma, A. Kusutani and M. Toyota. 2000. Leaf gas exchange properties of potato under different temperature and soil moisture at different growth stages. *Environ. Control in Biol.* 38: 229–239.
- Goldenberg, L., O. Feygenberg, A. Samach and E. Pesis. 2012. Ripening attributes of new passion fruit line featuring seasonal non-climacteric behavior. *J. Agric. Food Chem.* 60: 1810–1821.
- 後藤英次・平井 剛・中村隆一. 2005. メロン実くずれ果の発生要因と抑制対策. *土肥誌*. 76: 491–495.
- Greer, D. H. 2015. Temperature-dependent responses of the photosynthetic and chlorophyll fluorescence attributes of apple (*Malus domestica*) leaves during a sustained high temperature event. *Plant Physiol. Biochem.* 97: 139–146.
- Guo, Y. P., H. F. Zhou and L. C. Zhang. 2006. Photosynthetic characteristics and protective mechanisms against photooxidation during high temperature stress in two citrus species. *Sci. Hortic.* 108: 260–267.
- Harel, D., H. Fadida, S. Gantz, K. Shilo and H. Yasuor. 2013. Evaluation low pressure fogging system for improving crop yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.): grown under heat stress conditions. *Agronomy* 3: 497–507.
- Higgins, S. S., F. E. Larsen, R. B. Bendel, G. K. Rademaker, J. H. Bassman, W. R. Bidlake and A. Al Wir. 1992. Comparative gas exchange characteristics of potted, glasshouse-grown almond, apple, fig, grape, olive, peach and Asian pear. *Sci. Hortic.* 52: 313–329.

- Higuchi, H., T. Sakuratani and N. Utsunomiya. 1999. Photosynthesis, leaf morphology, and shoot growth as affected by temperatures in cherimoya (*Annona cherimola* Mill.) trees. *Sci. Hortic.* 80: 91–104.
- Higuchi, H., N. Utsunomiya and T. Sakuratani. 1998. High temperature effects on cherimoya fruit set, growth and development under greenhouse conditions. *Sci. Hortic.* 77: 23–31.
- 比屋根篤・瀬古澤由彦・菅谷純子・弦間 洋. 2010. パッションフルーツの着果に及ぼす遮光処理の影響. 園学研. 9 (別 2) : 416.
- 堀内尚美・亀有直子・車 敬愛・鈴木 栄・平沢 正・荻原 勲. 2011. 乾燥ストレス下におけるブルーベリー葉の水ポテンシャルおよび光合成特性. 園学研. 10: 485–490.
- Hu, M. -J., Y. -P. Guo, Y. -G. Shen, D. -P. Guo and D. -Y. Li. 2009. Midday depression of photosynthesis and effects of mist spray in citrus. *Ann. Appl. Biol.* 154: 143–155.
- 井手 治・龍 勝利・國武みどり・小熊光輝・奥 幸一郎. 2011. 高温期のトマト低段密植栽培における積算日射量を指標とした遮光方法. 福岡農総試研報. 30: 30–33.
- 飯田康仁・庭山翔太・藤井佳祐・樋口浩和・橋本真帆・須崎徳高・市ノ木山浩道. 2016. 鉢吊り下げ型整枝法におけるパッションフルーツの水ストレスと開花数の関係性. 熱農研. 9 (別 2) : 29–30.
- 今井俊治・藤原多見夫・田中茂穂・岡本五郎. 1991. 根域制限栽培のブドウ‘巨峰’の樹体生長と果実発育に及ぼす土壤水分の影響. 生物環境調節. 29: 133–140.
- 稲葉昭次・中村怜之輔. 1981. ウメ果実の樹上及び収穫後の成熟. 園学雑. 49: 601–607.

