

BULLETIN
OF THE
KOCHI AGRICULTURAL RESEARCH CENTER
No.35
June 2026

高知県農業技術センター研究報告

第 35 号

令和 8 年 6 月

高知県農業技術センター
高知県南国市廿枝1100

KOCHI AGRICULTURAL RESEARCH CENTER
Hataeda 1100, Nankoku Kochi 783-0023, Japan

高知県農業技術センター研究報告

第 35 号
令和 8 年 6 月

目 次

ぶしゅかん・直七の青玉果長期貯蔵技術の開発	
山岡尚幹・青木こずえ・福井博一	1
光合成と着果負担を指標とした促成ピーマンの CO ₂ 濃度および日中温度管理 技術	
篠田翔真・永尾航洋・野村浩一・但田育直・山崎浩実	15
高知県の水稻奨励品種を判別する DNA マーカーの選定	
武田俊也	27
農業用ドローンを用いた「土佐文旦」, ポンカンおよびユズの病害虫防除体系の 確立	
谷大地・谷本佑・中平龍介	31

BULLETIN
OF THE
KOCHI AGRICULTURAL RESEARCH CENTER
No. 35
June 2026

CONTENTS

Development of long term storage technology for green fruit of Busyukan and Naoshichi	Naoki YAMAOKA, Kozue AOKI and Hirokazu FUKUI	1
CO ₂ concentration and daytime temperature management techniques for forced bell pepper cultivation based on photosynthesis and fruit load as indicators	Shoma SHINODA, Kouyou NAGAO, Koichi NOMURA, Ikunao TADA and Hiromi YAMASAKI	15
Selection of DNA Markers to Identify the Recommended Rice Cultivars in Kochi Prefecture	Shunya TAKEDA	27
Establishment of a Pest Management System on ‘Tosa-buntan’ ,Ponkan and Yuzu Using Agricultural Drones	Daichi TANI, Yuu TANIMOTO and Ryusuke NAKAHIRA	31

ぶしゅかん・直七の青玉果長期貯蔵技術の開発

山岡尚幹・青木こずえ・福井博一*

Development of long term storage technology for green fruit of Busyukan and
Naoshichi

Naoki YAMAOKA, Kozue AOKI and Hirokazu FUKUI*

要 約

ぶしゅかん(餅柚)・直七(田熊スダチ)の未成熟な緑色果(以下, 青玉果)は着色しやすいため, 長期貯蔵技術の開発は青玉果の販路拡大における重要な課題となっている. そこで, ぶしゅかん・直七の最適な貯蔵条件を検討した. その結果, いずれも収穫時期は後期のやや緑色が抜けた頃で, 新聞紙を敷いたポリエチレン袋内に, ぶしゅかんでは果実約 1kg を入れ, 鮮度保持剤クリスパー-HF4 を 1 個同封し, 5℃から 2℃まで 5 日ごとに 1℃下げ以降 2℃で貯蔵する方法が, 直七では果実約 2kg を果実重量 5% 予措後に入れ, 8℃から 2℃まで 5 日ごとに 1℃下げ以降 2℃で貯蔵する方法が緑色を保ち果皮障害を軽減させ, 約 3 か月後までの外観の商品価値の保持を可能にすることが明らかとなった.

キーワード: ぶしゅかん, 直七, 青玉果, 低温貯蔵, 果皮色, 果皮障害, 予措, 低温順化, 鮮度保持剤

はじめに

高知県四万十市では餅柚をぶしゅかん(*Citrus inflata* Hort. ex Tanaka), 宿毛市では田熊スダチ(*Citrus takuma-sudachi* Hort. ex Tanaka)を直七と称し, 各地域で両カンキツの産地づくりに取り組んでいる⁵⁾. ぶしゅかんおよび直七は共にスダチ(*Citrus sudachi* Hort. ex Shirai)やカボス(*Citrus sphaerocarpa* Hort. ex Tanaka)等のような香酸カンキツであり, 青玉果の状態で果汁の香りや酸味を楽しむものとして, 料理や加工品に利用されている. そのため, いずれも搾汁販売が主であるが, ぶしゅかんは 2020 年度から青玉果の販路拡大に取り組んでおり, 直七も本格的な青玉果販売を計画している.

このような中, ぶしゅかんは 8 月中旬から, 直七は 9 月下旬から収穫が始まるが, 収穫期間が 1 か月前後と短く, 収穫適期を過ぎると果皮の黄化が進行し, 香酸カンキツとしての風味を損なうため, 収穫適期を逃さないことが重要となる. 更に, 収穫後も短期間で黄化が進行することから, 青玉果のままで長期貯蔵でき

る技術の開発は産地の重要な課題となっている.

香酸カンキツの青玉貯蔵については, スダチ, カボス, 長門ユズキチ(*Citrus nagato-yuzukichi* Hort. ex Y. Tanaka)等で低温でのポリエチレン袋包装貯蔵の有効性が明らかにされている^{1, 2, 4)}が, 最適な貯蔵条件は同じ香酸カンキツでも種類により異なると考えられる. そこで, ぶしゅかんおよび直七の本格的な青玉果販売に向けた長期貯蔵技術の確立を目指し, 既存のスダチ等の研究事例を参考に貯蔵条件を検討したので, その概要について報告する.

本研究を実施するにあたっては, 四万十ぶしゅかん生産者組合, 四万十ぶしゅかん株式会社, 直七生産株式会社および高知県幡多農業振興センターから多大な協力を賜った. 深く感謝の意を表する.

材料および方法

2022 年に高知県農業技術センター内のインキュベーターを, 2023 年には同インキュベーターおよび予冷庫を用いて貯蔵条件を検討した. 四万十市のぶしゅ

* 現高知県中央西農業振興センター高知農業改良普及所
2026 年 6 月 2 日受理

かん、宿毛市の直七を時期をずらして2回収穫し、収穫した翌日(予措区は2~3日後)に湿度調整用に新聞紙を敷いた厚さ0.03mmのポリエチレン袋内に果実を入れ、袋の口を結び閉じる際になるべく空気が入らないように密閉後、2℃または5℃に設定したインキュベーターおよび予冷库で貯蔵した。袋は、各区ぶしゅかんは4袋、直七は3袋ずつ用意し、毎月1袋ずつ開封して調査した。

本試験では、貯蔵前の予措、インキュベーターまたは予冷库の温度を徐々に低下させる低温順化、貯蔵袋内への鮮度保持剤の同封および封入果実量の違いについて検討した。

1. 試験区の設定

1) ぶしゅかん

(1) 2022年度の実験

収穫日は2022年8月24日(1回目)および9月7日(2回目)とし、ポリエチレン袋に1袋あたり約1kgとなるように、収穫1回目が16個、収穫2回目が14個の果実を封入した。温度を2℃および5℃に設定したインキュベーターで貯蔵することを基本の処理とし以下の区を設けた。2℃または5℃恒温区:貯蔵温度を一定とした区。2℃または5℃予措区:室温28℃に設定し遮光した室内で収穫日から1~2日間机上に並べ、果実の重量を平均約5%減量させた区。8→2℃区または8→5℃区:インキュベーターの温度を8℃から5日ごとに1℃下げ、貯蔵31日目以降は2℃とした区および貯蔵16日目以降は5℃とした区。予措8→2℃区または予措8→5℃区:予措に上記の低温順化を加えた区。2℃または5℃鮮度保持剤同封区:貯蔵袋内に鮮度保持剤を1個同封し、そのまま開封調査まで交換しない区。2℃または5℃鮮度保持剤交換区:約1か月に1度貯蔵袋を開封し鮮度保持剤を新しく交換する区とした。鮮度保持剤には‘クリスパーHF4’(大江化学工業(株)、エチレングスおよびアセトアルデヒドガス除去作用あり、以下k)を用いた。

(2) 2023年度の実験

収穫日は2023年8月28日(1回目)および9月12日(2回目)とした。前年度の実験で結果が最良であった方法に準じ、0.03mm×410mm×280mmのポリエチレン袋に1袋あたり約1kgの果実(13個)とkを1kgあたり1個同封し、貯蔵温度は2℃とすることを基本の

処理とし以下の区を設けた。対照区:基本の処理を行った区。k5倍区:同封するkを5個とした区。5→2℃区:インキュベーターの温度を5℃から5日ごとに1℃下げ、貯蔵16日目以降は2℃とした区。2kg区:約2kgとなるように26個封入した区。大袋区:0.03mm×900mm×900mmのポリエチレン大袋にコンテナ一杯になるように約250個(約18.5kg)封入した区とした。

2) 直七

(1) 2022年度の実験

収穫日は2022年9月20日(1回目)および9月28日(2回目)とし、ポリエチレン袋に1袋あたり約1kgとなるように、10個の果実を封入した。試験区は2022年度のぶしゅかんの試験と同様とした。

(2) 2023年度の実験

収穫日は2023年9月21日(1回目)および10月3日(2回目)とした。前年度の実験で結果が最良であった方法に準じ、予措率を平均約5%とし、0.03mm×410mm×280mmのポリエチレン袋に1袋あたり約1kgの果実(10個)を入れ貯蔵温度は8℃から5日ごとに1℃下げ、貯蔵31日目以降は2℃で貯蔵することを基本の処理とし以下の区を設けた。対照区:基本の処理を行った区。2.5%予措区:果実の重量を平均約2.5%減量させた区。5→2℃区:インキュベーターの温度を5℃から5日ごとに1℃下げ、貯蔵16日目以降は2℃とした区。2kg区:約2kgとなるように20個封入した区。大袋区:0.03mm×900mm×900mmのポリエチレン大袋にコンテナ一杯になるように約200個(約20kg)封入した区。ぶしゅかんおよび直七共にコンテナはユリの球根貯蔵用(外寸600mm×400mm×200mm)を用いた。各試験区の貯蔵方法の概要については表1のとおり。

2. 調査方法

品質調査は貯蔵後約1か月毎にぶしゅかんは4か月後、直七は3か月後まで行った。袋内の酸素、二酸化炭素およびエチレングス(以下O₂、CO₂およびC₂H₄)濃度を測定後、1袋ずつ開封して、果皮色および果皮障害を調査した後、搾汁率、糖度および酸度を測定した。果皮色は各果実の赤道面3か所を、分光測色計(コニカミノルタ社製CM-700d)で測定し、L*値、a*値、b*値から黄化度=L*×b*÷|a*|を算出した。この場合、値が大きいほど黄色であることを示す(写真1)。果皮

障害は障害発生の有無を目視で調査し、果実全体に占める障害面積割合で6段階の指数(0=障害なし, 1=黒点症状, 2=障害割合10%未満, 3=同10%以上25%未満, 4=同25%以上50%未満, 5=同50%以上(写真2), 1以下を商品価値があるとした)で分類し、障害発生日を求めた。搾汁率はハンドジュースャーで絞り得られた果汁量から求め、搾汁液を用いて、糖度(Brix 値)は屈折糖度計(ATAGO 社製 PAL-1)で、クエン酸含量は中

和滴定で求めた。一方、ぶしゅかんは貯蔵3か月および4か月後調査終了後に、直七は貯蔵2か月および3か月後調査終了後に残った果実を用いて日持ち調査を行った。日持ち調査では、全ての区の果実を更に10℃に設定したインキュベーターで1週間保管し、果皮色、果皮障害、糖度および酸度を測定した。なお、調査項目によっては、調査時に腐敗等が発生したものは測定対象から除いた。

表1 ぶしゅかん・直七の各試験区の貯蔵方法の概要(2022年度, 2023年度)

		試験区	予措	封入 果実量 (kg)	鮮度保持剤 (個)	貯蔵温度
2022年度	ぶしゅかん・ 直七	2℃または5℃恒温区	なし	1	0	2℃または5℃一定で貯蔵
		2℃または5℃予措区	5%減量	1	0	同上
		8→2℃または5℃区	なし	1	0	8℃から2℃または5℃まで5日ごとに1℃下げ、以降2℃または5℃一定で貯蔵
		予措8→2℃または5℃区	5%減量	1	0	同上
		2℃または5℃k同封区	なし	1	1	2℃または5℃一定で貯蔵
		2℃または5℃k交換区	なし	1	1(月に1回交換)	同上
2023年度	ぶしゅかん	対照区	なし	1	1	2℃一定で貯蔵
		k5倍区	なし	1	5	同上
		5→2℃区	なし	1	1	5℃から2℃まで5日ごとに1℃下げ、以降2℃一定で貯蔵
		2kg区	なし	2	2	2℃一定で貯蔵
		大袋区	なし	18.5	18	同上
	直七	対照区	5%減量	1	0	8℃から2℃まで5日ごとに1℃下げ、以降2℃一定で貯蔵
		2.5予措区	2.5%減量	1	0	同上
		5→2℃区	5%減量	1	0	5℃から2℃まで5日ごとに1℃下げ、以降2℃一定で貯蔵
		2kg区	5%減量	2	0	8℃から2℃まで5日ごとに1℃下げ、以降2℃一定で貯蔵
		大袋区	5%減量	20	0	同上

注1) 予措は、果実を室温28℃に設定し遮光した室内に収穫日から1～2日間机上に並べ、果実重量が目的の減量率となるまで乾燥させた

2) 鮮度保持剤(k)にはクリスパーHF4[大江化学工業(株)、エチレンガスおよびアセトアルデヒドガス除去作用あり]を用いた

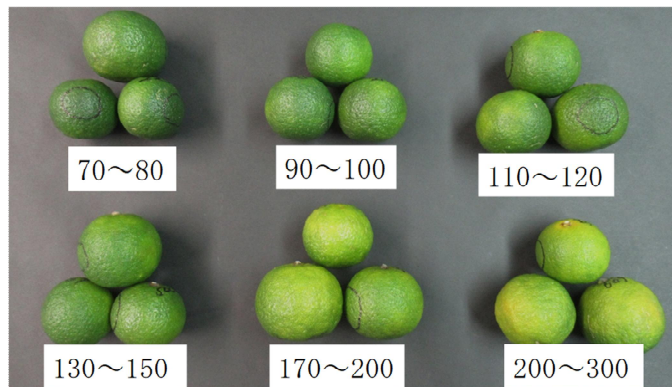


写真1 ぶしゅかんの黄化程度とその指標値



写真2 ぶしゅかんの障害程度と発生指数

結果

1. ぶしゅかん

1) 果皮色の黄化度

2022年度の試験においては、2℃での貯蔵の方が5℃での貯蔵より緑色を保持した期間が長く、予措および8℃からの低温順化またはそれらを組み合わせた

区で黄化が促進された。2023年度の試験においては、対照に比べ5℃からの低温順化による黄化の促進は確認できなかった。封入果実量については、2023年度の試験において、1kgを封入した区では貯蔵が進むにつれて黄化が進む傾向にあったが、2kg区および大袋区では、黄化の進行が遅い傾向にあった(図1)。

2) 果皮障害

2022年度の試験において、2℃恒温区では障害の進行が早かったのに対し、予措、低温順化およびk同封の各処理を加えたその他の2℃での貯蔵では障害の進行は遅く、貯蔵3か月後まで全ての区で障害発生度が1以下となった。kの交換の有無による果皮障害の程度の差は認められなかった。また、収穫時の黄化度が大きかった方（2022年度は収穫2回目、2023年度は収穫1回目）が障害の進行が抑えられる傾向にあった。封入果実量については、2023年度の試験において、1kgまたは2kgを封入した区では貯蔵3か月後まで障害発生度が1以下となったが、2kgを封入した区では1kgを封入した区より貯蔵4か月後の障害が大きかった。大袋区では、収穫1回目は貯蔵2か月後、収穫2回目は貯蔵1か月後までほぼ全ての果実の商品価値が保たれたが、それぞれその1月後の調査時には、障害が著しく進行した（表2、図2）。

3) 搾汁率

2kg区および大袋区では貯蔵2か月後で、1kgを封入した区では両年ともに貯蔵3か月後で低下した（図3）。

4) 糖度

両年ともに貯蔵2か月後以降、貯蔵期間が長くなる

ほど減少する傾向にあった（図4）。

5) クエン酸含量

両年ともに貯蔵2か月後以降、貯蔵期間が長くなるほど減少する傾向にあった（図5）。

6) ガス濃度

C₂H₄濃度は、2022年度は予措を行った区で高い傾向にあったが、その他の区ではほとんど検出されなかった（表3）。また、全ての区にkを同封した2023年度は、C₂H₄はほとんど検出されなかった（データ省略）。

また、両年ともに貯蔵期間が長くなるにつれてO₂濃度は減少し、CO₂濃度は増加する傾向にあった。2023年度の試験において、2kg区および大袋区では、対照区よりO₂濃度が低くCO₂濃度が高く推移し、大袋区ではその傾向が著しかった（図6）。大袋区では呼吸障害による異臭が確認された（データ省略）。

7) 日持ち

果皮障害は全ての区で進行したが、5→2℃区では障害の進行は最も遅かった（図7）。黄化は両年ともに貯蔵終了直後からわずかに進行した（データ省略）。糖度およびクエン酸含量については、両年ともに3、4か月貯蔵終了後（日持ち調査前）から大きな減少はなかった（データ省略）。

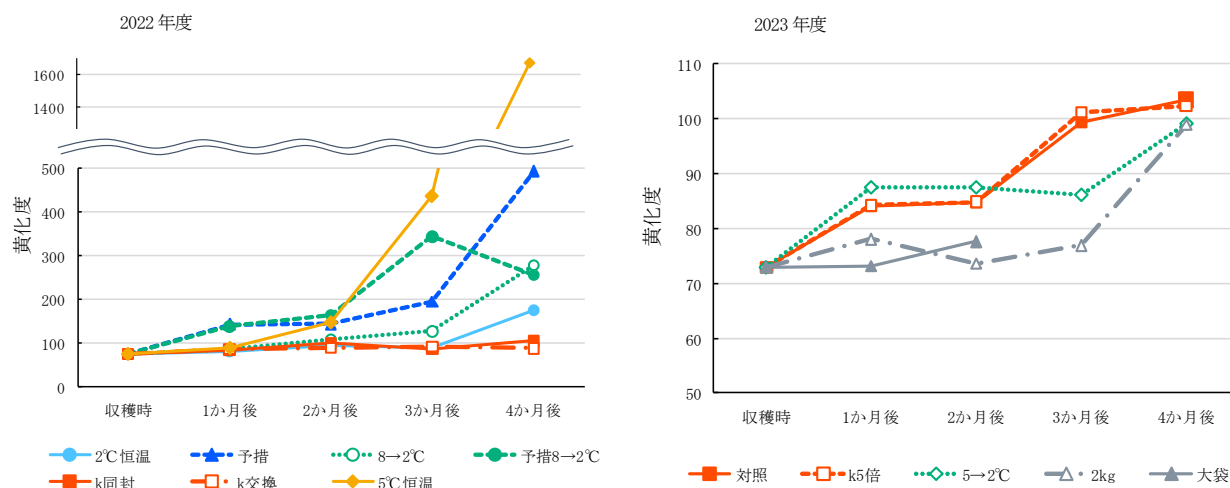


図1 ぶしゅかんの貯蔵方法の違いにおける果皮の黄化度の推移（左 2022年度、右 2023年度）

注1) 収穫1回目、2回目の平均値とした

2) 収穫時の黄化度は、試験に用いた全果実の平均値とした

3) 各区(袋)の調査個数は、2022年度は収穫1回目16個、2回目14個、2023年度は対照区、k5倍区および5→2℃区13個、2kg区26個、大袋区40個とし、平均値で示した