- 稲葉昭次・岡本一郎・伊東卓爾・中村怜之輔・橋本 隆．1984．フィリピン産‘Cavendish’バナナの樹上成熟特性と収穫熟度別の追熟特性．園学雑誌．53: 66－78．
- 石畑清武．1983．紫果物時計草の花粉発芽に関する研究．鹿大農学報．33: 7－11．
- 石畑清武．2000a．熱帯・亜熱帯果樹生産の新技术 (1) パッションフルーツ．農業および園芸．75: 65－74．
- 石畑清武．2000b．熱帯・亜熱帯果樹生産の新技术 (2) パッションフルーツ．農業および園芸．75: 309－318．
- 石畑清武・林 満・池田三雄．1984．紫果物時計草の人工受粉による結果率および果実品質の向上．鹿大農学報．34: 9－16．
- 石畑清武・益山浩代・岩堀修一．1987．紫果物時計草の果実の発育，とくに仮種皮の発育について．鹿大農学報 37: 17－28．
- 石畑清武・水野宗衛・宮浦信生．1989．熱帯果樹の生長に及ぼす地温の影響 2．クダモノトケイソウおよびアセロラの生長に及ぼす栽培時期と地温の影響．鹿大農研報．14: 11－19．
- 石井雅久・丸尾 達・伊東 正・佐瀬勘紀・奥島里美．2001．施設栽培における人間の温熱快適性と作物生産性—夏季における減光・降温環境の解析—．生物環境調節．39: 9－16．
- 石本知香・久保達也・富永茂人・山本雅史．2007．パッションフルーツ‘ルビースター’ (*Passiflora edulis* × *P. edulis* f. *flavicarpa*) 果実の発育に伴う糖・有機酸組成および関連酵素活性の変化．熱帯農業．51 (別 1) : 43－44．
- 岩崎光徳・深町 浩・今井 篤・野中圭介．2011a．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.

岩崎直人・大垣智昭. 1985. カンキツの種・品種における光合成特性と温度・光条件. 園学雑. 54: 315－322.

岩崎泰永・吉田千恵・松嶋卯月・伊吹竜太. 2011b. イチゴ夏秋どり栽培におけるウォーターカーテンの利用が施設内環境と果実収量に及ぼす影響. 園学研. 10: 241－247.

城島十三夫・松添直隆. 1994. 露地・ハウス栽培の桃色および赤色系トマト品種の果実の肥大・着色特性と高温期における色素の形成. 園学雑. 63: 581－588.

Jutamane, K. and S. Onnom. 2016. Improving photosynthetic performance and some fruit quality traits in mango trees by shading. *Photosynthetica*. 54: 542 - 550.

鹿児島県園芸振興協議会. 2015. 果樹栽培指針. パッションフルーツ. p. 423－433.

鹿児島県農政部農産園芸課. 2016. 果樹生産統計資料（平成26年産実績）.

Karimi, S., A. Yadollahi, K. Arzani, A. Imani and M. Aghaalikhani. 2015. Gas-exchange response of almond genotypes to water stress. *Photosynthetica* 53: 29－34.

Kim, S. J., D. J. Yu, T. -C. Kim and H. J. Lee. 2011. Growth and photosynthetic characteristics of blueberry (*Vaccinium corymbosum* cv. Bluecrop) under various shade levels. *Sci. Hortic.* 129: 486－492.

木下貴文・中野善公・川嶋浩樹. 2012. 夏季高温期におけるトマトのポット育苗において根域冷却の時間帯が生育および収量に及ぼす影響. 園学研. 11: 459－465.

気象庁データベース. 2014・2015. 鹿児島県鹿児島市の7月上旬から8月中

- 旬の日照時間． <<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>>.
- Kishore, K., K. A. Pathak, R. Shukla and R. Bharali. 2011. Effect of storage temperature on physico-chemical and sensory attributes of purple passion fruit (*Passiflora edulis* Sims). J. Food Sci. Technol. 48: 484–488.
- Kitroongruang, N., S. Jodo, J. Hisai and M. Kato. 1992. Photosynthetic characteristics of melons grown under high temperatures. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 61: 107–114.
- 近藤 悟. 1992. リンゴ果実の各種糖類及びアスコルビン酸含量に及ぼす環境要因の影響. 日食工誌. 39: 1112–1118.
- Kose, B. 2014. Effect of light intensity and temperature on growth and quality parameters of grafted vines. Not. Bot. Horti. Agrobi. 42: 507 - 515.
- Kozai, N., I. Kataoka, T. Kondo, S. Amemiya, H. Higuchi, T. Ogata and Y. Yonemoto. 2007. Effect of night temperature regime on fruit quality of ‘Summer Queen’ passion fruit (*Passiflora edulis* × *P. edulis* f. *flavicarpa*) harvested in winter. Japan. J. Trop. Agr. 51: 70–72.
- 釘宮伸明・今井 寛・川田重徳・清原祥子・植山昌人. 2011. ブドウ「ピオーネ」の着色向上法. 大分農林水産研指農研. 1: 89–101.
- 熊倉裕史・宍戸良洋. 1994. イチゴの果実肥大に及ぼす温度の影響. 園学雑. 62: 827–832.
- 熊代克己・建石繁明. 1967. 土壌湿度がリンゴ（紅玉）の樹体生長，収量および果実品質に及ぼす影響（第1報）. 園学雑. 36: 9–20.
- Lee, T. -C., P. -J. Zhong and P. -T. Chang. 2015. The effects of preharvest shading and postharvest storage temperatures on the quality of ‘Ponkan’ (*Citrus reticulata* Blanco) mandarin fruits. Sci. Hortic. 188: 57 - 65.
- Lichtenthaler, H. K. and A. R. Wellburn. 1983. Determinations of total