表2 ぶしゅかんの貯蔵方法の違いにおける果皮の障害発生度の推移(2022年度, 2023年度)

収穫経過月数		2022年度							2023年度				
		2℃				5℃			2℃, k同封				
		恒温	予措	8→2℃	予措8→2℃	k同封	k交換	恒温	対照	k5倍	5→2℃	2kg	大袋
収穫1回目	1か月後	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2か月後	0.9	0	0.3	0	0	0	0	0	0	0.2	0.3	0.2
	3か月後	2.5	0.5	0.9	0.1	0.6	0.4	1.1	0.3	1.0	0.4	0.9	4.5
	4か月後	3.9	4.2	4.6	1.4	1.5	2.3	4.8	2.2	1.3	0.8	4.0	—
収穫2回目	1か月後	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1
	2か月後	1.3	0	0.1	0.1	0	0	0	0	0.8	0.3	0.1	2.6
	3か月後	0.8	0.5	0.4	0.2	0.4	0.2	1.1	0.4	0.7	0.7	1.0	3.6
	4か月後	3.5	1.9	2.7	1.5	1.4	0.9	1.5	0.8	2.0	1.5	2.2	—

注1) 障害発生指数および発生度は1以下を商品価値があるとした

2) 調査個数は図1の注3)と同じ

3) 一は、調査時の品質が悪く、測定不能を示す

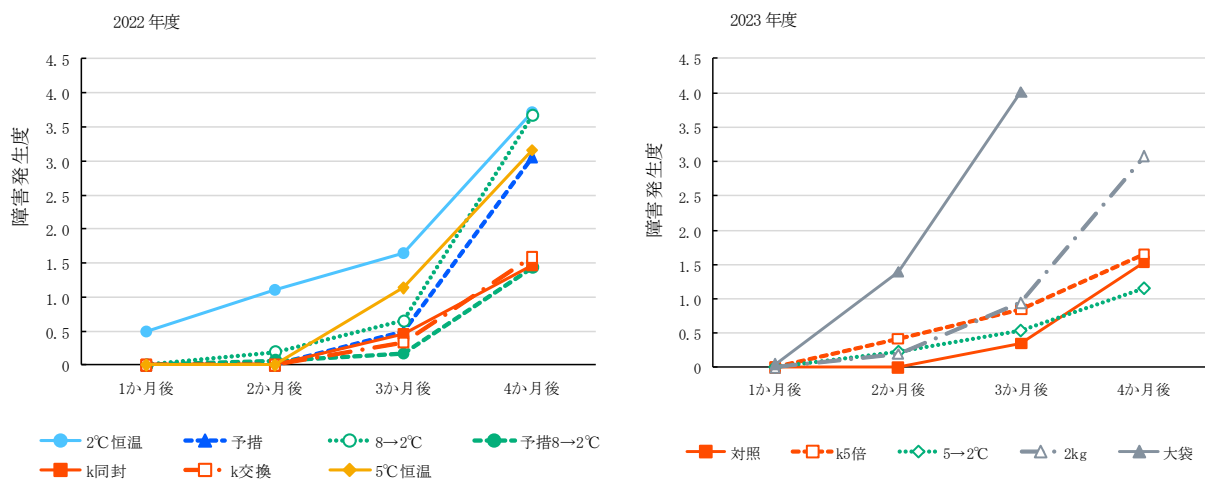


図2 ぶしゅかんの貯蔵方法の違いにおける果皮の障害発生度の推移(左 2022年度, 右 2023年度)

注) 値の算出方法は図1の注1)と同じ

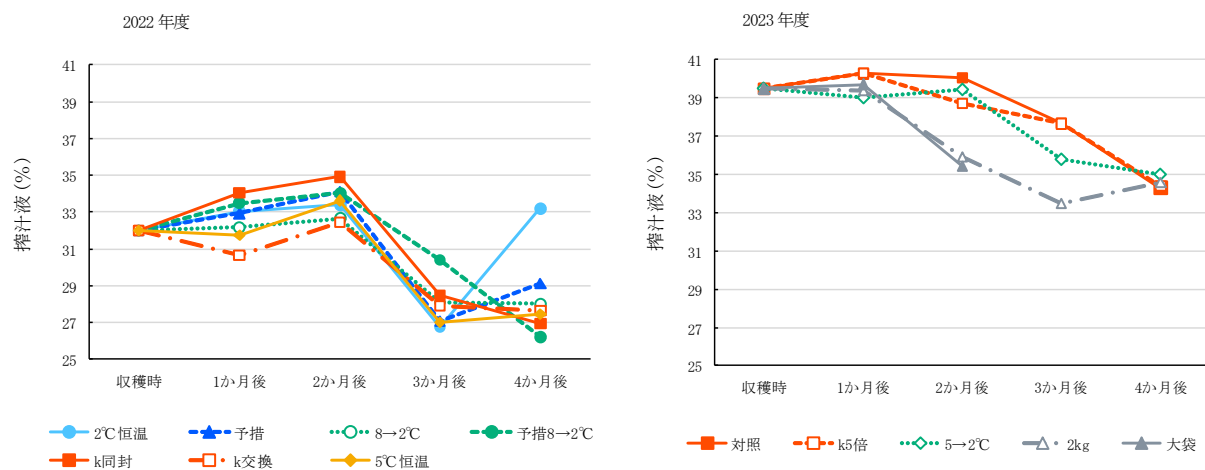


図3 ぶしゅかんの貯蔵方法の違いにおける搾汁率の推移(左 2022年度, 右 2023年度)

注1) 値の算出方法は図1の注1)と同じ

2) 各区(袋)の調査個数は、2022年度は4個、2023年度は対照区、k5倍区および5→2℃区4個、2kg区6個、大袋区8個とし、平均値で示した

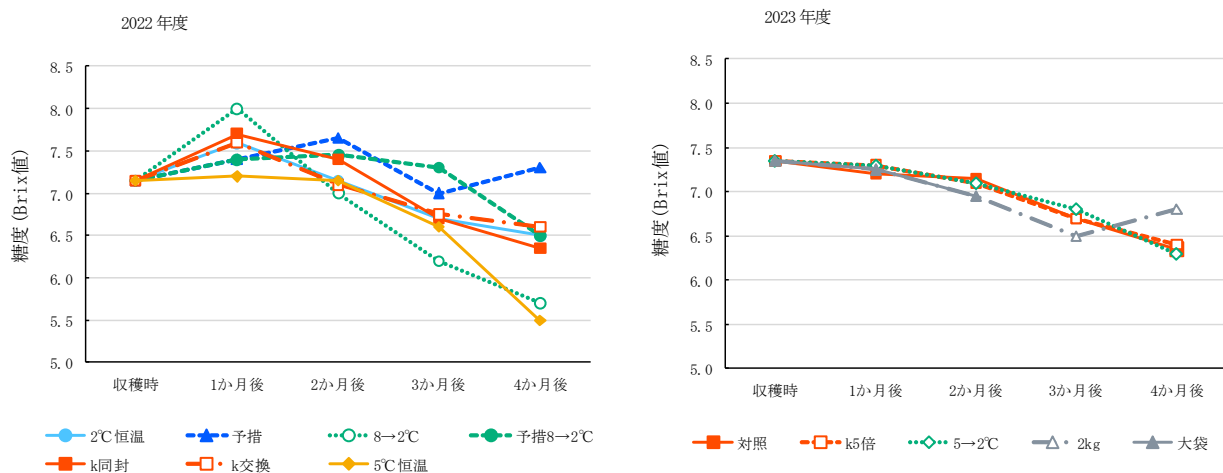


図4 ぶしゅかんの貯蔵方法の違いにおける糖度の推移（左 2022 年度，右 2023 年度）

注1) 値の算出方法は図1の注1)と同じ
2) 調査個数は図3の注2)と同じ

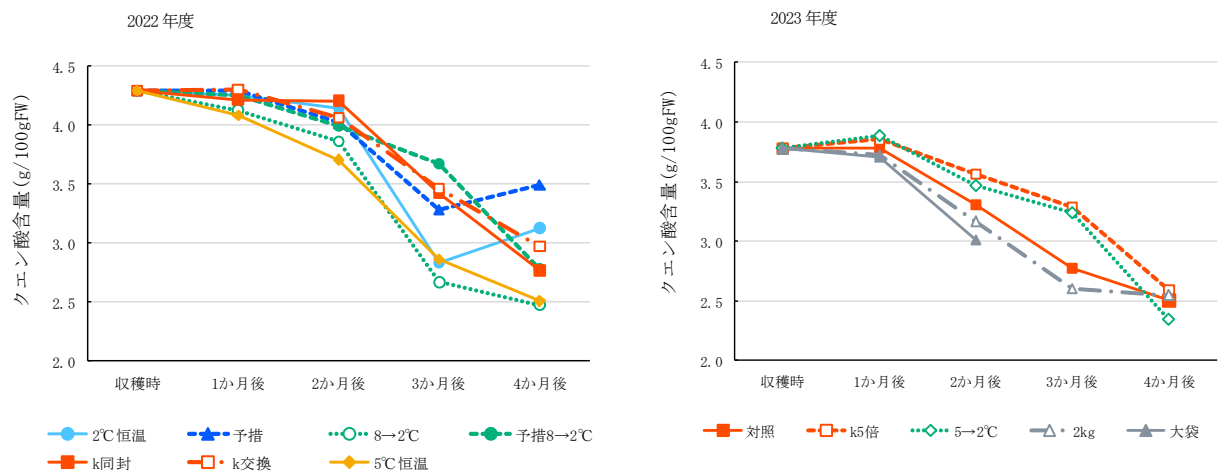


図5 ぶしゅかんの貯蔵方法の違いにおけるクエン酸含量の推移（左 2022 年度，右 2023 年度）

注1) 値の算出方法は図1の注1)と同じ
2) 調査個数は図3の注2)と同じ

表3 ぶしゅかんの貯蔵方法の違いにおける袋内C ₂ H ₄ 濃度の推移(2022年度) (単位: ppm)		2°C恒温	予措2°C	8→2°C	予措8→2°C	2°Ck同封	2°Ck交換	5°C恒温
収穫1回目	1か月後	0	0	0	0	0	0	0
	2か月後	0.2	0	0	0	0	0	0
	3か月後	0	1.1	0.6	1.5	0	0	0
	4か月後	0.1	1.5	0	3.7	0	0	0
収穫2回目	1か月後	0	0	0	0	0	0	0
	2か月後	0.1	0	0.2	0.5	0.3	0	0
	3か月後	0	0.2	0.6	1.0	0	0	0
	4か月後	0	2.9	0	1.3	0	0	0

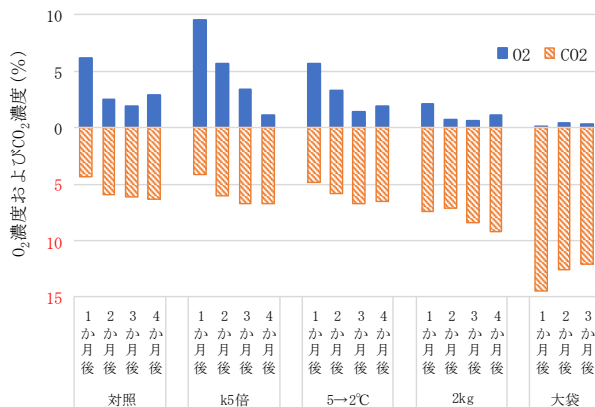


図6 ぶしゅかんの貯蔵方法の違いにおける袋内O₂濃度およびCO₂濃度の推移 (2023年度)

注1) 値の算出方法は図1の注1)と同じ

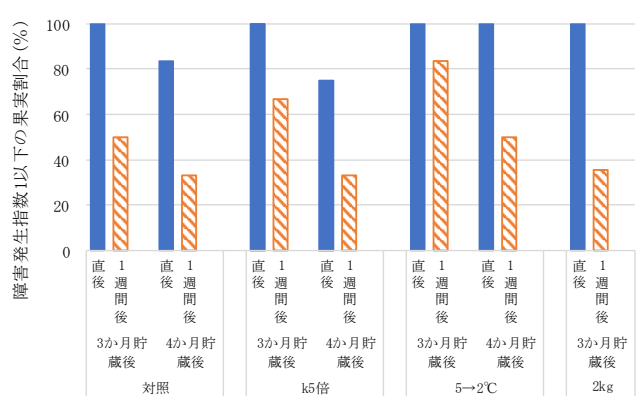


図7 ぶしゅかんの貯蔵終了直後および終了1週間後の貯蔵方法の違いにおける果皮の障害発生指数1以下の果実割合 (2023年度)

注1) 値の算出方法は図1の注1)と同じ

- 2) 各区(袋)の調査個数は対照区, k5倍区および5→2℃区6個, 2kg区14個とし, 平均値で示した
- 3) 障害発生指数は表2の注1)と同じ
- 4) 2kg区の4か月貯蔵後および大袋区は貯蔵終了直後の品質が悪く, 未実施

2. 直七

1) 果皮色の黄化度

2022年度の試験においては, 2℃での貯蔵の方が5℃での貯蔵より緑色を保持した期間が長かった. 予措および低温順化またはそれらを組み合わせると黄化がやや促進された. 2023年度の試験においては, 5→2℃区, 2kg区および大袋区で対照より黄化の進行が遅い傾向にあり, 5→2℃区および2kg区では貯蔵3か月後の黄化度は100以下であった. また, 両年ともに収穫1回目の方が収穫2回目より収穫時から黄化度は小さく, そのまま低い水準で推移した(表4, 図8).

2) 果皮障害

2022年度の試験において, 貯蔵3か月後の障害発生度は, 5℃恒温区では1以下であったのに対し, 2℃恒温区では, 平均3.8と高かった. しかし, 2℃予措区では1.5以下に軽減され, 8→2℃区では0.8以下と更に軽減された. 更に, 予措8→2℃区では0.3以下に保たれ, 予措と低温順化を組み合わせることで障害を軽減できることが示唆された. 同様に, 貯蔵3か月後の障害発生度について, k同封区は平均2.1, k交換区は平均3.0と, kは障害をやや軽減する傾向にあった. また, 収穫2回目の方が収穫1回目より障害の進行が抑えられた. 2023年度の試験では, 大袋区以外の全て

の区で障害発生度は平均1以下であり, 障害発生度に差は認められなかった. 大袋区では, 貯蔵2か月後まで全ての果実で商品価値が保たれたが, 貯蔵3か月後ではほぼ全ての果実の商品価値がなくなった(表5, 図9).

3) 搾汁率

2022年度の試験では, 貯蔵1か月後に高まり, その後は減少もしくは同程度で推移する傾向にあった. 2023年度の試験では, 貯蔵2か月後以降低下する傾向にあった(図10).

4) 糖度

2022年度の試験では, 貯蔵2か月後から減少する傾向にあった. 2023年度の試験では, 貯蔵3か月後に収穫時からわずかに減少する傾向にあった(図11).

5) クエン酸含量

両年ともに貯蔵2か月後から収穫時より減少した(図12).

6) ガス濃度

2022年度の試験において, C₂H₄は特に貯蔵3か月後で検出された袋が多かったが, いずれも1ppm未満と

僅かであった(表6)．2023年度の試験においても同様の傾向にあった(データ省略)．

また、両年ともに貯蔵期間が長くなるほど O_2 濃度は減少し、 CO_2 濃度は増加する傾向にあった．2023年度の試験において、2kg区および大袋区では、その他の果実量1kgの区より O_2 濃度が低く CO_2 濃度が高く推移し、大袋区ではその傾向が著しかった(図13)．大袋区では呼吸障害による異臭が確認された(データ省略)．

7) 日持ち

2023年度の試験において、5→2℃区、2kg区および大袋区で貯蔵終了直後の調査同様、黄化の進行は遅い傾向にあった(図14)．果皮障害は収穫1回目では、対照区で3か月貯蔵終了1週間後も8割の果実が商品価値を保っており、収穫2回目では、いずれの区も8割以上の果実が商品価値を保った(図15)．また、両年ともに、糖度は減少する傾向にあり、クエン酸含量はほとんど変化がなかった(データ省略)．

表4 直七の貯蔵方法の違いにおける果皮の黄化度の推移(2022年度、2023年度)

収穫経過月数		2022年度							2023年度					
		2℃						5℃	5℃予措，8→2℃					
		恒温	予措	8→2℃	予措8→2℃	k同封	K交換	恒温	対照	2.5％予措	5→2℃	2kg	大袋	
収穫1回目	収穫時	80	80	80	80	80	80	80	79	79	79	79	79	
	1か月後	84	87	92	110	83	85	97	92	90	85	83	81	
	2か月後	87	86	98	106	87	86	147	99	109	83	87	83	
	3か月後	82	105	115	118	85	80	266	114	117	86	86	128	
収穫2回目	収穫時	99	99	99	99	99	99	99	83	83	83	83	83	
	1か月後	97	94	108	116	104	100	107	113	108	89	97	89	
	2か月後	106	112	128	130	95	106	188	120	105	85	98	82	
	3か月後	113	115	133	151	106	109	348	139	145	100	114	—	

注1) 収穫時の黄化度は図1の注2)と同じ

2) 各区(袋)の調査個数は、2022年度は10個、2023年度は対照区、2.5%予措区および5→2℃区10個、2kg区20個、大袋区40個とし、平均値で示した

3) —は表2の注3)と同じ

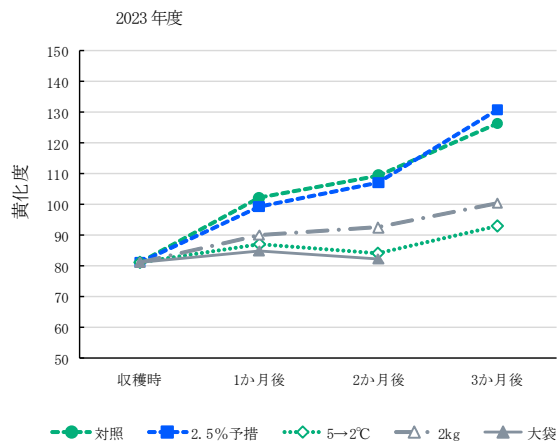
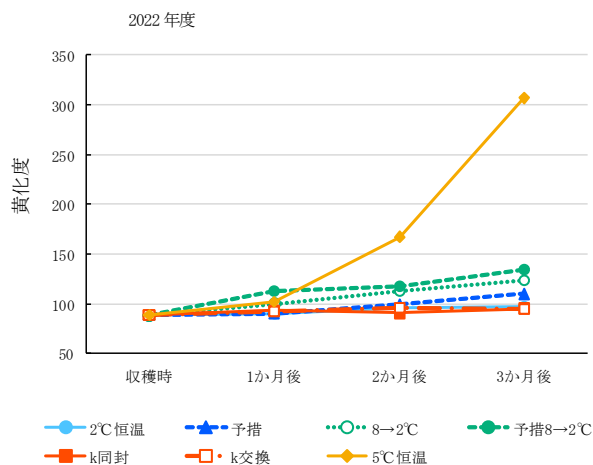


図8 直七の貯蔵方法の違いにおける果皮の黄化度の推移(左 2022年度、右 2023年度)

注) 値の算出方法は図1の注1)と同じ

表5 直七の貯蔵方法の違いにおける果皮の障害発生度の推移(2022年度、2023年度)

収穫経過月数		2022年度							2023年度					
		2℃						5℃	5%予措, 8→2℃					
		恒温	予措	8→2℃	予措8→2℃	k同封	k交換		対照	2.5%予措	5→2℃	2kg	大袋	
収穫1回目	1か月後	1.3	0.7	0	0	0.5	0.8	0.3	0	0	0	0.0	0.0	
	2か月後	1.2	0.4	0	0	0.9	1.2	0.2	0.2	0	0	0.1	0.0	
	3か月後	4.4	1.5	0.8	0.3	3.2	3.7	0.7	0.2	0.7	1.6	0.5	3.0	
収穫2回目	1か月後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	
	2か月後	0.3	0.5	0	0	0.4	1.0	0.6	0.3	0.1	0	0.0	0.0	
	3か月後	3.2	1.3	0.4	0.2	1.0	2.3	0.2	0.5	0.3	0.2	0.3	4.7	

注1) 障害発生指数および発生度は表2の注1)と同じ

2) 調査個数は表4の注2)と同じ

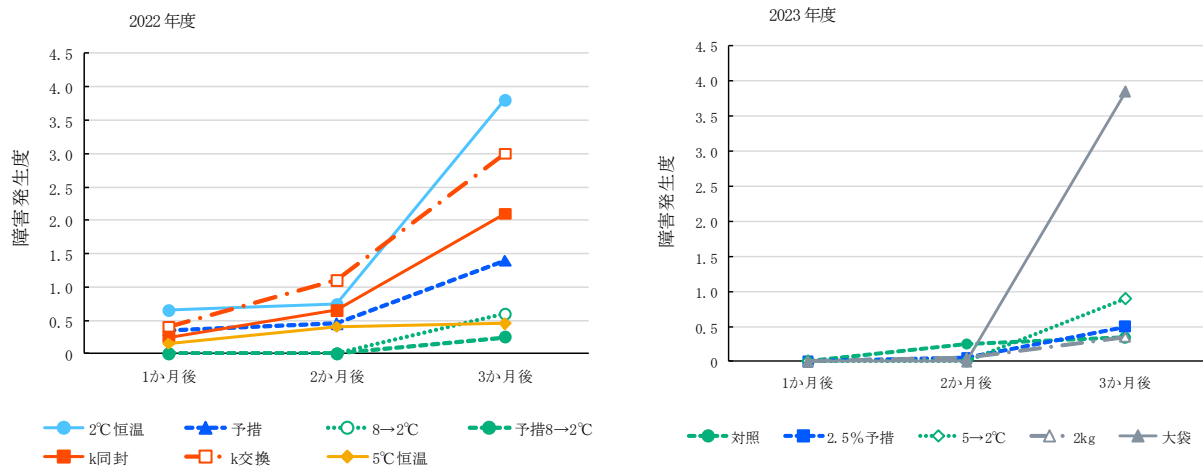


図9 直七の貯蔵方法の違いにおける果皮の障害発生度の推移 (左 2022 年度, 右 2023 年度)

注) 値の算出方法は図1の注1)と同じ

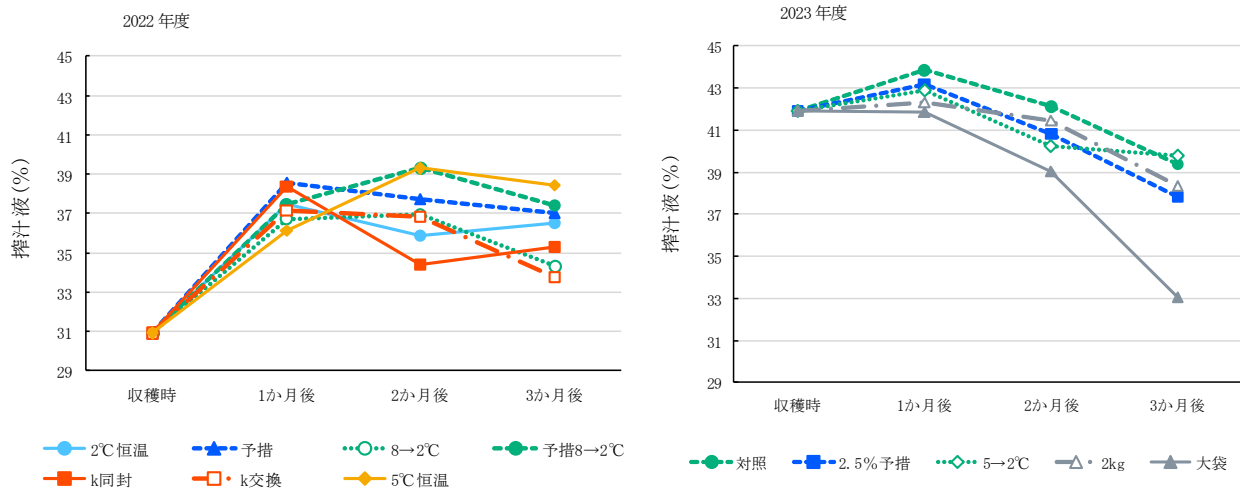


図10 直七の貯蔵方法の違いにおける搾汁率の推移 (左 2022 年度, 右 2023 年度)

注1) 値の算出方法は図1の注1)と同じ

2) 各区(袋)の調査個数は、2022 年度は4 個、2023 年度は対照区、2.5%予措区および5→2°C区4 個、2kg 区6 個、大袋区8 個とし、平均値で示した

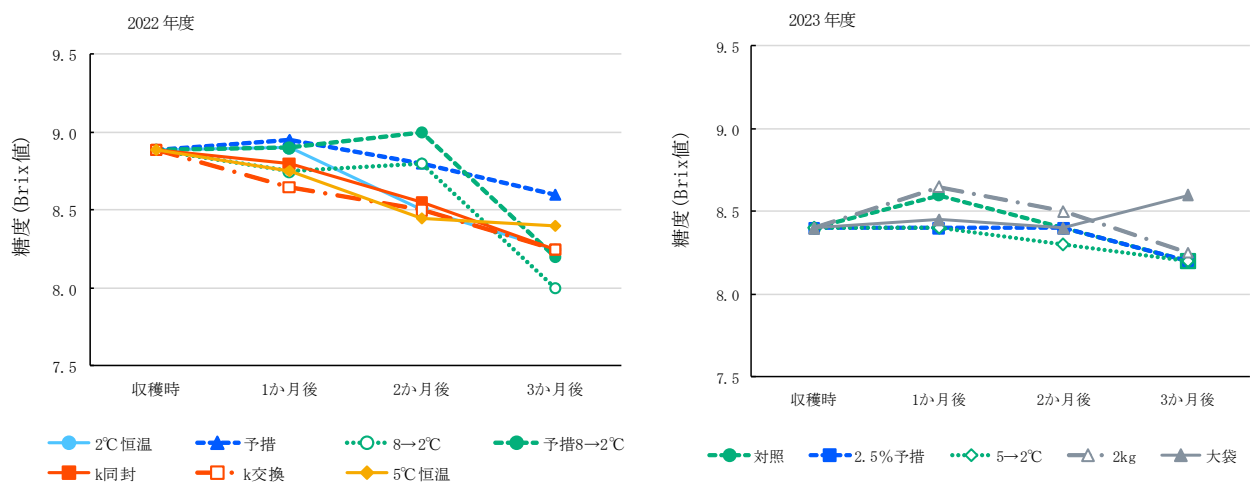


図11 直七の貯蔵方法の違いにおける糖度の推移 (左 2022 年度, 右 2023 年度)

注1) 値の算出方法は図1の注1)と同じ

2) 調査個数は図10の注2)と同じ

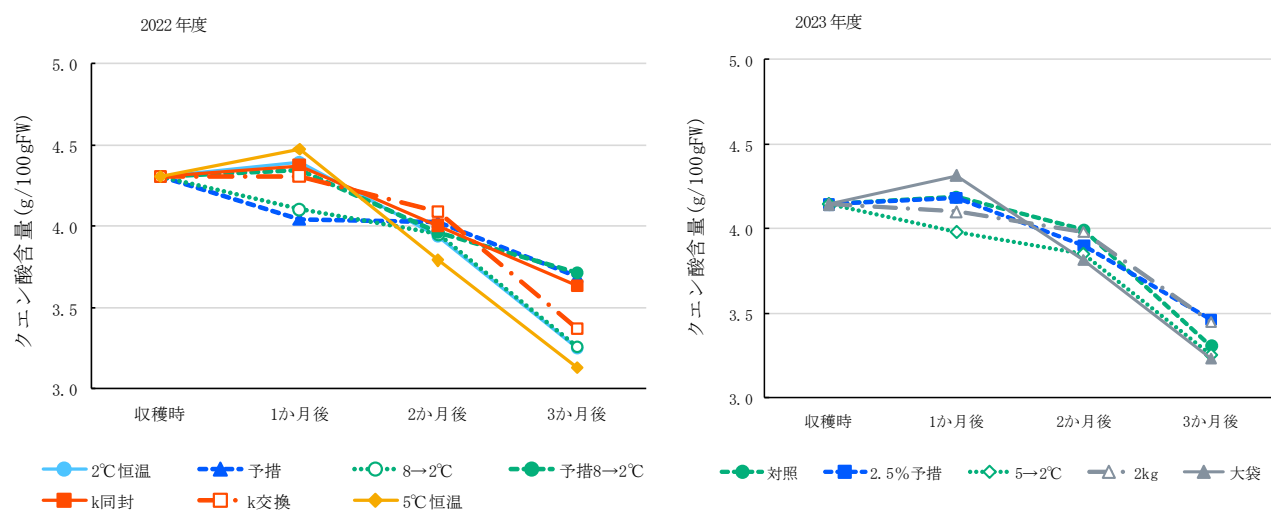


図12 直七の貯蔵方法の違いにおけるクエン酸含量の推移（左 2022 年度，右 2023 年度）

注1) 値の算出方法は図1の注1)と同じ
2) 調査個数は図10の注2)と同じ

表6 直七の貯蔵方法の違いにおける袋内C₆H₆濃度の推移(2022年度) (単位: ppm)

		2°C恒温	予措2°C	8→2°C	予措8→2°C	2°Ck同封	2°Ck交換	5°C恒温
収穫1回目	1か月後	0	0	0	0	0	0	0
	2か月後	0	0	0.3	0	0	0	0
	3か月後	0	0	0	0.7	0	0	0
収穫2回目	1か月後	0	0	0	0	0	0	0
	2か月後	0	0	0	0	0	0	0
	3か月後	0	0.2	0.4	0.2	0.1	0	0

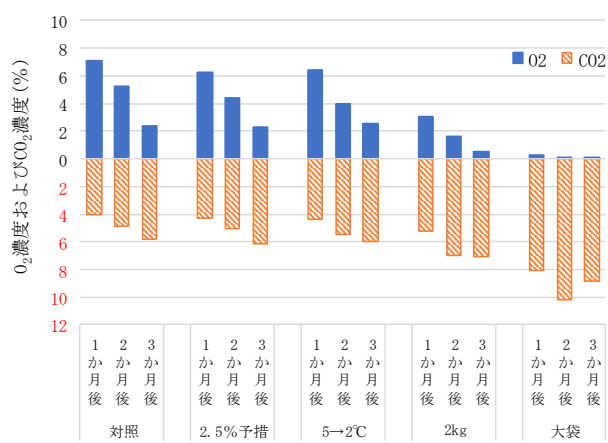


図13 直七の貯蔵方法の違いにおける袋内O₂濃度およびCO₂濃度の推移（2023 年度）

注) 値の算出方法は図1の注1)と同じ

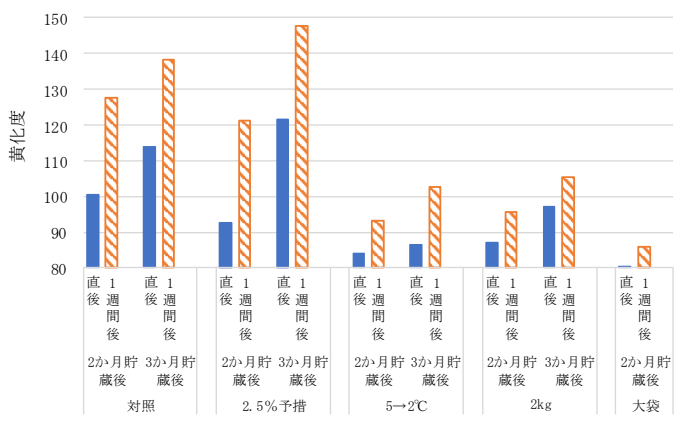


図14 直七の貯蔵終了直後および終了1週間後の貯蔵方法の違いにおける果皮の黄化度（2023 年度）

注1) 値の算出方法は図1の注1)と同じ
2) 各区(袋)の調査個数は対照区, 2.5%予措区および5→2°C区5個, 2kg区13個, 大袋区30個とし, 平均値で示した
3) 大袋区の3か月貯蔵後は図7の注4)と同じ

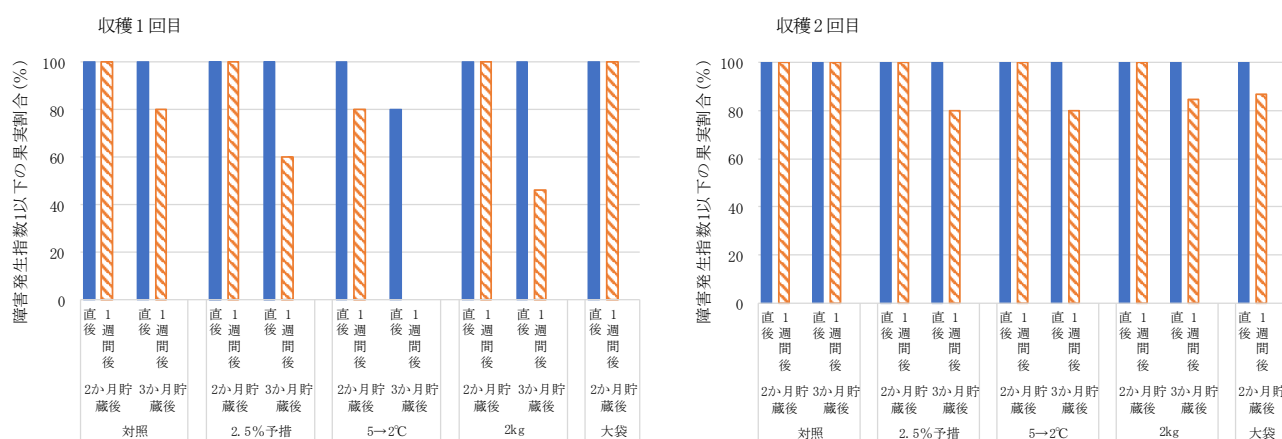


図15 直七の貯蔵終了直後および終了1週間後の貯蔵方法の違いにおける果皮の障害発生

指数1以下の果実割合(2023年度、左 収穫1回目、右 収穫2回目)

注1) 各区(袋)の調査個数は図14の注2)と同じ

2) 障害発生指数は表2の注1)と同じ

3) 大袋区の3か月貯蔵後は図7の注4)と同じ

考察

スダチや長門ユズキチの貯蔵において、貯蔵温度が低いほど緑色保持効果は高い一方で、障害果率が高くなるとされているが、果皮障害の軽減には予措や貯蔵温度を徐々に下げる低温順化处理が有効とされている^{2, 4)}。本試験でも同様に、ぶしゅかん、直七共に2℃での貯蔵では5℃での貯蔵より緑色を保持できたが、果皮障害が多発した。しかし、ぶしゅかんではkの同封および貯蔵温度を貯蔵後5℃から2℃まで5日ごとに1℃下げる処理を組み合わせることにより、緑色を保持したまま果皮障害を軽減することができた。また、直七では果実重量5%予措および貯蔵温度を貯蔵後8℃から2℃まで5日ごとに1℃下げる処理を組み合わせることにより、ぶしゅかん同様に商品価値を保つことができた。kの同封については、ぶしゅかんでは果皮障害軽減効果がみられ、直七でもやや効果があったものの、ぶしゅかんの予措を行った区以外ではC₂H₄の発生量が少なかったことから、kのC₂H₄除去効果の関連性は判定できなかった。カンキツのC₂H₄生成については、温州ミカンを用いた生育段階別の調査において、幼果で著しい発生が生じることが明らかにされており³⁾、主に未熟果を利用するスダチやカボスでもC₂H₄の生成が報告されている^{6, 7)}。kの交換については同封と有意な差はなかったため、費用削減および労力軽減の観点から行わない。貯蔵前の予措については、スダチや長門ユズ

キチで障害抑制に有効である一方、予措程度が大きいと黄化が促進されることが報告されている^{2, 4)}。本試験において、ぶしゅかん、直七いずれも予措により果皮障害は軽減されたが、ぶしゅかんでは黄化の進行が大きくなった。直七では予措による黄化の進行程度は小さかったことから、予措に対する感受性について種による生理的な違いが読み取れる。

収穫時期については、カボスにおいて、収穫時期が遅れるほど障害発生率が低下することが報告されている⁶⁾が、ぶしゅかん、直七でも同様に、いずれも2回の収穫のうち収穫時の黄化度が大きかった方(ぶしゅかんは2022年度は黄化度70より81, 2023年度は71より75, 直七は2022年度は黄化度80より99, 2023年度は79より83)が果皮障害の進行が小さかった。収穫時期は、緑色果として収穫可能な期間の中で、やや緑色が抜けた頃(黄化度の目安として、ぶしゅかんは70半ば〜80, 直七は80半ば〜100)が好ましいと考えられる。袋内の封入果実量については、ぶしゅかん、直七いずれも封入量が多いほど緑色を保持できたが、果皮障害の発生程度が大きい傾向にあった。封入量が多いほど袋内のO₂濃度が低く、CO₂濃度が高い傾向が見られたことから、袋内O₂濃度またはCO₂濃度が果皮障害の進行に関連がある可能性がある。果皮障害と袋内ガス濃度との関係については、スダチにおいて、障害の発生の多い袋でCO₂濃度が高かったことが報告さ