- carotenoids and chlorophyll *a* and *b* of leaf extracts in different solvents. Biochem. Soc. Trans. 11: 591 - 592.
- Lin, S. -F. and C. S. Walsh. 2008. Studies of the “tree factor” and its role in the maturation and ripening of ‘Gala’ and ‘Fuji’ apples. Posth. Biol. Technol. 48: 99 – 106.
- Lombardini, L., H. Restrepo-Diaz and A. Volder. 2009. Photosynthetic light response and epidermal characteristics of sun and shade pecan leaves. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 134: 372 - 378.
- Macha, M. M., A. K. Chowdhury, K. Nomura, M. Ide and Y. Yonemoto. 2006. Effect of temperature regime and soil moisture level on fruit quality of ‘Summer Queen’ passionfruit (*Passiflora edulis* × *P. edulis* f. *flavicarpa*). Jpn. J. Trop. Agr. 50: 70 – 75.
- 前澤重禮・山田初男・秋元浩一．1993．トマト‘桃太郎’追熟中の着色異常と収穫熟度および追熟温度との関係．園学雑．62: 647－653．
- 牧野 周．2009．PAM およびガス交換測定器を用いた，蛍光および二酸化炭素同時測定による植物の光エネルギー利用の評価：ガス交換解析とクロロフィル蛍光の同時測定．低温科学．67: 525－527．
- 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の指標としての葉の水ポテンシャル．園学雑．49: 41－48．
- Marsal, J., H. F. Rapoport, T. Manrique and J. Girona. 2000. Pear fruit growth under regulated deficit irrigation in container-grown trees. Sci. Hortic. 85: 243 – 259.
- Mataa, M. and S. Tominaga. 1998. Effects of shading stage and level on fruit set and development, leaf carbohydrates and photosynthesis in ponkan (*Citrus reticulata* Blanco). Jpn. J. Trop. Agr. 42: 103 - 110.

- Mataa, M., S. Tominaga and I. Kozaki. 1998. Relative effects of growth retardant (paclobutrazol) and water stress on tree growth and photosynthesis in ponkan (*Citrus reticulata* Blanco). J. Japan. Soc. Hort. Sci. 67: 28–34.
- 松田大志・樋口浩和．2014．受粉日の昼夜温がパッションフルーツの着果に及ぼす影響．熱農研．7（別1）：83–84．
- 松浦克彦・荒木 齊．1995．遮光がイチジク‘榊井ドーフィン’の樹体生長，着果，収量および果実品質に及ぼす影響．兵庫農技研報．43: 21–26．
- 松添直隆・川信修治・松本幸子・木村宏和・圖師一文．2006．夜温がイチゴ果実の糖，有機酸，アミノ酸，アスコルビン酸，アントシアニンおよびエラグ酸濃度に及ぼす影響．植物環境工学．18: 115–122．
- Menzel, C. M. and D. R. Simpson. 1988. Effect of continuous shading on growth, flowering and nutrient uptake of passionfruit. Sci. Hortic. 35: 77–88.
- Menzel, C. M., D. R. Simpson and A. J. Dowling. 1986. Water relations in passionfruit: effect of moisture stress on growth, flowering and nutrient uptake. Sci. Hortic. 29: 239–249.
- Meyer, R. F. and J. S. Boyer. 1981. Osmoregulation, solute distribution, and growth in soybean seedlings having low water potentials. Planta 151: 482–489.
- 持田圭介・板村裕之．2007．カキ‘西条’における樹上軟化発生の原因と早生系統間差．園学研．6: 97–103．
- Molina-Bravo, R., C. Arellano, B. R. Sosinski and G. E. Fernandez. 2011. A protocol to assess heat tolerance in a segregating population of raspberry using chlorophyll fluorescence. Sci. Hortic. 130: 524–530.
- Morales, C. G., M. T. Pino and A. del Pozo. 2013. Phenological and physiological responses to drought stress and subsequent rehydration cycles in two

raspberry cultivars. Sci. Hortic. 162: 234–241.