れている⁴⁾。約3か月以上の貯蔵を目指す場合は、今回用いた規格の袋においては、ぶしゅかんの封入量は1kgが望ましいと考えられる。一方で、直七は、収穫時期がやや緑色が抜けた頃であれば、2kgを封入しても1kgと貯蔵3か月後まで障害の進行にそれほど差がなかったことから、緑色をより保持できる2kgが望ましいと考えられる。大袋貯蔵では、ぶしゅかんは1～2か月、直七は2か月後まで貯蔵でき、貯蔵時の労力削減の観点から、1～2か月といった中期的な貯蔵を目的とする場合は大袋貯蔵が有効である。

内容品質については、糖度およびクエン酸含量はぶしゅかん、直七とも2022年度および2023年度の試験いずれも、搾汁率はぶしゅかんは2022年度および2023年度の試験いずれも、直七は2023年度の試験において、貯蔵3か月後には収穫時から低下する傾向にあったが、どの程度の低下まで実需者に許容されるかについては改めて調査の必要がある。

以上のことから、収穫時期はやや緑色が抜けた頃で、新聞紙を敷いたポリエチレン袋内に、ぶしゅかんは約1kgを入れ、鮮度保持剤クリスパーHF4を1個同封し、5℃から2℃まで5日ごとに1℃下げ以降2℃で貯蔵する方法が、直七は約2kgを果実重量5%予措後に入れ、8℃から2℃まで5日ごとに1℃下げ以降2℃で貯蔵する方法が緑色を保ち果皮障害を軽減させ、約3か月後まで外観の商品価値を保持可能であることが明らかとなった。今後、この貯蔵技術が現場で活用されることで、ぶしゅかん・直七の青玉果の流通が活性化し、生産者の所得増大および産地のさらなる発展につな

がることを期待する。

利益相反の有無

著者は開示すべき利益相反はない。

引用文献

- 1) 橋永文男・伊藤三郎・福留裕志・清田義成（1982）. カボスの貯蔵に関する研究. 鹿大農学術報告. 第32号. 43-49.
- 2) 平田達哉・中谷幸夫・西岡真理・杉本健治・品川吉延（2012）. 香酸カンキツ「長門ユズキチ」の長期貯蔵技術の開発. 山口農技センター研報. 3: 1-8.
- 3) 兵藤宏・邨田卓夫（1972）. いろいろな生育段階における温州ミカン果実のエチレン生成. 園学雑. 41(4): 405-410.
- 4) 北川博敏・川田和秀・樽谷隆之（1982）. スダチの貯蔵における温度、包装、予措の効果. 園学雑. 51(3): 350-354.
- 5) 高知県（2021）. 幡多地域アクションプラン令和3年
- 6) 邨田卓夫（1982）. カボス果実の貯蔵生理に及ぼす温度の影響. 園学雑. 50(4): 516-520.
- 7) 平夏樹・岡田留伊・寒川萌香・Mitalo W. Oscar・矢野親良・赤木剛士・牛島幸一郎・久保康隆（2022）. エディブルコーティングと1-MCP処理が収穫後のスダチ果実の緑色保持に及ぼす影響. 園芸研. 21(3): 359-366.

Summary

Because immature green fruits of Bushukan(Mochiyu) and Naoshichi(Takumasudachi) are prone to discoloration, the development of long term storage techniques is an important issue for expanding the market for these green fruits. Therefore, we investigated the optimal storage conditions for Bushukan and Naoshichi. As a result, it was found that for both fruits, when harvested late in the season when the green color has slightly faded, the method of placing about 1kg of Bushukan fruit in a polyethylene bag lined with newspaper, enclosing one Kurisupa HF4 freshness retaining agent, and storing it at 2°C after lowering the temperature by 1°C every 5 days from 5°C to 2°C, and for Naoshichi fruit, placing about 2kg of fruit in a polyethylene bag after pretreating by 5% of the fruit weight, and storing it at 2°C after lowering the temperature by 1°C every 5 days from 8°C to 2°C, preserves the green color, reduces damage to the peel, and allows the fruit to maintain its commercial value in appearance for about 3 months.

Key words: Bushukan, Naoshichi, green fruit, low temperature storage, peel color, peel damage, pretreatment, low temperature acclimatization, freshness retaining agent

光合成と着果負担を指標とした促成ピーマンの CO₂濃度および 日中温度管理技術

篠田翔真・永尾航洋*・野村浩一**・但田育直**・山崎浩実

CO₂ concentration and daytime temperature management techniques for forced bell
pepper cultivation based on photosynthesis and fruit load as indicators

Shoma SHINODA, Kouyou NAGAO, Koichi NOMURA, Ikunao TADA and Hiromi YAMASAKI

要 約

促成ピーマン栽培において、個葉光合成モデル(FvCB モデル)のパラメータの取得と、着果負担に基づく CO₂濃度および日中温度管理技術について検討した。光合成蒸散測定装置を用いてモデルパラメータ(最大カルボキシル化速度 V_{cmax} および最大電子伝達速度 J_{max})を推定し、推定光合成速度と実測光合成速度間で高い相関関係($R^2=0.77$, $\text{RMSE}=3.13$)を得た。1果実当たりの光合成量が0.5gを下回る期間を着果負担が大きいと判断し、この期間に日中温度28.5℃、CO₂濃度650ppmで管理する光合成促進管理を実施した結果、全栽培期間で対照区より15%の増収効果が得られた。推定日積算光合成量は、日射量の少ない11~2月期間で対照区比115%、3月以降で120%となった。CO₂施用の灯油代は89%増加したものの、売上げは15%増加したため、差し引きで13%の収益向上となった。

キーワード：ピーマン、FvCB モデル、着果負担、光合成促進管理、データ駆動型農業

はじめに

高知県は、2023年産の全国ピーマン生産量において第3位を占める重要な産地であり¹⁸⁾、ピーマンは県内で系統販売金額第5位の主要品目として位置づけられている¹¹⁾。しかしながら、生産者の高齢化による将来的な生産者数の減少が予想されるなか、販売額の維持・拡大を図るためには、単位面積当たりの収益性向上と安定生産技術の確立が急務となっている。近年、増収技術として炭酸ガス(以下、CO₂)施用を始めとする環境制御技術が注目され、促成ピーマン栽培においても広く導入が進んでいる。国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構(以下、農研機構)の報告によると、イチゴ促成栽培における局所CO₂施用技術により、全体施用と比較して22%の増収効果と27%の燃油使用量削減が同時に実現されており、環境制御技術の導入による生産効率性向上の可能性が実証されている¹⁷⁾。

安定した収量と品質を得るためには、光合成、蒸散、葉面積、葉温、着果負担などの植物の生理生態情報に基づく科学的な栽培管理が必要である。Farquhar et al. (1980)⁴⁾により提唱されたFvCBモデルは、植物の光合成メカニズムを生化学的に記述するモデルとして広く用いられており、CO₂濃度や温度などの環境要因が光合成に与える影響を定量的に評価することが可能である²⁰⁾。ピーマンにおいても、Kim et al. (2016)⁹⁾により3次元光線追跡シミュレーションと組み合わせたFvCBモデルの適用例が報告されており、群落内の光合成パラメータの垂直分布を高精度で予測することに成功している。

しかしながら、現状では生理生態情報の可視化やそれらを活用した栽培管理についての研究事例は限定的であり、生産現場における栽培管理の判断は依然として生産者の経験と勘に大きく依存している。農林水産省の新規就農者調査による

*現安芸農業振興センター

**高知大学 IOP 共創センター

と、新規就農者が就農時に困難を感じる要因として「農地の確保」、「資金の確保」に次いで「営農技術の習得」が挙げられており²³⁾、篤農家の知識や技術の体系化・継承が重要な課題となっている。このような背景から、生産者の経験則に依存した従来の栽培管理から、定量化された生理生態情報に基づく科学的な栽培管理手法への転換が必要である。

高知県では、内閣府地方大学・地域産業創生交付金事業による産学官連携プロジェクト「『IoP(Internet of Plants)』」が導く「Next 次世代型施設園芸農業」への進化」に平成30年から取り組んでおり、IoTやAI技術を統合した次世代施設園芸システムの開発が進められている¹⁰⁾。同プロジェクトでは、促成ナス栽培において光合成速度や花数・果実数といった生理生態情報の可視化が実現され、データ駆動型農業による収量・品質向上の可能性が確認されている。

以上の背景を踏まえ、本研究では試験1として、促成ピーマンの個葉光合成の可視化に向け、モデルパラメータの取得と推定精度の検証を行った。具体的には、FvCBモデルに基づく光合成パラメータの同定と、実際の栽培環境下での光合成速度の推定精度を評価した。また、試験2として、可視化された光合成速度と着果数といった生理生態情報を活用したCO₂施用濃度および日中温度管理が生育、収量および経済性に及ぼす影響について評価した。本研究は内閣府地方大学・地域産業創生交付金「『IoP(Internet of Plants)』」が導く「Next 次世代型施設園芸農業」への進化」の助成を受けて実施した。

材料および方法

試験1. 個葉光合成モデルパラメータの取得と推定精度の検証

1) 個葉光合成モデルの概要

個葉光合成速度(以下、光合成速度)は、FvCBモデルを基本とし、気孔コンダクタンスモデル¹³⁾、物質移動モデル⁵⁾、および葉面エネルギー収支モデル⁷⁾を結合した統合モデルを用いて推定した。本モデルでは、光合成光量子束密度(以下、PPFD)、CO₂濃度、気温、湿度を入力変数として、RuBP再生に律速される場合の光合成速度とRubiscoによる酵素反応に律速される場合の光合成速度の小さい方を、実現される純光合成速度とする。詳細な計算手順は、Nomura et al. (2023)¹⁶⁾お

また、気孔コンダクタンスモデルのパラメータg0とg1は、光合成速度とPPFDの関係から推定した。測定条件は、CO₂濃度400ppm、チャンバー内湿度を60%、葉温を25℃に設定した後、PPFDを500μmol/m²/sに設定し光合成速度が安定してから、PPFDを1,500, 1,000, 750, 500, 250, 100, 50, 0μmol/m²/sの順に変化させ、8分間隔で測定した。得ら

よびNagao et al. (2025)¹⁵⁾に従った(表1)。

2) 試験ほ場および耕種概要

高知県農業技術センター(以下、高農技セ)内の土耕ピーマン栽培ほ場で実施し、供試品種には、「みおぎ」を穂木とし、台木を「台助」として8月末から翌年6月末までの促成栽培とした。

栽植密度は1.85株/m²の2条2本仕立てとし、10月中旬～11月下旬に地上100～130cmの高さで摘心した。側枝は主枝から20cm(5節程度)まで着果させ、収穫後に2～3節に切り戻した。かん水は、うね面から深さ20cmに設置したpFメータ(DIK-8333, 大起理化工業(株))の値が1.8を超えた場合に1日当たり3～5t/10aを複数回に分けてかん水した。追肥は窒素成分で1.5kg/10aを1週間に1回行った。ハウス内の温度管理は、日中は25～28℃を目標に換気し、夜間は18℃を下回らないように加温した。飽差管理は、ハウス内の飽差値が6.0g/m³を越えた場合に細霧装置(Cool BIM, (株)いけうち)により加湿した。CO₂施用は灯油燃焼式炭酸ガス施用機(真呼吸, (株)誠和)を用いて、時期によって設定を違え、450～650ppmの設定値を下回った場合に、株元に設置したダクトから施用した。

3) 調査内容および方法

FvCBモデルと気孔コンダクタンスモデルには同定する必要がある複数のパラメータが含まれており、本研究では、4つのパラメータ(V_{max} , J_{max} , g_0 および g_1)は、葉のガス交換測定に基づいて推定し、他のパラメータ(K_s , K , Γ^* , α , β , θ および Φ_{max})については文献値²⁶⁾を使用した。

V_{max} (最大カルボキシル化速度)と J_{max} (最大電子伝達速度)は、光合成蒸散測定装置(LI6800, LI-COR社)を使用して光合成速度、葉内CO₂濃度等を測定し、その関係から推定した。測定は、PPFDを1500μmol/m²/s、チャンバー内相対湿度を60%に設定した上で、CO₂濃度を400, 200, 100, 50, 400, 550, 700, 900, 1,200, 1,500ppmの順に変化させ、20～40℃の異なる葉温で実施した。得られた光合成速度と葉内CO₂濃度の関係から、表1の式(2)と式(3)を用いて、未知のパラメータ V_{max} と J_{max} を推定した。推定では、葉内CO₂濃度400ppmまでをRubisco律速域とみなし、400ppm以上をRuBP再生律速域としてパラメータを決定した。

れたデータから、式(9)を用いて水蒸気に対する気孔コンダクタンス(g_{sw})と生理学的指標(1.6AL/Cs√DL)の関係を線形回帰してg0とg1を推定した。

測定部位は群落上部の開花期から果実長1cm程度までの发育段階にある果実もしくは花の基部に着生する完全に展開した健全葉3～4枚を選定した。また、複数月にわたって

表1 個葉光合成速度の推定に適用される生理生態学的モデル

	モデル式	式	参考文献
個葉光合成モデル	$A_L = \min(A_c, A_j)$	(1)	Farquar et al.(1980)
	$A_c = V_{\text{cmax}}(C_i - \Gamma^*) / \{C_i + K_c(1 + O / K_o)\} - R_d$	(2)	Farquar et al.(1980)
	$A_j = J(C_i - \Gamma^*) / (4C_i + 8\Gamma^*) - R_d$	(3)	Farquar et al.(1980)
	$J = \{I_2 + J_{\text{max}} - \sqrt{(I_2 + J_{\text{max}})^2 - 4I_2 J_{\text{max}} \theta}\} / 2\theta$	(4)	vonCaemmerer(1980)
	$I_2 = \alpha \beta \phi_{\text{max}} I$	(5)	vonCaemmerer(1980)
葉面の物質輸送方程式	$A_L = g_{\text{ac}}(C_a - C_s)$	(6)	Gaastra(1959)
	$A_L = g_{\text{sc}}(C_s - C_i)$	(7)	Gaastra(1959)
	$E_L = (g_{\text{aw}}^{-1} + g_{\text{aw}}^{-1})^{-1}(W_s(T_L) - W_a)$	(8)	Gaastra(1959)
気孔コンダクタンス	$g_{\text{sw}} = g_0 + 1.6(1 + g_1 / \sqrt{D_L}) A_L / C_s$	(9)	Medlyn et al.(2011)
葉の熱収支式	$R_{\text{abs}} - \varepsilon_L \sigma_{\text{SB}} T_L^4 - H - \lambda E_L = 0$	(10)	Jones(2013)
V_{cmax} 、 J_{max} の温度依存性	$p_{T_L} = p_{25} \exp \left\{ c - \frac{\Delta H_a}{RT_L} \right\} / \left\{ 1 + \frac{\exp(\Delta ST_L - \Delta H_d)}{RT_L} \right\}$	(11)	Bernacchi et al.(2003)
R_d の温度依存性	$p_{T_L} = p_{25} \exp \left\{ c - \frac{\Delta H_a}{RT_L} \right\}$	(12)	Bernacchi et al.(2003)
Γ^* 、 K_c 、 K_o の温度依存性	$p_{T_L} = \exp \left\{ c - \frac{\Delta H_a}{RT_L} \right\}$	(13)	Bernacchi et al.(2003)

注) A_c :ルビスコ律速時の個葉光合成速度($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 A_j :RuBP律速時の個葉光合成速度($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 A_L :個葉光合成速度($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 c :葉の温度依存性パラメータのスケーリング係数、 C_a :外気CO₂濃度($\mu\text{mol mol}^{-1}$)、 C_i :葉内CO₂濃度($\mu\text{mol mol}^{-1}$)、 C_s :葉面CO₂濃度($\mu\text{mol mol}^{-1}$)、 D_L :葉面飽差(kPa)、 E_L :個葉蒸散速度($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 g_{ac} :CO₂に対する葉面境界層コンダクタンス($\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 g_{aw} :H₂Oに対する葉面境界層コンダクタンス($\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 g_{sc} :CO₂に対する気孔コンダクタンス($\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 g_{sw} :H₂Oに対する気孔コンダクタンス($\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 g_0 :気孔コンダクタンスモデルのy切片($\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 g_1 :気孔コンダクタンスモデルの傾き($\text{kPa}^{0.5}$)、 H :葉の顕熱(W m^{-2})、 ΔH_a :葉の温度依存性葉パラメータの活性化エネルギー(Jmol^{-1})、 ΔH_d :葉の温度依存性葉パラメータの非活性化エネルギー(Jmol^{-1})、 I :光合成有効光子束密度($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 I_2 :光化学系IIで吸収される光子束密度($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 J :電子伝達速度($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 J_{max} :最大電子伝達速度($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 K_c :ルビスコのカルボキシル化におけるミカエリスメンテン定数($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 K_o :ルビスコの酸素化におけるミカエリスメンテン定数、($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 O :葉内酸素濃度(mmol mol^{-1})、 p_{T_L} : T_L の時の葉パラメータ、 p_{25} :25℃の時の葉パラメータ、 R :気体定数($8.31\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$)、 R_{abs} :吸収された放射量(Wm^{-2})、 R_d :日中の呼吸速度($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 ΔS :温度依存性葉パラメータのエントロピー項($\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$)、 T_L :葉温(K)、 V_{cmax} :最大カルボキシル化速度($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 W_a :空気中の水蒸気濃度(mmol mol^{-1})、 $W_s(T_L)$: T_L での飽和水蒸気濃度(mmol mol^{-1})、 α :葉の吸光率(0.84)、 β :光化学系IIに到達する光の割合(0.5)、 Γ^* :ミトコンドリア呼吸を無視した場合のCO₂補償点($\mu\text{mol mol}^{-1}$)、 ε_L :葉の放射率、 θ :経験的な曲率係数(0.7)、 λ :水の蒸発時の潜熱($0.0442\text{Jmmol}^{-1}\text{at}20^\circ\text{C}$)、 σ_{SB} :ステファンボルツマン係数($5.67 \times 10^{-8}\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)、 ϕ_{max} :光化学系IIの最大量子収率(0.85)

測定したため、常時同じ群落の上部で直達光が当たる同じ葉齢の葉を対象とした。

さらに、モデル推定値の検証のため、実際の栽培環境下での光合成速度を測定した。測定には光合成蒸散測定装置の外光透過型リーフチャンバー(6800-12A, LI-COR社)を使用し、ハウス内の自然光条件下で実施した。