森 健太郎・菅谷純子・弦間 洋. 2004. ブドウ‘黒王’の成熟期における温度が果実の着色およびアントシアニン関連酵素活性に及ぼす影響. 園学研. 3: 209–214.

森永邦久・古賀健一郎・伊賀悠人・遠藤直人・藤井雄一郎・横井秀輔・星 典宏・福田文夫・薬師寺 博. 2016. 果樹における‘水分ストレス表示シート’を用いた樹体の水分状態の評価. 園学研. 15: 401–407.

向井啓雄・宇都宮直樹・杉浦 明. 1989. 2 種のストロベリーグアバ (*Psidium cattleianum* Sabine, *Psidium cattleianum* Sabine var. *lucidum* Degener) 果実の成熟及び品質に及ぼす温度の影響. 熱帯農業. 33: 243–247.

Murakami, K., N. Fukuoka and S. Noto. 2017. Improvement of greenhouse microenvironment and sweetness of melon (*Cucumis melo* L.) fruits by greenhouse shading with a new kind of near-infrared ray cutting net in mid-summer. Sci. Hortic. 218: 1 - 7.

邨田卓夫. 1980. 青果物の低温流通と低温障害. コールドチェーン研究. 6: 42–51.

武藤浩志・末松信彦・荒木勇二・馬場富二夫・石井ちか子・石井香奈子・稲葉善太郎・杉山和美. 2010. ‘はるみ’の着果, 果実の大きさ, 糖度および葉と根のデンプン含量が次年度の着花に及ぼす影響. 植物環境工学. 22: 181–186.

中野龍平. 2015. 果実の成熟と収穫後生理. p. 134–153. 米森敬三編著. 果樹園芸学. 朝倉書店. 東京.

Nakasone, H. Y. and R. E. Paull. 1998. Passion-fruit. p. 270 - 291. Tropical fruits. CAB International. U.K.

Niculcea, M., J. Lopez, M. Sanchez-Diaz and M. Carmen Antolin. 2014.

- Involvement of berry hormonal content in the response to pre- and post-veraison water deficit in different grape vegetative (*Vitis vinifera* L.) cultivars. *Aust. J. Grape Wine Res.* 20: 281–291.
- Nkansah, G. O. and T. Ito. 1994. Relationship between some physiological characters and yield of heat-tolerant, non-tolerant, and tropical tomato cultivars growth at high temperature. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 62: 781–788.
- Nkansah, G. O., T. Maruo, Y. Shinohara and T. Ito. 1996. Effects of light and temperature on photosynthetic parameters, yield and fruit quality of watermelons. *Jpn. J. Trop. Agr.* 40: 118–122.
- 緒方邦安・寺井弘文. 1979. パナナ果実の追熟加工条件の検討. *日食工誌*. 26: 199–203.
- Pires, M. V., A-A. F. Almeida, A. L. Figueiredo, F. P. Gomes and M. M. Souza. 2011. Photosynthetic characteristics of ornamental passion flowers grown under different light intensities. *Photosynthetica* 49: 593–602.
- Poudal, P. R., R. Mochioka, K. Beppu and I. Kataoka. 2009. Influence of temperature on berry composition of interspecific hybrid wine grape ‘Kadainou R-1’ (*Vitis ficifolia* var. *ganebu* × *V. vinifera* ‘Muscat of Alexandria’). *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 78: 169–174.
- Proietti, P., A. Palliotti, F. Famiani, E. Antognozzi, F. Ferranti, R. Andreutti and G. Frenguelli. 2000. Influence of leaf position, fruit and light availability on photosynthesis of two chestnut genotypes. *Sci. Hortic.* 85: 63–73.
- Roan, S. and C. Y. Cheng. 1986. Effect of waterlogging on growth in passion fruit seedlings (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* Deg.). *J. Chin. Soc. Hort. Sci.* 32: 34–42 (In Chinese with English abstract).
- Santos, E. A., M. M. Souza, A. P. Viana, A. -A. F. de Almeida, I. S. Araujo and J.