V_{cmax} と J_{max} を推定するための測定は2020年4月4日、9月29日、10月28日、2021年1月26日、3月9日、2024年2月7日に行い、 g_0 と g_1 は、2022年12月8日、実測値は2023年2月1日、3月5日、2025年4月9日、5月22日に行った。

試験2. 生理生態情報を活用したCO₂濃度および日中温度管理が生育、収量および経済性に及ぼす影響

1) 試験ほ場および耕種概要

高農技セ内に設置した隣接する2棟のSRHハウス(軒高2.8m、間口7.5m、奥行き20m、エフクリーンナジジフィルム展張)において土耕栽培で行った。

2023年8月31日に9cmポット苗をうね幅180cm、株間60cm、条間20cmの2条植え(栽植密度1.85株/m²)で定植した。主枝は2本仕立てとし、11月中旬から下旬に地上130cmの高さで摘心した。側枝は、主枝から20cm(5節程度)まで着果させ、収穫後に2〜3節に切り戻した。収穫開始は9月下旬で、1果重28〜40gを目安に週3回、翌年6月下旬まで収穫した。かん水管理および追肥、飽差管理は試験1と同様とした。

2) 試験区の設定

着果負担の程度に応じて日中温度およびCO₂濃度を調整する光合成促進管理区と、慣行管理を行う対照区を設定した。

光合成促進管理区では、以下の基準により管理条件を変更した。1週間ごとに果実長1 cm以上の果実数を各ハウス6株（計12主枝）で計測し、単位面積当たりの着果数を算出した。ついで、試験1より得られたパラメータを使用し、ハウス内の環境より推定された日積算光合成量の1週間平均値を算出し、 m^2 当たりの着果数で除して1果実当たりの光合成量を算出した。摘心前後の11月8日から翌年4月30日までの期間に1果実当たりの光合成量が0.5gを下回った場合を着果負担が大きいとみなして、ハウス内の温度が29℃を越えないよう換気設定温度28.5℃にし、日中は23℃から換気開始温度まで5%開度でスカシ換気した。さらに、 CO_2 濃度は650ppmを目標に管理した（表2、図1）。なお、光合成促進管理を実施しない期間および対照区は日中の換気設定温度は26.5℃、 CO_2 濃度は450ppmを目標に管理した（表2）。

表2 換気温度および CO_2 濃度の設定

試験区	換気温度		CO_2 濃度
	スカシ換気	換気開始	
光合成促進管理区	23℃	28.5℃	650ppm
対照区	23℃	26.0℃	450ppm

注) 日中は23℃から換気開始温度まで5%開度でスカシ換気した。

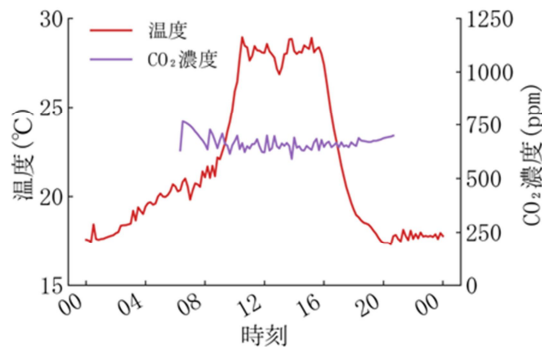


図1 光合成促進管理区における温度と CO_2 濃度の推移（10分平均）

- 注1) 測定日：2024年2月14日 晴天日
2) 日中は23℃から換気設定温度(28.5℃)まで天窓を5%開度でスカシ換気した。
3) CO_2 の施用時間は6時30分から17時30分までとした。

また、光合成促進管理の判断基準となる1果実当たりの光合成量は前年度のA品率と1果実当たりの光合成量との関係分析より、A品率90%以下となるケースがあった0.5gを基準値とした（図2）。

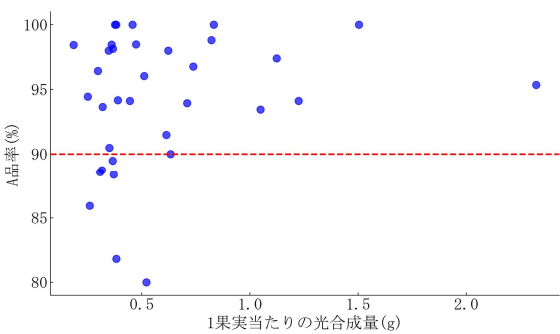


図2 1果実当たりの光合成量とA品率の分布
注1) 1果実当たりの光合成量は収穫時から2週間前の値とした。
2) A品率はJA高知県出荷規格のA品の割合とした。
3) 2022年9月29日から2023年6月2日の期間のデータを使用。

3) 調査内容および方法

環境測定は、温度、湿度、 CO_2 濃度、屋外日射量について環境制御装置(EyeFarm Cloud、(株)Nippo)より1分間隔のデータを収集した。ハウス内の環境測定は各ハウスの中央部、地上高130 cm(摘心位置付近)で実施した。なお、光合成速度の推定には屋外日射量とハウス内日射量の測定結果をもとに算出したフィルムの透過率0.8を屋外日射量に乗じてハウス内日射量を算出した。

生育調査は、1週間毎に開花数と着果数を6株調査した。また、2～3日ごとにその日もしくは前日に開花した花に開花日を記した提げ札を付けるとともに、1果重28～40gを目安に収穫し、収穫時に提げ札を回収する方法で開花から収穫までの所要日数(以下、収穫所要日数)および落花数を調査した。収穫所要日数および落花数は、3株調査とした。

収量・品質調査は、2～3日ごとに1果重28～40gを目安に収穫し、収穫した果実は、JA高知県出荷規格に従って可販品(A品・マルA品をそれぞれ上品・下品とする)および規格外品に分け、可販果収量、上品収量および上品率を求めた。下品および規格外品は着色不良果(白果、赤果)、変形果(曲がり果、奇形果)、細果、短径果、その他(石果、傷果等)に分類した。なお、収量・品質調査は、開花数・着果数調査と同一の6株について実施した。

結 果

試験1. 個葉光合成モデルパラメータの取得と推定精度の検証

V_{max} は、測定範囲である20～40℃において温度上昇とともに継続的に増加し、40℃で $257.9 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ に達した。一方、 J_{max} は35℃でピーク値 $307.3 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ に達し、40℃ではわずかに低下する傾向が認められた（図3）。時期ごとには、4月および9月に V_{max} が最も高くなり、4月に J_{max} が最も高くなった

(図4)．気孔コンダクタンスモデルのパラメータは、水蒸気に対する気孔コンダクタンス(g_{sw})と環境・生理指標($1.6A_L/C_s\sqrt{D_L}$)の線形関係から決定した(図5)．回帰分析の結果、 y 切片 $g_o = 0.08$ 、傾き $g_i = 3.74$ が得られ、決定係数は $R^2 = 0.75$ であった．同定されたパラメータを用いたFvCBモデルによる光合成速度の推定値と、実際の栽培環境下での実測値を比較した結果、高い相関関係が認められた($R^2=0.77$, RMSE=3.13)(図6, 表3)．

試験2. 生理生態情報を活用したCO₂濃度および日中温度管理

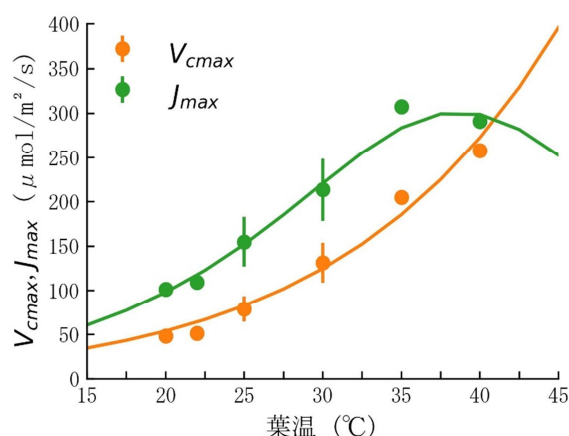


図3 V_{cmax} および J_{max} の葉温依存性

- 注1) V_{cmax} および J_{max} は、20～40℃で測定した複数の葉温における光合成速度とCO₂濃度との関係から推定した．
2) エラーバーは標準誤差

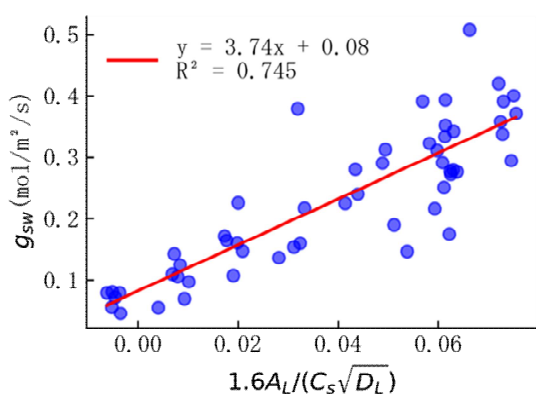


図5 気孔コンダクタンスパラメータ(g_o と g_i)の推定

- 注) g_o および g_i は、水蒸気に対する気孔コンダクタンス(g_{sw})と環境・生理指標($1.6A_L/C_s\sqrt{D_L}$)との関係から推定した(A_L : 葉の光合成速度, C_s : 葉面でのCO₂濃度, D_L : 葉面飽差)．

が生育、収量および経済性に及ぼす影響

光合成促進管理は、1果実当たりの光合成量が0.5gを下回った期間に実施した．具体的には、2023年11月8日から12月6日、12月20日から12月27日、2024年1月3日から2月14日、2月21日から3月13日および3月20日から5月1日において、日中温度28.5℃、CO₂濃度650ppmを目標に管理した．光合成促進管理での温度およびCO₂濃度の推定値を使用した光合成シミュレーションの結果、光合成速度が対照区比122%の増加となった(表4)．

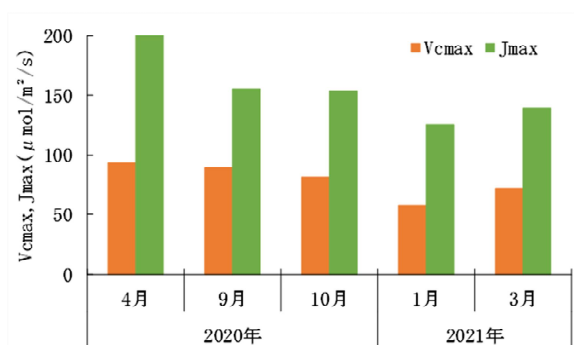


図4 葉温25℃における V_{cmax} および J_{max} の時期ごとの推移

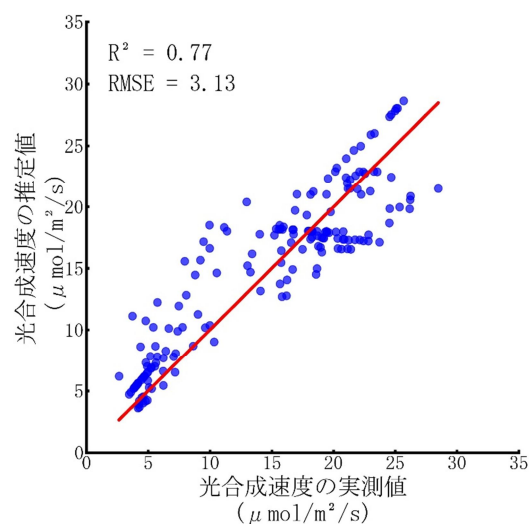


図6 光合成速度の実測値と推定値の関係

- 注1) 光合成速度の推定には表3のパラメータを使用して推定した．
2) 光合成速度の実測は自然光チャンバーを用いて、ハウス内の環境に合わせて以下の条件で測定した．
(1) 温度 : 25～29℃ (2) 相対湿度 : 55～80%
(3) CO₂濃度 : 610～800ppm

表3 光合成速度の推定に利用するパラメータ

パラメータ	説明	25℃での値	C	Dha (J/mol)	DHd (J/mol)	DS (J/mol/K)
$V_{cmax} (\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1})$	最大カルボキシル化速度	78.628	25.143	62237	-	-
$J_{max} (\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1})$	光飽和時の最大電子伝達速度	152.630	23.000	57091	314833	999.99
$R_d (\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1})$	ミトコンドリア呼吸速度	1.179	18.720	46390	-	-
$K_c (\mu mol\ mol^{-1})$	CO ₂ に対するミカエリス定数	404.900	38.050	79430	-	-
$K_o (mmol\ mol^{-1})$	O ₂ に対するミカエリス定数	278.400	20.300	36380	-	-
$\Gamma^* (\mu mol\ mol^{-1})$	ミトコンドリア呼吸を無視したときのCO ₂ 補償点	42.750	19.020	37830	-	-
Φ_{max}	光化学系Ⅱの最大量子吸収率	0.85	-	-	-	-
β	光化学系Ⅱへ吸収される光の割合	0.5	-	-	-	-
α	葉の光吸収率	0.85	-	-	-	-
θ	電子伝達速度曲線(表1の式(4))の凸度	0.7	-	-	-	-
g_0	気孔コンダクタンスモデル(Medlynモデル)のy切片	0.082	-	-	-	-
$g_1 (kPa^{0.5})$	気孔コンダクタンスモデル(Medlynモデル)の傾き	3.744	-	-	-	-

注) V_{cmax} , J_{max} , R_d , K_c , K_o , および Γ^* は温度依存性を持つため、25℃でのパラメータ値と、それらの温度依存性を記述する従属パラメータを表記した(C: スケーリング定数, Dha: 活性化エネルギー, DHd: 不活性化エネルギー, DS: エントロピー。)

表4 ハウス内環境が光合成速度に及ぼす影響(光合成シミュレーション)

	温度 (℃)	CO ₂ 濃度 (ppm)	光合成速度 ($\mu mol/m^2/s$)	対比
対照管理	26	450	21.4	100
高め温度管理	28	450	21.6	101
高CO ₂ 施用管理	26	650	25.1	117
高CO ₂ 施用と 高め温度管理	28	650	26.2	122

注1) 光合成速度は以下の条件でシミュレーションした。

- (1)PPFD: 800 $\mu mol/m^2/s$ (2)相対湿度: 65%
- 2) 対比は対照管理を100とした場合の指数。

ハウス内環境は光合成促進管理区では、処理期間中の日中平均温度が対照区より1.0-1.5℃高く、CO₂濃度が約200ppm高く維持された。日積算光合成量の推定値は、日射量の少ない11～2月期間で対照区比115%、日射量が増加する3月以降で対照区比120%となった。日中飽差は11月にやや高く、それ以外の月では同様な推移を示した。屋外日射量は両区で同様な推移を示した(図7)。

開花数は11月上旬から2月下旬まで両区で同様に推移し、3月上旬から4月上旬にかけて光合成促進管理区で対照区より10-15%多く推移した。落花率は、処理開始直後の11月下旬から12月中旬にかけて光合成促進管理区で対照区より20%程度低くなった。2月中旬以降は両区で同等または光合成促進管理区でやや高く推移した。着果数は11月上旬まで両区で同等であったが、処理期間中は光合成促進管理区で対照区より5-

10%多く推移した(図8)。

収穫所要日数は月により異なる傾向を示した。12月は光合成促進管理区で対照区より7日長く、4月は4日長く、6月は5日長くなった。その他の月は両区で同様であった(図9)。

A品率は11月に光合成促進管理区で対照区より3%低く、2月に2%、3月に4%高くなった。その他の月は両区で同様に推移し、全期間の平均は両区とも85%であった(図10)。可販果収量は、12～3月期で光合成促進管理区が対照区より17%多く、4～6月期で18%多くなった。全栽培期間では光合成促進管理区が対照区より15%多かった(図11)。

売上げは光合成促進管理区で対照区より15%多かった。CO₂施用に要する灯油代は光合成促進管理区で対照区より89%多くなった。売上げから灯油代を差し引いた値は光合成促進管理区で対照区より13%多かった(表5)。

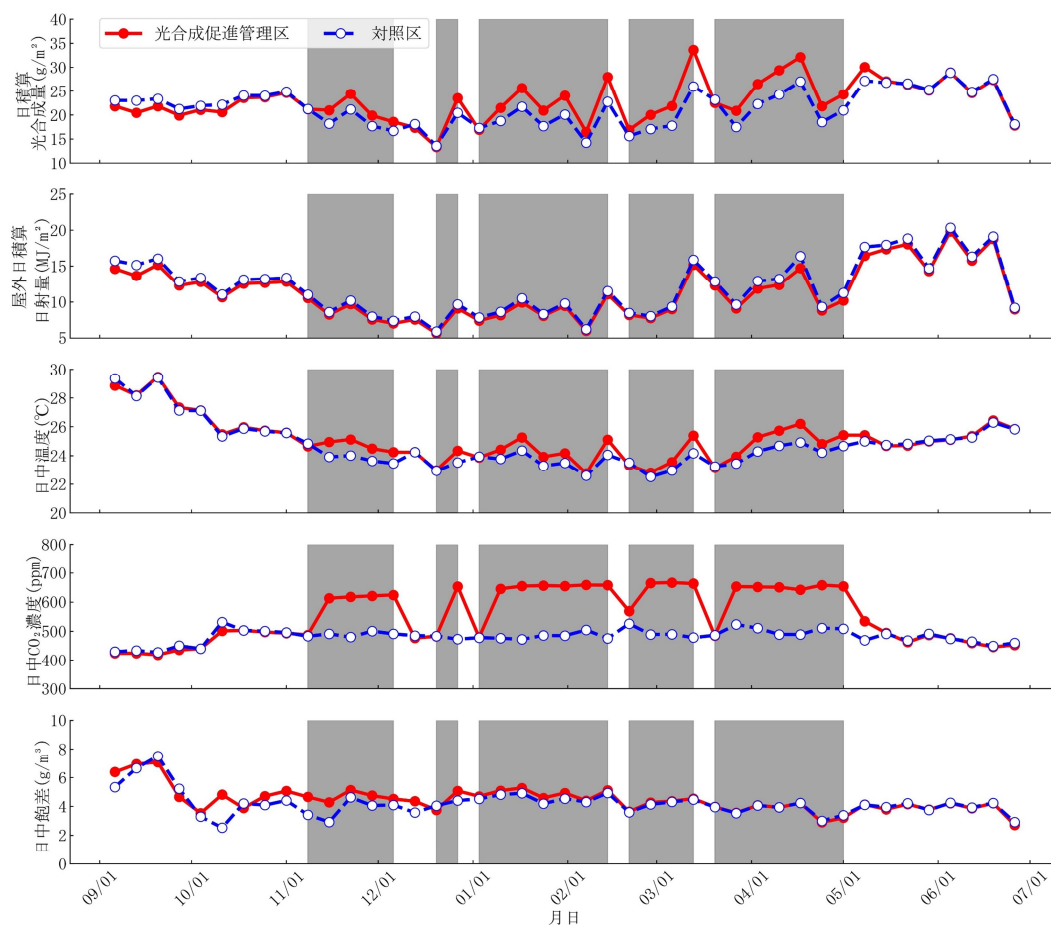


図7 日積算光合成量，屋外日積算日射量およびハウス内環境の推移(週平均)

注1) 灰色の枠線部分が処理期間を示す。

2) 光合成量は推定した光合成速度に、CO₂の分子量44(g/mol)を乗算して日積算値とした。

3) 日中は日の入から日の出までの平均値とした。

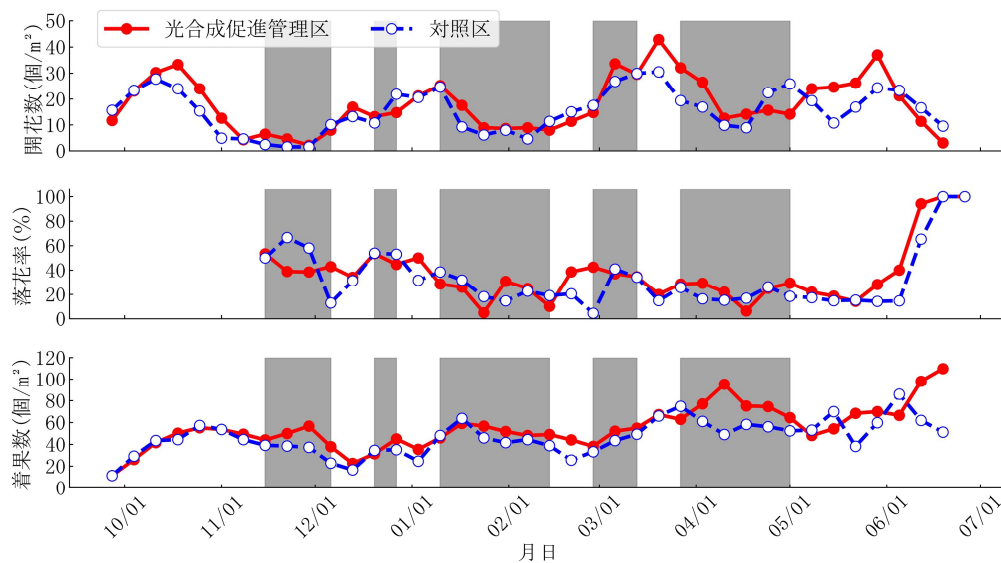


図8 開花数、落花率および着果数の推移

注1) 灰色の枠線部分は処理期間を示す。

2) 落花率は2～3日ごとに前日もしくはその日に開花した花をラベリングし、そのなかで収穫に至らなかったものの割合。

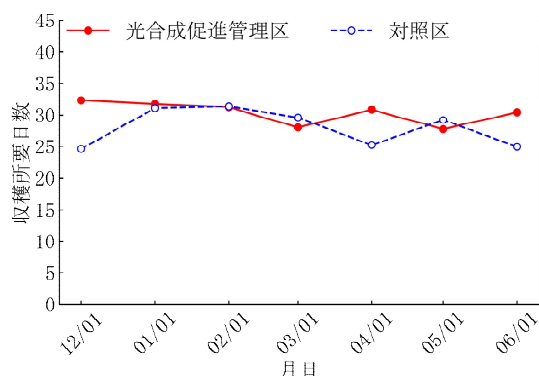


図9 収穫所要日数の推移

注) 各月に上品とした収穫した全果実の平均値。

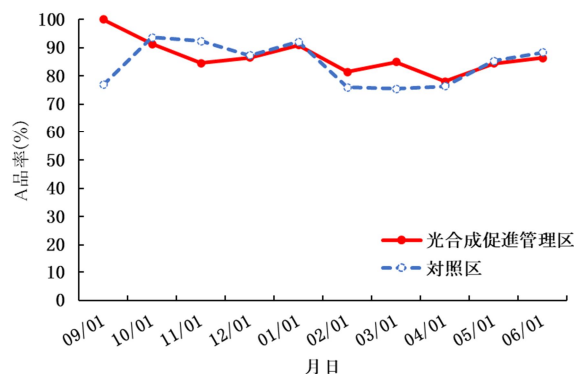


図10 A品率の推移

注) JA高知県出荷規格のA品とした。

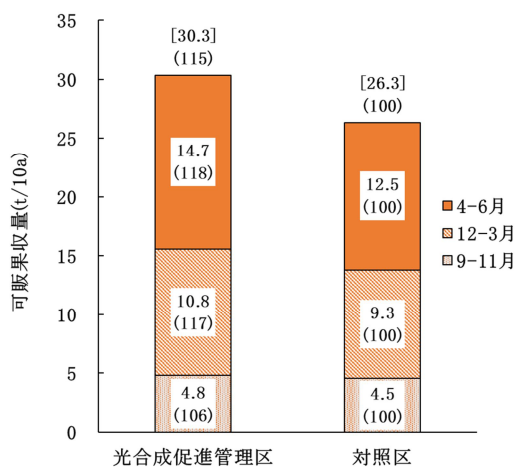


図11 可販果収量

注1) JA高知県出荷規格のA品およびマルA品の合計収量。

2) 対比は対照区を100とした場合の指数。

表5 売上げおよびCO₂施用にかかる灯油代

試験区	売上げ		CO ₂ 施用にかかる灯油代		売上げ-灯油代	
	(円/10a)	(対比)	(円/10a)	(対比)	(円/10a)	(対比)
光合成促進管理区	10,422,790	(115)	482,759	(189)	9,940,031	(113)
対照区	9,070,949	(100)	255,428	(100)	8,815,521	(100)

注1) 売上げは令和6年高知県の園芸より直近5年間の月別平均単価を可販果収量に乗じて求めた販売金額のうち手取金額を7割りとして計算した。

2) 灯油代は灯油使用量に115円/ℓを乗じて計算した。

3) 対比は対照区を100とした場合の指数。

考 察

試験1で同定されたFvCBモデルパラメータの精度検証において、推定値と実測値の間で高い相関関係($R^2=0.77$, $RMSE=3.13$)が得られたことは、Farquhar et al. (1980)⁴⁾により提唱された生化学的光合成モデルがピーマンにおいても十分な実用性を有することを示している。しかしながら、25℃における V_{cmax} および J_{max} はそれぞれ78.6 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ および152.6 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ であり、Kim et al. (2016)⁹⁾がピーマンで報告した値($V_{\text{cmax}} = 88.62 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, $J_{\text{max}} = 175.42 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)よりも低い値を示した。この差異は、栽培環境や品種の違いによるものと考えられる。実際に、Bernacchi et al. (2003)²⁾は、 J_{max} の温度応答は生育条件によって変化することを示しており、本試

験においても季節による差異が確認され、屋外日射量や外気温が高い4月および9月において高い値を示した。そのため、日射量や外気温の高い春季や初秋に測定した値を用いれば、 V_{cmax} および J_{max} は高くなると考えられる。

これらの結果から、栽培環境や品種の違いによる変化をモデルに反映することが、さらなる推定精度の向上には重要であると考えられる。

気孔コンダクタンスモデルのパラメータ($g_0 = 0.08$, $g_1 = 3.74$)は、Medlyn et al. (2011)¹³⁾のモデルによる予測値と良好な適合性($R^2 = 0.74$)を示した。これらの値は、Nomura et al. (2020)¹⁶⁾がナスで報告した値($g_0 = 0.1$, $g_1 = 3.3$)と近似している。ただし、気孔コンダクタンスモデルにも精度改善の余地があり、環境要因の季節変動や栄養状態による影響を考

慮したパラメータの動的調整が必要と考えられる。さらに、光合成速度を正しく評価するには、個葉レベルから群落レベルにスケールアップする必要がある。この点について、FvCBモデルと画像から推定した葉面積指数をニューラルネットワークに組み込む手法¹⁶⁾²¹⁾やFvCBモデルと3次元光線追跡シミュレーションを組み合わせた手法⁹⁾など、いくつかの方法が報告されており、今後の検討課題である。

試験2では、1果実当たりの光合成量0.5gを判断基準とした光合成促進管理により、全栽培期間で15%の増収効果が得られたことは、植物の生理生態情報に基づく環境制御の有効性を示している。CO₂施用の効果は、Mortensen(1987)¹⁴⁾や川島ら⁸⁾が報告したCO₂施用による促成栽培での増収効果と一致する結果であり、さらに着果負担という生理的指標を組み合わせることで、より効率的な環境制御が実現されたと評価できる。高濃度のCO₂条件下に長期間さらされると、光合成が抑制される現象(光合成の順化)が報告されているが¹¹⁾⁹⁾、Qian et al.(2012)³⁰⁾の研究によると、高CO₂濃度での光合成順化はシンク・ソースバランスが影響しており、着果負担が少ないときに光合成順化が発生することが明らかにされている。この知見は、本研究で採用した着果負担が大きい時期における高濃度CO₂施用の生理学的妥当性を支持している。実際、本研究では着果負担の大きい時期(1果実当たりの光合成量が0.5gを下回る時期)に限定して高CO₂条件を適用することで、光合成順化を回避しながら増収効果を得ることができたと考えられる。一方で、判断基準とした1果実当たりの光合成量0.5gは、前年度のA品率との相関分析に基づく経験的な数値であり、より体系的な判断基準の構築が求められる。なお、対照区における1果実当たりの光合成量と落花率の関係を検討したところ、栄養生長期か生殖生長期かによって影響の程度は異なるものの、光合成量が0.5gを下回った時期に落花率が増加する傾向が認められ(図12)、この判断基準の妥当性が示唆された。

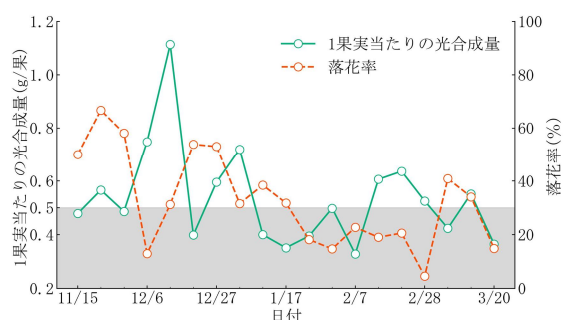


図12 対照区における1果実当たりの光合成量および落花率の推移

今後は、収量・品質目標、労働力・燃料コスト、市場価格動向および環境負荷などの複合的要因を組み込んだ意思決定モデルの開発が必要である。収穫所要日数が12月、4月、6月において対照区より長くなったことは、高CO₂・高温条件下での果実発育速度に対する影響を示している。これは、温度上昇により細胞分裂は促進されるものの、果実の肥大に必要な同化産物の転流が着果数増加により相対的に減少した可能性を示唆している。Marcelis(1993)¹²⁾はキュウリにおいて果実数の増加または温度の低下に伴い個々の果実の成長率が低下したと報告しており、本研究においては温度の上昇よりも着果負担の増加の影響が大きかったものと考えられる。今後は、果実発育ステージ別の同化産物要求量をモデル化し、個体レベルでのソース・シンク関係の動的変化を定量的に予測する必要がある。特に、果実の細胞分裂期と肥大期における環境応答の差異を明確化することで、発育ステージに応じたより精密な環境制御戦略の構築が可能となろう。A品率が全期間平均で両区とも85%と同等であったことは、光合成促進管理が収量向上を図りながらも品質を維持できることを示している。

経済性の観点では、売上げが15%増加した一方で、CO₂施用に要する灯油代が89%増加したものの、差し引きで13%の収益向上が達成された。この結果は、農研機構(2020)¹⁷⁾が報告したイチゴでの局所CO₂施用による22%増収と27%燃油削減効果と比較すると、燃料効率の面で改善の余地があることを示している。今後は、植物の生理状態により精密に対応したCO₂施用制御により、さらなる効率化が期待できる。

本研究により、FvCBモデルを用いたピーマンの光合成速度推定法を確立し、着果負担に基づく環境制御技術の有効性を実証した。個葉光合成パラメータの同定により高精度な推定が可能となり(R²=0.77)、1果実当たりの光合成量0.5gを判断基準とした光合成促進管理により15%の増収効果を達成した。今後の課題として、前述したが、栽培環境や品種差を考慮したパラメータの動的調整、個葉から群落レベルへのスケールアップ手法の改良、果実発育ステージ別の精密な環境制御戦略の構築、および経済性と環境負荷を統合した意思決定モデルの開発が挙げられる。これらの技術革新により、データ駆動型農業の実現に向けた科学的基盤が確立されることが期待される。

謝 辞

本研究の実施に当たって、北野雅治特任教授ならびに岩尾忠重特任教授をはじめとするIoP共創センターの皆様、先端生産システム担当、研究支援担当の諸氏に栽培管理や調査等にご尽力いただいた。ここに深く感謝の意を表する。

利益相反の有無

すべての著者は開示すべき利益相反はない。

引用文献

- 1) Amane Makino, Tadahiko Mae(1999). Photosynthesis and Plant Growth at Elevated Levels of CO₂. Plant and Cell Physiology, Volume 40, Issue 10 : 999-1006.
- 2) Bernacchi CJ, Singsaas EL, Pimentel C et al (2001). Improved temperature response functions for models of Rubisco-limited photosynthesis. Plant Cell Environ 24:253-259.
- 3) C. J. BERNACCHI, C. PIMENTEL, S. P. LONG. In vivo temperature response functions of parameters required to model RuBP-limited photosynthesis. Plant, Cell & Environment, Volume 26, Issue 9 : 1419-1430
- 4) Farquhar, G.D., von Caemmerer, S., Berry, J.A. (1980). A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species. Planta 149: 78-90
- 5) Gaastra P (1959). Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature, and stomatal diffusion resistance. internal PhD, WU
- 6) Hikosaka K, Noguchi K, Terashima I (2016). Modeling leaf gas exchange. Springer, Dordrecht : 61-100
- 7) Jones HG (2013). Plants and microclimate. Cambridge University Press, Cambridge
- 8) 川島信彦・山本英雄・黒住徹・谷川賢剛・田中良宏 (1993). 施設内における CO₂ 施用に関する研究(4). 奈良農試研報 24 : 25-30
- 9) Kim Jee Hoon , Lee Joon Woo , Ahn Tae In , Shin Jong Hwa , Park Kyung Sub , Son Jung Eek(2016). Sweet Pepper (Capsicum annum L.) Canopy Photosynthesis Modeling Using 3D Plant Architecture and Light Ray-Tracing. Frontiers in Plant Science, Volume 7
- 10) Kitano, M., Nomura, K., Yamazaki, T., Iwao, T., Saitou, M., Mori, M., Yasutake, D., Kaneko, T., Ukeda, H., Ishizuka, S., Fujiwara, T., Okabayashi, T(2022). Internet of Plants (IoP) empowers bottom-up innovations in greenhouse horticulture. Environ Control Biol. 60: 3- 12.
- 11) 高知県農業振興部(2024). 高知県の園芸. P53
- 12) L.F.M. Marcelis(1993). Fruit growth and biomass allocation to the fruits in cucumber. 1. Effect of fruit load and temperature. Scientia Horticulturae. Volume 54, Issue 2 : 107-121
- 13) Medlyn BE, Duursma RA, Eamus D et al (2011). Reconciling the optimal and empirical approaches to modelling stomatal conductance. Glob Change Biol 17:2134-2144
- 14) Mortensen, L.M. (1987). Review: CO₂ enrichment in greenhouses. Crop responses. Scientia Horticulturae. Volume 33, Issues 1-2 : 1-25
- 15) 永尾航洋(2025). 果菜類の生理生態情報の可視化手法に関する研究. 愛媛大学博士論文
- 16) Nomura, K., Kaneko, T., Iwao, T., Kitayama, M., Goto, Y., Kitano, M(2023). Hybrid AI model for estimating the canopy photosynthesis of eggplants. Photosynth. Res. 155: 77-92.
- 17) 農研機構(2022). (研究成果). 局所 CO₂ 施用技術によりイチゴの増収と CO₂ 施用にかかる燃油使用量の削減を両立できる.
- 18) 農林水産省(2024). 令和5年産野菜生産出荷統計 都道府県別の作付面積, 収穫量, 出荷量
- 19) R. T. Besford(1993). Photosynthetic Acclimation in Tomato Plants Grown in High CO₂. CO₂ and Biosphere, Vol. 104/105 : 441-448
- 20) T. Qian, J.A. Dieleman, A. Elings, L.F.M. Marcelis(2012). Leaf photosynthetic and morphological responses to elevated CO₂ concentration and altered fruit number in the semi-closed greenhouse. Scientia Horticulturae, Volume 145 : 1-9
- 21) Takahiro Kaneko, Koichi Nomura, Daisuke Yasutake, Tadashige Iwao, Takashi Okayasu, Yukio Ozaki, Makito Mori, Tomoyoshi Hirota, Masaharu Kitano(2022). Agricultural and Forest Meteorology, Volume 323
- 22) Yin, X., Struik, P.C. (2009). C3 and C4 photosynthesis models: An overview from the perspective of crop modelling. NJAS Wageningen J. Life Sci. 57: 27-38
- 23) 全国新規就農相談センター(2024). 新規就農者調査結果 : 172-179

Summary

In forced (early) cultivation of sweet pepper, we investigated the acquisition of parameters for a single-leaf photosynthesis model (the FvCB model) and examined CO₂ concentration and daytime temperature management techniques based on fruit load. Using a photosynthesis and transpiration measurement system, we estimated model parameters (maximum carboxylation rate, V_{cmax} , and maximum electron transport rate, J_{max}) and obtained a high correlation between estimated and measured photosynthesis rates ($R^2 = 0.77$, RMSE = 3.13). Periods during which the photosynthetic assimilation per fruit fell below 0.5 g were identified as periods of high fruit load. By implementing photosynthesis-promoting management at a daytime temperature of 28.5° C and a CO₂ concentration of 650 ppm during these periods, a 15% yield increase over the control was achieved across the entire cultivation period. The estimated daily cumulative photosynthesis was 115% of the control during the low-solar-radiation period from November to February and 120% from March onward. Although kerosene costs for CO₂ supplementation increased by 89%, sales revenue increased by 15%, resulting in a net profit improvement of 13%.