- C. O. Freitas. 2012. Development and bloom in hybrids of wild passion fruit cultivated in different types of pots and shading levels. *Sci. Agric.* 69: 126 – 134.
- 佐々木俊之. 2002. 夏秋季における時期別の土壌乾湿の違いが青島温州の果実品質に及ぼす影響. 静岡県柑試報. 31: 1 – 6.
- 佐藤達雄・吉田 誠・大矢武志. 2002. パルス振幅変調 (PAM) クロロフィル蛍光測定法による野菜の高温ストレス耐性の検定. 園学雑. 71: 101 – 106.
- Shao, L., Z. Shu, S. L. Sun, C. L. Peng, X. J. Wang and Z. F. Lin. 2007. Antioxidation of anthocyanins in photosynthesis under high temperature stress. *J. Integra. Plant Biol.* 49: 1341 – 1351.
- Sharma, R. R., V. B. Patel and H. Krishna. 2006. Relationship between light, fruit and leaf mineral content with albinism incidence in strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.). *Sci. Hortic.* 109: 66 – 70.
- Shinomiya, R., H. Fujishima, K. Muramoto and M. Shiraishi. 2015. Impact of temperature and sunlight on the skin coloration of the ‘Kyoho’ table grape. *Sci. Hortic.* 193: 77 – 83.
- Shiomi, S., L. S. Wamochi and S. G. Agong. 1996. Ripening characteristics of purple passion fruit on and off the vine. *Postharvest Biol. Technol.* 7: 161 – 170.
- 白石眞一・熊 同 銓・白石美樹夫・北崎真紀子. 1996. ブドウ栽培品種の光合成速度に及ぼす温度の影響. 九大農学芸誌. 51: 9 – 16.
- Shivashankara, K. S., S. Isobe, H. Horita, M. Takenaka and T. Shiina. 2006. Volatile aromatic constituents of tree ripened and mature green ‘Irwin’ mango fruits during low temperature storage. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 75:

209－212.

Silber, A., Y. Israeli, M. Levi, A. Keinan, O. Shapira, G. Chudi, A. Golan, M. Noy,

I. Levkovitch and S. Assouline. 2012. *Agric. Water Manag.* 104: 95－103.

園池公毅. 2007. 光もストレスになる. p. 208－213. 東京大学光合成教育研究会編著. 光合成の科学. 東京大学出版会. 東京.

園池公毅. 2009. クロロフィル蛍光と吸収による光合成測定. *低温科学*. 67: 507－524.

Staveley, G. W. and B. N. Wolstenholme. 1990. Effects of water stress on growth and flowering of *Passiflora edulis* (Sims) grafted to *P. caerulea* L. *Acta Hortic.* 275: 551－558.

鈴木鉄男・金子 衛・田中 実. 1969. カンキツ幼樹の生育と結実に及ぼす時期別土壌水分含量の影響. *園学雑*. 38: 287－294.

鈴木鉄男・岡本 茂・山田吉鋭. 1975. 温州ミカンの葉色と果実品質に及ぼす照度, チッ素濃度および土壌水分の影響. *園学雑*. 44: 241－247.

高垣美智子・佐藤 卓・伊東 正. 1993. トウガラシ属植物の生育および純光合成速度に及ぼす高温処理の影響. *熱帯農業*. 37: 191－196.

瀧澤美奈子. 2008. 植物まるかじり叢書② 植物は感じて生きている. p. 19－38. 化学同人. 京都.

田村 晃. 2004. 栽培期間中の気温がハウレンソウおよびコマツナの糖とビタミン C 含量に及ぼす影響. *園学研*. 3: 187－190.

苦名 孝・宇都宮直樹・片岡郁雄. 1979. 樹上果実の成熟に及ぼす温度環境の影響 (第 2 報) ブドウ ‘巨峰’ 果実の着色に及ぼす樹体および果実の環境温度の影響. *園学雑*. 48: 261－266.