Keywords: sweet pepper, FvCB model, fruit load, photosynthesis-promoting management, data-driven agriculture

高知県の水稻奨励品種を判別する DNA マーカーの選定

武田俊也

Selection of DNA Markers to Identify the Recommended Rice Cultivars in Kochi Prefecture

Shunya TAKEDA

要 約

高知県の水稻奨励品種 13 品種を対象に、外観品質に依存せず遺伝子型によって品種を判別することが可能となる DNA マーカー 5 種 (RM9, RM8208, RM1320, いもち病真性抵抗性遺伝子 *Pia* または同 *Pii* の保有の有無を推定する DNA マーカー) を選定した。
キーワード : 品種判別, 奨励品種, 高知県, DNA マーカー, 水稻

はじめに

高知県では、高知県主要農作物種子生産要綱²⁾に基づいて、水稻奨励品種 13 品種の原原種、原種および一般種子が生産され、これらは県内水稻生産の基盤となっている。そのため、これらの種子生産には細心の注意が払われており、生産過程で異品種等の混入を避けるため、外観形質による品種判別が行われている。しかし、この判別方法では、外観形質が気象条件や栽培条件に大きく影響された場合や、育苗時等の外観形質情報が少ないステージの場合では、その判別が難しい。一方で、外観形質に依存せず、遺伝子型によって水稻品種を判別することが可能である DNA マーカーを用いた手法が広く用いられており、福井県³⁾や鹿児島県¹⁾、富山県⁷⁾では自県の水稻奨励品種を判別することができる DNA マーカーが選定されている。さらに、DNA マーカーを利用した品種判別については、ビジョンバイオ株式会社、日本穀物検定協会、株式会社サタケ等への委託分析も可能である。ただし、高知県の水稻奨励品種 13 品種の中には、高知県が独自に育成した品種も含まれており、他研究機関で選定されている DNA マーカーや委託分析が高知県の水稻奨励品種 13 品種に対応しているわけではない。また、新たに奨励品種が追加された場合は、委託分析が対応可能となるまで一定の期間を要する。

そこで本研究では、本県の水稻奨励品種の判別が可能となる DNA マーカーを選定した。

材料および方法

DNA マーカーの選定対象品種は高知県の水稻奨励品種 13 品種 (コシヒカリ, 南国そだち, よさ恋美人, にこまる, ヒノヒカリ, 黄金錦, アキツホ, 吟の夢, 土佐麗, さわかおり, ヒデコモチ, サイワイモチ, たまひめもち) とし、試料にはそれぞれの原原種を用いた。供試した DNA マーカーは McCouch ら³⁾により公開されているものの中で、福井県³⁾や鹿児島県¹⁾、富山県⁷⁾の報告を参考にし、選択した 12 種と Okuyama ら⁴⁾、Takagi ら⁶⁾、太田、野々上⁵⁾が公開しているいもち病真性抵抗性遺伝子 *Pia*, 同 *Pii* の保有の有無を推定できる DNA マーカー 2 種とした。選定基準は同一の PCR 条件で増幅産物が得られ、4.0%アガロースゲルで 2 種類以上の多型が確認でき、その判別が容易であることとした。各供試品種の DNA の抽出は葉身約 5cm をはさみで細断後、TE 溶液 (0.01 M Tris-HCl (pH 8.0), 0.001 M EDTA (pH 8.0)) を 500 μ L 加え、95°C で 20 分湯煎し、行った。PCR 反応液の組成は鋳型 DNA 2 μ L, プライマー各 0.05 μ L, Go taq Green Master Mix (Promega 製) 5 μ L, ヌクレアーゼフリー水 4.9 μ L とした。PCR 反応には、サーマルサイクラー [TP600 (TaKaRa 製)] を用い、初期変性 95°C 5 分保持後、熱変性 95°C 30 秒, アニール 59°C 30 秒, 伸長反応 72°C 1 分を 1 サイクルとして 35 反復し、最終伸長 72°C 5 分保持の条件で行った。得られた PCR 増幅産物を核酸染色試薬 [ミドリグリーンアドバンス (日本ジェネティクス製)] により染色した 4.0%アガロース

〔NusieveTMGTGTMAgarose（ロンザ製）〕/0.5%TBE ゲルで電気泳動後、トランスイルミネーター〔FTI-20M（フナコシ製）〕で観察し、多型を調査した。

結果および考察

供試した計 14 種の DNA マーカー全てから増幅産物が確認できたが、2 種類以上の多型が認められ、その判別が容易であった RM9, RM8208, RM1320, いもち病真性抵抗性遺伝子 *Pia* または同 *Pii* の保有の有無を推定する DNA マーカーの計 5 種を品種判別用 DNA マーカー候補として選定した（表 1, 図）。

これらのうち、DNA 増副産物のバンドがコシヒカリと同じ位置に見られたものを A, 異なるものを B としたところ、DNA マーカーの組み合わせによって高知県の水稲奨励品種である 13 品種を判別することができた（表 2）。

McCouch^③らによって公開されている 2,240 種類の DNA マーカーは、共優性であり、ホモ接合体とヘテロ接合体を区別できるため、交雑個体の判別が可能である。また、塩基配列情報が公開されているため、特許等の制限を受けずに使用できる利点がある。そのため、多くの県でこれらの情報を基に自県の水稲奨励品種を判別できる DNA マーカーセットを開発し

表1 選定したDNAマーカーとプライマー配列

DNAマーカー No.	DNAマーカー名	遺伝子名	染色体	プライマー名	配列(5'→3')	塩基対(bp)
1	RM9 ^{a)}	—	1	RM9-F RM9-R	GGTGCCATTGTGTCCTC ACGGCCCTCATCACCTC	18 18
2	RM8208 ^{a)}	—	3	RM8208-F RM8208-R	GCCCAAACACTACTCTCTTG GTAAATGCCTGAGTGCCTAC	20 20
3	RM1320 ^{a)}	—	1	RM1320-F RM1320-R	GTTAGTAGGGGCTGCACTG CTCTGCAGCAAACCAAAACC	20 20
4	—	<i>Pia</i> ^{b)}	11	Pia-F Pia-R	GCGACTGACACTTTCAATAGC CGGTAGAGCAATTTAGAAGCAG	21 22
5	—	<i>Pii</i> ^{c)}	9	Pii-2_SNP02 Pii-2_SNP03 Pii-IBRC-F Pii-IBRC-R	GATCATCTCATGGATCTTTTAATGC AGCTCTTCAGCGCTGTTTTC TCCAATGCTTCTGAAAGGTAGC TGGAACATGAACCCATATCC	25 20 22 21

a)McCouch *et al.*, 2002.

b)Okuyama *et al.*, 2011.

c)Takagi *et al.*, 2013., 太田・野々上, 2015.

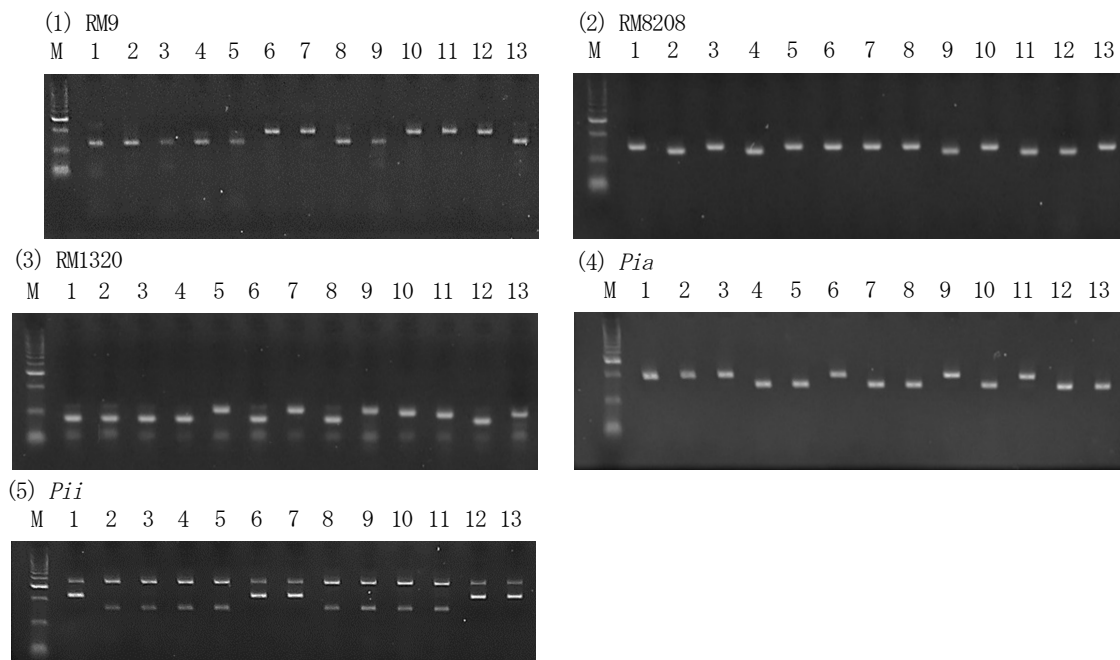


図 選定した DNA マーカーにおける増副産物の電気泳動結果

注) (1)～(5) は使用した DNA マーカー No. を示す。1:コシヒカリ, 2:南国そだち, 3:よさ恋美人, 4:にこまる, 5:ヒノヒカリ, 6:黄金錦, 7:アキツホ, 8:吟の夢, 9:土佐麗, 10:さわかおり, 11:ヒデコモチ, 12:サイワイモチ, 13:たまひめもち, M:サイズマーカーを示す。

表2 選定したDNAマーカーにおける各品種の判別結果

品種名	DNAマーカーNo.				
	1 (RM9)	2 (RM8208)	3 (RM1320)	4 (<i>Pia</i>)	5 (<i>Pii</i>)
コシヒカリ	A	A	A	A	A
南国そだち	A	B	A	A	B
よさ恋美人	A	A	A	A	B
にこまる	A	B	A	B	B
ヒノヒカリ	A	A	B	B	B
黄金錦	B	A	A	A	A
アキツホ	B	A	B	B	A
吟の夢	A	A	A	B	B
土佐麗	A	B	B	A	B
さわかおり	B	A	B	B	B
ヒデコモチ	B	B	B	A	B
サイワイモチ	B	B	A	B	A
たまひめもち	A	A	B	B	A

注) 各DNAマーカーの多型はコシヒカリ型をA, コシヒカリ型と異なるものをBとした。

ている。本研究では、福井県⁸⁾、鹿児島県¹⁾、富山県⁷⁾の報告で使用されているマーカーのうち、12種類を供試したが、県育成品種「よさ恋美人」とその親品種「コシヒカリ」の判別ができなかった。そこで、これら12種類のマーカーに加え、いもち病真性抵抗性遺伝子を推定するDNAマーカー2種類を組み合わせた結果、本県の水稲奨励品種である13品種の判別が可能となった。McCouch³⁾らによって公開されているDNAマーカーでは、高知県独自の水稲奨励品種においてどのような多型を示すのかが不明であったため、判別可能なDNAマーカーを選定することが難しいと考えられた。一方で、いもち病真性抵抗性遺伝子を推定するDNAマーカーについては、品種登録時や系譜の情報、いもち病検定試験の結果から多型を予測できるため、選定が容易であった。このことから、品種判別時に後者のDNAマーカーを利用することは有効であると考えられた。今後、水稲奨励品種の改廃に応じて、DNAマーカーを再検討、更新していくことが必要となるが、本研究成果は原原種、原種および一般種子の安定生産に寄与することが期待される。

利益相反の有無

著者は開示すべき利益相反はない。

引用文献

- 1) 橋口太亮・藤川和博 (2021) . DNA マーカーによる鹿児島県水稲奨励品種・適品種の識別技術. 日本作物学会九州支部会報 87 : 1-5.
- 2) 高知県 (2021) . 高知県主要農作物種子生産要綱. <https://www.pref.kochi.lg.jp/doc/2021081000282/>

(2024. 10. 31. 閲覧) .

- 3) McCouch, S. R., L. Teytelman, Y. Xu, K. B. Lobos, K. Clare, M. Walton, B. Fu, R. Fjellstrom, G. Declerck, D. Schneider, S. Cartinhour, D. Ware, and L. Stein (2002) . Development and mapping of 2240 new SSR Markers for rice (*Oryza sativa* L.) . DNA Research 9:199-207.
- 4) Okuyama, Y. H. Kanzaki, A. Abe, K. Yoshida, M. Tamiru, H. Saitoh, T. Fujibe, H. Matsumura, M. Shenton, D. C. Galam, J. Undan, A. Ito, T. Sone, and R. Terauchi (2011) . A multifaceted genomics approach allows the isolation of the rice *Pia*-blast resistance gene consisting of two adjacent NBS-LRR protein genes. The Plant Journal 66:467-479.
- 5) 太田裕貴・野々上慈徳 (2015) . DNA マーカーを利用した いもち病真性抵抗性遺伝子型推定. 東北農業研究 68:53-54.
- 6) Takagi, H. A. Umemura, H. Yaegashi, M. Tamiru, A. Abe, C. Mitsuoka, H. Utsushi, S. Natsume, H. Kanzaki, H. Matsumura, H. Saitoh, K. Yoshida, L. M. Cano, S. Kamoun, and R. Terauchi (2013) . MutMapGap: whole-genome resequencing of mutant F₂ progeny bulk combined with de novo assembly of gap regions identifies the rice blast resistance gene *Pii* . New Phytologist 200:276-283.
- 7) 富山県農林水産総合技術センター (2006) . 共優性型 DNA マーカーを利用した水稲および大豆品種の判別技術. 平成 18 年度研究成果
<https://taffrc.pref.toyama.jp/nsgc/nougyou/blog/kankoubutu/%e5%b9%b3%e6%88%9018%e5%b9%b4%e5%ba%a6%e7%a0%94%e7%a9%b6%e6%88%90%e6%9e%9c/> (2025. 9. 29. 閲覧)

8) 渡辺脩斗, 小林麻子, 中岡史裕, 茶谷弦輝 (2024). 福井
研の水稻奨励品種を判別する SSR マーカーセットの再改良
北陸作物学会報 59 : 20~23.

Summary

We selected five DNA markers (RM9, RM8208, RM1320, and markers estimating the presence or absence of the blast resistance gene *Pia* or *Pii*) that enable the identification of 13 recommended rice cultivars in Kochi Prefecture based on genotype rather than external quality.

Key words: cultivar identification, recommended cultivars, kochi prefecture, DNA markers, rice

農業用ドローンを用いた「土佐文旦」、 ポンカンおよびユズの病害虫防除体系の確立

谷大地*・谷本佑・中平龍介

Establishment of a Pest Management System on ‘Tosa-buntan’, Ponkan and Yuzu
Using Agricultural Drones

Daichi TANI, Yuu TANIMOTO and Ryusuke NAKAHIRA

要 約

農業用ドローン（以下、ドローン）を用いた「土佐文旦」、ポンカンおよびユズの病害虫防除体系を確立するため、散布方法を検討し、防除効果を検証するとともに労力削減効果を明らかにした。

1. 散布方法の違いによる液滴付着率については、「土佐文旦」において噴霧液滴サイズ(100 μ m および 285 μ m)、飛行速度(2.0m/s および 5.0m/s) および 10a 当たりの散布液量(10L および 15L)の違いによる差はみられなかった。また、ユズにおいて散布高度(樹冠上端から 1.0, 2.0, 4.0 および 6.0m) および飛行方法(旋回飛行, スピン飛行, 直線飛行(片道) および 直線飛行(往復))の違いによる差はみられなかった。一方、散布所要時間については、直線飛行(片道および往復)が、旋回飛行およびスピン飛行より短かった。
2. ドローン散布による防除により、黒点病の発病は「土佐文旦」およびユズにおいて人力散布と同程度であったが、ポンカンではやや劣る結果となった。貯蔵病害の発生はポンカンおよびユズにおいて人力散布と同程度であったが、ユズでは灰色かび病およびチャノキイロアザミウマの被害果の発生割合が人力散布より高かった。
3. 10a 当たりの農業散布時間は、ドローン散布が人力散布より 89%減少した。

キーワード:病害虫防除, ドローン散布, 飛行方法, 省力化

はじめに

高知県では温暖な気候を利用して、多くのカンキツ類が栽培されている。そのうち、「土佐文旦」(*Citrus maxima*)およびユズ(*Citrus junos*)は国内で最も栽培面積が大きく、ポンカン(*Citrus poonensis*)も全国3位の産地を形成している⁸⁾。しかし、いずれの品目とも生産者の高齢化および一経営体当たりの栽培面積の増加が進んでおり⁹⁾、防除作業が過重となっている。

農業用ドローン(以下、ドローン)は水稻を中心に導入されており、果樹の病害虫防除においても省力化が期待されている。しかし、ウンシュウミカン、水稻および綿ではドローンを用いた農業散布方法を検討した報告^{5,6,10)}はあるが、カンキツ類の中でも

樹体大きい「土佐文旦」や、平坦地ではウンシュウミカンよりも樹体が大きくなるポンカンおよびユズについての報告はない。また、カンキツ類においてドローン散布による病害虫防除効果を総合的に検討した事例や、労力削減効果を検討した事例もみられない。

そこで本報告では、高知県の特産カンキツである「土佐文旦」、ポンカンおよびユズにおけるドローンの飛行方法を検討し、効果的な農業散布方法を明らかにした。また、ドローン散布を主体とした病害虫防除を実施し、防除効果および労力削減効果を明らかにしたので報告する。

なお、本研究の実施に当たり、入交アグリーン株式会社、バイ

* 現幡多農業振興センター

エルクロップサイエンス株式会社および果樹試験場の職員から多大なる協力をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表す。

材料および方法

試験 1. ドローンによる散布方法の検討

1) 噴霧液滴サイズ、飛行速度および散布液量の検討

果樹試験場内(高知市朝倉, 以下, 場内)植栽の「土佐文旦」(26 年生, 平均樹高 2.9m, 平均樹幅 3.6m, 植栽密度 4.0×4.5m(56 樹/10a), 3 本主枝の開心自然形)を 3 樹供試した。2021 年 4 月 26 日に, 樹冠中心から 0.5m および 1.0m の地点に高さ約 3.0m の支柱を 1 樹当たり 2 本ずつ設置した。感水試験紙 (syngenta 社製 (サイズ 26mm×76mm), 以下, 感水紙) は, 感水面を上向きにして地表から 1.0m および 2.0m の高さに, 地表面に対して水平に支柱 1 本当たり 2 枚ずつ設置した(図 1, 写真 1)。ドローンは P30 (XAG 社製) を使用し, 表 1 に示すように噴霧液滴サイズ(ドローンの 4 つの回転翼の直下にある薬液噴出口に取り付けられた回転アトマイザーから噴霧される液滴サイズ), 飛行速度および散布液量をそれぞれ違い, 図 1 で示すように調査樹 3 樹の両側に平行して隣接する列を含めた計 9 樹に対し樹冠上端から約 1.0m の上空から水を散布した。ドローンの飛行方法は, 樹冠上部を時計回りに 1 周して旋回しながら散布する旋回飛行とした。その後, 感水紙面に付着した液滴の付着跡から画像処理ソフト ImageJ (<https://imagej.net/ij/>) により付着面積を測定した。なお, 液滴付着率は角川らの報告²⁾を参考に, 付着面積を NTSC 加重平均法で 8-bit グレースケール画像に変換し, 自動 2 値化した値に補正係数 0.7411 を乗じた値とした。