Turner, D. W., C. M. Menzel and D. R. Simpson. 1996. Short term drying of half the root system reduces growth but not water status or photosynthesis in

- leaves of passionfruit (*Passiflora* sp.). Sci. Hortic. 65: 25–36.
- Utsunomiya, N. 1992. Effect of temperature on shoot growth, flowering and fruit growth of purple passionfruit (*Passiflora edulis* Sims var. *edulis*). Sci. Hortic. 52: 63–68.
- 宇都宮直樹・井手由季子・山田貴子・神崎真哉．2005．ムラサキクダモノトケイソウ果実の着色に及ぼす光と温度の影響．熱帯農業．49（別2）：65–66．
- 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．
- Wada, T., H. Ikeda, K. Matsushita, A. Kambara, H. Hirai and K. Abe. 2006. Effects of shading in summer on yield and quality of tomatoes grown on a single-truss system. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 75: 51–58.
- Wang, G. G., W. L. Bauerle and B. T. Mudder. 2006. Effects of light acclimation on the photosynthesis, growth, and biomass allocation in American chestnut (*Castanea dentata*) seedlings. For. Ecol. Manage. 226: 173–180.
- 渡辺和彦・後藤逸男・小川吉雄・六本木和夫．2012．環境・資源・健康を考えた土と施肥の新知識．p. 24–26．農文協．東京．
- Xu, H., G. Liu, G. Liu, B. Yan, W. Duan, L. Wang and S. Li. 2014. Comparison of investigation methods of heat injury in grapevine (*Vitis*) and assessment to heat tolerance in different cultivars and species. BMC Plant Biol. 14: 156–165.
- 山田 寿・浜本 清・杉浦 明・苫名 孝．1988．リンゴ果実の成熟に及ぼす果実温度の影響．園学雑．57: 173–177．
- Yamada, M., H. Fukamachi and T. Hidaka. 1996a. Photosynthesis in longan and mango as influenced by high temperatures under high irradiance. J. Japan.

- Soc. Hort. Sci. 64: 749–756.
- Yamada, M., T. Hidaka and H. Fukamachi. 1996b. Heat tolerance in leaves of tropical fruit crops as measured by chlorophyll fluorescence. Sci. Hortic. 67: 39–48.
- Ye, Z. P., D. J. Suggett, P. Robakowski and H. J. Kang. 2013. A mechanistic model for the photosynthesis-light response based on the photosynthetic electron transport of photosystem II in C3 and C4 species. New Phytologist 199: 110–120.
- Yin, Y., S. Li, W. Liao, Q. Lu, X. Wen and C. Lu. 2010. Photosystem II photochemistry, photoinhibition, and the xanthophyll cycle in heat-stressed rice leaves. J. Plant Physiol. 167: 959–966.
- 米本仁巳. 2009. 熱帯果樹の栽培—完熟果をつくる・楽しむ 28 種—. p. 102–112. 農文協. 東京.
- Yonemoto, Y., H. Inoue and H. Okuda. 2004. Effects of storage temperatures and oxygen supplementation on reducing titratable acid in ‘Ruby Star’ passionfruit (*Passiflora edulis* × *P. edulis* f. *flavicarpa*). Jpn. J. Trop. Agr. 48: 111–114.
- 吉田千恵・高橋正明・岩崎泰永・古野伸典・松永 啓・永田雅靖. 2014. 催色期に収穫したカラーピーマン果実の着色促進に関する要因について. 園学研. 13: 155–160.
- 吉田佳子・佐藤 如. 2012. 保水シート耕のトマト一段密植栽培における夏季遮光の影響と果実糖度及び収量向上. 大分農林水産研指農研. 2: 1–14.
- Yuan, Y., S. Shu, S. Li, L. He, H. Li, N. Du, J. Sun and S. Guo. 2014. Effects of exogenous putrescine on chlorophyll fluorescence imaging and heat

- dissipation capacity in cucumber (*Cucumis sativus* L.) under salt stress. J. Plant Growth Regul. 33: 798–808.
- Zhang, Q., J. Z. Zhang, W. S. Chow, L. L. Sun, J. W. Chen, Y. J. Chen and C. L. Peng. 2011. The influence of low temperature on photosynthesis and antioxidant enzymes in sensitive banana and tolerant plantain (*Musa* sp.) cultivars. Photosynthetica. 49: 201–208.
- 鐘 鈴鋒・加藤 徹. 1988. ナス科果菜の生育及び収量に及ぼす土壤水分の影響. 高知大学研報. 37: 51–59.
- Zhu, J. J., Q. Peng, Y. L. Liang, X. Wu and W. L. Hao. 2012. Leaf gas exchange, chlorophyll fluorescence, and fruit yield in hot pepper (*Capsicum annuum* L.) grown under different shade and soil moisture during the fruit growth stage. J. Integra. Agric. 11: 927–937.
- Zushi, K. and N. Matsuzoe. 2017. Using of chlorophyll fluorescence OJIP transients for sensing salt stress in the leaves and fruits of tomato. Sci. Hortic. 219: 216–221.
- 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.

**Studies on the elucidation of optimal environmental conditions for stable
high-quality fruits production of passion fruit (*Passiflora edulis*)**

Atsushi Shimada

Summary

This study was conducted to elucidate optimal environmental conditions for the stable high-quality production of passion fruit (*Passiflora edulis*). Effects of temperature, light intensity, and soil moisture on vine growth and the quality of passion fruit were investigated. The results are summarized as follows:

1. The effects of temperature and light on photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics under a high temperature in the passion fruits ‘Summer Queen’ (*P. edulis* × *P. edulis* f. *flavicarpa*) and ‘Ruby Star’ (*P. edulis* × *P. edulis* f. *flavicarpa*) were examined. Photosynthetic rates of both cultivars markedly and linearly increased up to $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, and less markedly increased from 300 to $1,500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ under several light conditions. Their light saturation points were recorded at around $1,200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ photosynthetic photon flux densities (PPFD). Regarding the relationship between temperature and photosynthesis, the maximum value of the apparent photosynthetic rate of ‘Summer Queen’ was observed at 30°C, and it was lower at both lower and higher temperatures. In ‘Ruby Star’, on the other hand, the maximum value was observed at 20 to 30°C, and this decreased at 35 and 40°C. The gross photosynthetic rate of ‘Summer Queen’ decreased over 30°C, that whereas in ‘Ruby Star’ decreased to a lesser extent. The transpiration rate of ‘Ruby Star’ was higher than that of ‘Summer Queen’ at 40°C. Dark respiration

increased from 20 to 40°C in both cultivars. Concerning chlorophyll fluorescence characteristics, ‘Summer Queen’ showed high-temperature injury at 40°C and all parameters were significantly decreased at 45°C. On the other hand, F_v/F_m showed only a slight decrease at 45°C in ‘Ruby Star’. These results indicate that ‘Summer Queen’ is susceptible to heat stress and that the range of its optimal temperature for photosynthesis is lower than ‘Ruby Star’.

2. The optimal temperature for the fruit maturation period was elucidated. Relationships between temperature and fruit quality in the two passion fruits ‘Summer Queen’ and ‘Ruby Star’ were investigated. Both cultivars showed a greenish fruit peel and low TSS/TA ratio at 15°C. In ‘Summer Queen’, a high Brix, low titratable acidity, and high TSS/TA ratio were observed at 25°C. In ‘Ruby Star’, the peel coloration was highly favorable at 25°C. In both cultivars, the peel tended to be yellowish in color and Brix of the juice was low at 35°C. These results indicate that the optimal temperature for passion fruit maturation was 25°C.

3. Effects of several shading levels on vine growth and fruit quality were investigated. Flowering was inhibited when the shading level was high. Under heavy shading (shading level about 60%), the leaves showed shade leaf and the fruit quality became low. Under low shading (shading level about 30%), the highest TSS/TA ratio of juice was observed among all treatments. These results indicate that a shading level of about 30% is optimal for shading, improving the quality of passion fruit.

4. The effects of excessive moisture and dryness of soil on the vine growth and quality of passion fruit were studied. Under moist treatment (pF1.3-1.9), vine growth was inhibited and fruit set was decreased. The photosynthetic rate was

markedly decreased from July onward. Leaf yellowing and root rot occurred. As a result, the starch content of roots was decreased. The fruit ripening period was the shortest among all treatments. Under drought treatment (pF2.1-2.8), vine growth and flower bud formation were inhibited. The fruit ripening period was prolonged. The fruit size and Brix were smaller and lower than those of normal treatment, respectively. The reactions of plants differed based on the drying period. When plants were grown under early drought stress (until about 20 days after fruit bearing), the flower, ovary, and fruit size tended to be small. However, the leaf color and fruit set were improved. When plants were grown under late drought stress (from about 30 days after fruit bearing onward), vine growth, flower bud formation, and the photosynthetic rate were inhibited and the starch content of plants was also decreased. However, late drought stress improved the fruit peel color. These results indicate that excessive moisture and dryness of soil had adverse effects on the vine growth and quality of passion fruit. The results also suggest that temporal drought stress was effective for the improvement of fruit set and peel color.

5. The results of this study clarify the optimal environmental conditions for passion fruit. This study is considered to be useful for producing high-quality passion fruit.