2) 散布高度の検討

場内植栽のユズ(25 年生, 植栽密度 3.0×4.0m(83 樹/10a), 平均樹高 3.2m, 平均樹幅 3.3m, 3 本主枝の開心自然形)を 3 樹供試した。2021 年 9 月 6 日に, 試験 1-1) と同様の位置に感水紙を設置した。ドローンは P30 を使用し, 表 2 に示すように樹冠上端から約 1.0, 2.0, 4.0 および 6.0m の上空から水を散布しながら旋回飛行した。その後, 試験 1-1) と同様の方法で液滴付着率を算出した。

3) 飛行方法の検討

場内植栽のユズ(26 年生, 植栽密度 3.0×4.0m(83 樹/10a), 平均樹高 2.8m, 平均樹幅 4.0m, 3 本主枝の開心自然形)を 3 樹供試した。2022 年 9 月 9 日に, 試験 1-1) と同様の位置に感水紙を設置した。4 種類の飛行方法(表 3, 図 2, ①旋回飛行: 試験 1-1) と同様の飛行方法, ②スピン飛行: 樹冠上部で時計回りに 2 周自転しながら散布する飛行方法, ③直線飛行(片道): 樹冠上の中心部を

結ぶ直線上を一方方向に移動しながら散布する飛行方法, ④直線飛行(往復): 樹冠上の中心部を結ぶ直線に対して左右に 0.5m ずつ離れた地点を直線上に往復散布する飛行方法。)によりドローンを飛行させながら水を散布し, 試験 1-1)

と同様の方法で液滴付着率を算出した。また, ドローンの離陸から着陸までの所用時間および人力散布の開始から終了までの所要時間を計測し, 10a 当たりの散布所用時間(植栽密度 83 樹/10a)に換算した。なお, 本研究の噴霧液滴サイズおよび飛行速度は, 散布液量を 15L/10a となるよう設定した。

4) 統計解析

試験 1) ~ 3) は, Kruskal-Wallis 検定により, 散布方法を比較した。エクセル統計 4.07 (社会情報サービス社製) を用いて統計解析を行った。

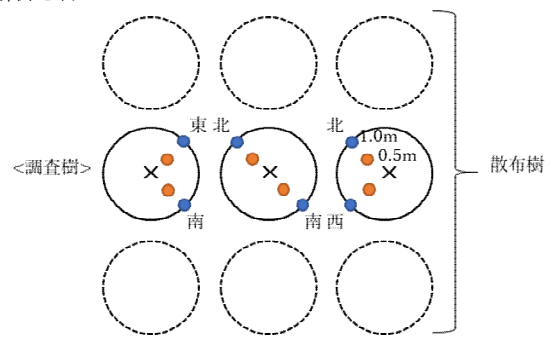


図1 支柱の設置地点

×: 樹冠中心

○: 樹冠中心から 0.5m の地点に設置した支柱

●: 樹冠中心から 1.0m の地点に設置した支柱

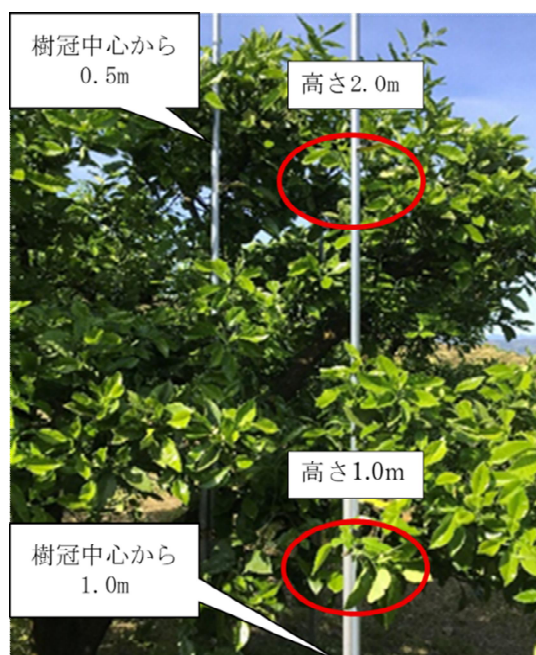


写真1 支柱への感水紙の設置方法

表1 噴霧液滴サイズ，飛行速度および散布液量の処理概要

試験区	飛行方法	噴霧液滴サイズ (μm)	飛行速度 (m/s)	散布液量 (L/10a)	散布液量 (mL/s) ^{y)}	樹冠上端からの距離 (散布高度) (m)
①	旋回飛行 ^{z)}	100	2.0	10	17.9	1.0
②		100	2.0	15	26.8	
③		100	5.0	10	17.9	
④		285	2.0	10	17.9	

z) 樹冠上部を時計周りに1周して旋回しながら散布する飛行方法。

y) 散布液量(mL/s)は，植栽密度56本/10aとして，旋回時間を10秒/樹と仮定した。

表2 散布高度の処理概要

試験区	飛行方法	噴霧液滴サイズ (μm)	飛行速度 (m/s)	散布液量 (L/10a)	散布液量 (mL/s) ^{y)}	樹冠上端からの距離 (散布高度) (m)
①	旋回飛行 ^{z)}	100	2.0	10	12.0	1.0
②						2.0
③						4.0
④						6.0

z) 樹冠上部を時計周りに1周して旋回しながら散布する飛行方法。

y) 散布液量(mL/s)は，植栽密度56本/10aとして，旋回時間を10秒/樹と仮定した。

表3 飛行方法の処理概要

試験区	飛行方法 ^{z)}	噴霧液滴サイズ (μm)	飛行速度 (m/s)	散布液量 (L/10a)
①	旋回飛行	100	2.0	15
②	スピン飛行	100	2.0	
③	直線飛行(片道)	105	1.0	
④	直線飛行(往復)	105	1.0	

z) 旋回飛行：樹冠上部を時計周りに1周して旋回しながら散布する飛行方法。

スピン飛行：樹冠上部で2周自転しながら散布する飛行方法。

直線飛行(片道)：樹冠上の中心部を結ぶ直線上を一方向に移動しながら散布する飛行方法。

直線飛行(往復)：樹冠上の中心部を結ぶ直線に対して左右に0.5mずつ離れた地点を直線上に往復散布する飛行方法。

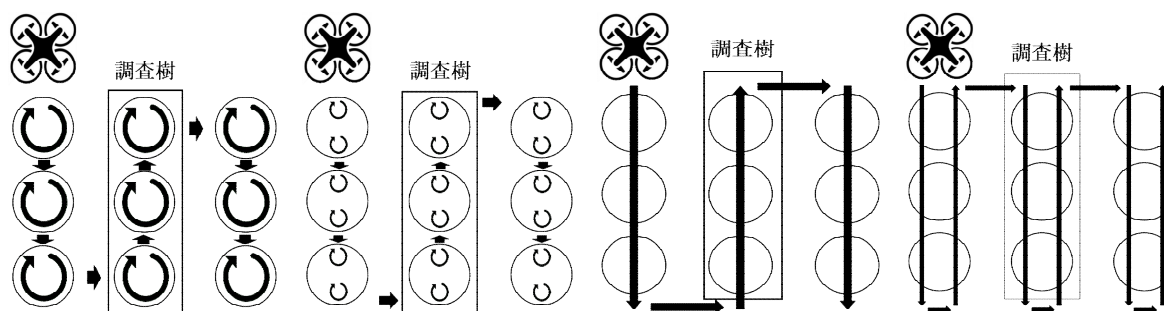


図2 飛行方法(左から，旋回飛行，スピン飛行，直線飛行(片道)，直線飛行(往復))

○：散布樹， →：散布経路

試験 2. 露地カンキツにおけるドローンを主体とした防除体系の検討

1) 「土佐文旦」(2021 年度)

場内植栽の「土佐文旦」(26 年生, 栽植密度 4.0×4.5m(56 樹/10a), 平均樹高 3.0m, 平均樹幅 4.3m, 3 本主枝の開心自然形)を 6 樹供試した。ドローン散布区と人力散布区(慣行)を設け, 表 4 のとおり農薬を散布し, 黒点病に対する防除効果を検討した。ドローンの飛行方法は巡回飛行とし, 飛行高度を樹冠上端から上空約 2.0m, 噴霧液滴サイズを 100 μ m, 飛行速度を 2.0m/s とした。人力散布区はマルチスプレーヤー(MRS60H-350-1, 株式会社丸山製作所製)にホースをつなぎ, スプレーノズルを用いて 1 樹ごとに 1 周しながら 3.6~12.5L/樹を散布した。

2) ポンカン(2022 年度)

場内植栽のポンカン「徳村系」(36 年生, 栽植密度 4.0×4.0m(63 樹/10a), 平均樹高 2.8m, 平均樹幅 4.0m, 3 本主枝の開心自然形)を 6 樹供試した。ドローン散布区と人力散布区(慣行)を設け, 表 5 のとおり農薬を散布し, 黒点病および貯蔵病害(緑かび病および青かび病)に対する防除効果を検討した。ドローンの飛行方法は巡回飛行とし, 高度を樹冠上端から上空約 2.0m, 噴霧液滴サイズを 100 μ m, 飛行速度を 2.0m/s とした。人力散布区はマルチスプレーヤーにホースをつなぎ, スプレーノズルを用いて 1 樹ごとに 1 周しながら 6.7~11.1L/樹を散布した。

3) ユズ(2023 年度)

場内植栽のユズ(27 年生, 栽植密度 3.0×4.0m(83 樹/10a), 平均樹高 2.5m, 平均樹幅 3.0m, 3 本主枝の開心自然形)を 6 樹供試した。ドローン散布区と人力散布区(慣行)を設け, 表 6 のとおり農薬を散布し, 黒点病および貯蔵病害(緑かび病および青かび病)に対する防除効果を検討した。また収穫果実を出荷規格の等級比率および落等要因毎に分類した。ドローンの飛行方法は, 畝を直線上に往復飛行する設定(図 2, 直線飛行(往復))とし, 高度を樹冠上端から上空約 2.0m, 噴霧液滴サイズを 105 μ m, 飛行速度を 1.0m/s とした。人力散布区はマルチスプレーヤーにホースをつなぎ, スプレーノズルを用いて 1 樹ごとに 1 周しながら 5.1~8.4L/樹を散布した。

4) 調査項目

(1) 黒点病

「土佐文旦」は, 2021 年 12 月 14 日に収穫した果実のうち M 級以上の全果(平均 168 果/樹), ポンカンは 2022 年 12 月 19 日に収穫した 2L 級の果実のうち 100 果/樹, ユズは 2023 年 10 月 31 日に収穫した果実のうち 100 果/樹について, 黒点病を発病指数別(指数 0: 病斑が見られない, 指数 1: 病斑が散見される, 指数 3: 病斑が果面の 1/4 以下に分布する, 指数 5: 病斑が果面の 1/4~1/2 に分布する, 指数 7: 病斑が果面の 1/2 以上に分布する(日本植物防疫協会調査法(果樹(病害))のかんきつ黒点病))に評価し(写真 2), 発病率および発病度を算出した。

表 4 「土佐文旦」の黒点病に対する防除薬剤の使用履歴²⁾(2021)

散布日	農薬名	ドローン散布			人力散布		
		希釈倍数	散布量 (L/10a)	薬液投下量 (g, mL/10a)	希釈倍数	散布量 (L/10a)	薬液投下量 (g, mL/10a)
6月15日	マンゼブ水和剤	5	4	800	600	600	1,000
7月 5日	マンゼブ水和剤	5	4	800	600	600	1,000
7月28日	マンゼブ水和剤	5	4	800	600	600	1,000
8月24日	マンゼブ水和剤	5	4	800	600	600	1,000
9月22日	テブコナゾール・トリフロキシストロビン水和剤	50	15	300	1,500	600	400

2) 希釈倍数, 散布量は 2022 年 12 月 1 日時点での登録内容に準じた。また, ドローンの飛行方法は巡回飛行とし, 飛行高度を樹冠上端から上空約 2.0m, 噴霧液滴サイズを 100 μ m, 飛行速度を 2.0m/s とした。

表 5 ポンカンの黒点病および貯蔵病害に対する防除薬剤の使用履歴²⁾(2022)

散布日	農薬名	対象病害虫	ドローン散布			人力散布		
			希釈倍数	散布量 (L/10a)	薬液投下量 (g, mL/10a)	希釈倍数	散布量 (L/10a)	薬液投下量 (g, mL/10a)
5月23日	マンゼブ水和剤	黒点病	5	4	800	600	420	700
6月10日	マンゼブ水和剤	黒点病	5	4	800	600	700	1,167
6月30日	マンゼブ水和剤	黒点病	5	4	800	600	700	1,167
7月28日	マンゼブ水和剤	黒点病	5	4	800	600	700	1,167
9月14日	テブコナゾール・トリフロキシストロビン水和剤	黒点病	50	15	300	1,500	700	467
12月 2日	チオファネートメチル水和剤	貯蔵病害	30	10	333	2,000	525	263

2) 希釈倍数, 散布量は 2023 年 10 月 27 日時点での登録内容に準じた。また, ドローンの飛行方法は巡回飛行とし, 高度を樹冠上端から上空約 2.0m, 噴霧液滴サイズを 100 μ m, 飛行速度を 2.0m/s とした。

表6 ユズの病害虫に対する防除薬剤の使用履歴^{a)} (2023)

散布日	農薬名	対象病害虫	ドローン散布			人力散布		
			希釈倍数	散布量 (L/10a)	薬液投下量 (g, mL/10a)	希釈倍数	散布量 (L/10a)	薬液投下量 (g, mL/10a)
5月 1日	クロチアニジン水溶液	訪花害虫	48	15	313	2,000	664	332
	テブコナゾール・トリフロキシストロビン水和剤	灰色かび病	50	15	300	1,500	664	443
5月24日	マンゼブ水和剤	黒点病	20	16	800	600	398	664
6月14日	マンゼブ水和剤	黒点病	20	16	800	600	664	1,107
	イミダクロプリド・エチプロール水和剤 ^{y)}	チャノキイロアザミウマ	100	16	160	2,000	664	332
7月 6日	マンゼブ水和剤	黒点病	20	16	800	600	664	1,107
7月27日	マンゼブ水和剤	黒点病	20	16	800	600	664	1,107
8月16日	テブコナゾール・トリフロキシストロビン水和剤	黒点病	50	15	300	1,500	664	443
	イミダクロプリド・エチプロール水和剤 ^{y)}	チャノキイロアザミウマ	50	15	300	2,000	664	332
9月 7日	テブコナゾール・トリフロキシストロビン水和剤	黒点病	50	15	300	1,500	700	467
10月27日	チオファネートメチル水和剤	貯蔵病害	30	10	333	2,000	420	210

z) 希釈倍数、散布量は2023年10月27日時点での登録内容に準じた。また、ドローンの飛行方法は、畝を直線上に往復飛行する設定（直線飛行（往復））とし、高度を樹冠上端から上空約2.0m、噴霧液滴サイズを105 μ m、飛行速度を1.0m/sとした。

y) 2025年6月時点で登録失効。



写真2 黒点病発病指数別の果実

(2) 貯蔵病害

ポンカンは、2022年12月19日に収穫した2L級の果実のうち60果/樹を供試し、2022年12月22日に長さ約15mのコンクリート斜面（傾斜角度10°）で2回転がして果実表面を傷つけた後、直ちにコンテナ（内寸：約985（横）×約535（縦）×約200mm（高さ））に15果ずつ並べた。発病を促すためにコンテナをポリエチレン袋（容量45L、厚み0.015mm）に入れ、袋の口を折り曲げ、場内の貯蔵庫内で常温貯蔵した（袋内平均温度7.4℃および平均湿度92.3%）。貯蔵開始27日後（2023年1月18日）に貯蔵病害（緑かび病および青かび病）の発病果数を調査し、腐敗果率を算出した。ユズは、2023年11月1日に収穫果実のうち30果/樹を長さ約10mのコンクリート斜面（傾斜角度10°）で1回転がして果実表面を傷つけた後、直ちにコンテナに15果ずつ並べた。発病を促すためにコンテナをポリエチレン袋（容量45L、厚み0.015mm）に入れ、袋の口を折り曲げ、場内の貯蔵庫内で常温貯蔵した（袋内平均温度12.0℃および平均湿度94.1%）。貯蔵開始56日後（2023年12月27日）に貯蔵病害（緑かび病および青かび病）の発病果数を調査し、腐敗果率を算出した。

(3) 等級比率

2023年10月31日に収穫した果実のうち100果/樹を「ユズ出荷規格表」（高知県農業協同組合営農販売事業本部）に準じて「平箱」，「ユズ5kg」（旧冬至）および「加工用」の3つの等級（「平箱」，「ユズ5kg」，「加工用」の順に等級が高い）に分類した。また，「ユズ5kg」および「加工用」への落等原因を果皮障害の種類（灰色かび病，訪花害虫，黒点病，チャノキイロアザミウマおよびスレ果）に応じて分類した。

5) 統計解析

ユズの収穫果実における等級比率は χ^2 検定，ユズの落等原因はMann-WhitneyのU検定により，ドローン散布と人力散布を比較した。エクセル統計4.07（社会情報サービス社製）を用いて統計解析を行った。

試験3. ドローンによる露地カンキツの防除体系における防除作業時間削減効果の検討

場内植栽のユズ（27年生，植栽密度3.0×4.0m（83樹/10a），平均樹高2.8m，平均樹幅4.0m，3本主枝の開心自然形）を10樹供試

した。ドローンの離陸から着陸までの時間と人力散布の散布開始から終了までの時間を各5回ずつ計測し、その平均時間を10a相当に変換した。ドローンの飛行経路は畝を直線上に往復飛行する設定(直線飛行(往復))とし、高度を樹冠上端約2.0m、速度を1.0m/s、噴霧液滴サイズを105 μ mとした。人力散布区はマルチスプレーヤーにホースをつなぎ、スプレーノズルを用いて、1樹ごとに1周しながら十分量散布した(図3)。

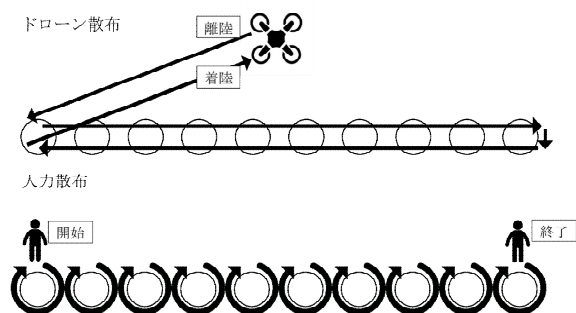


図3 散布経路 (上：ドローン散布, 下：人力散布)

結 果

試験1. ドローンによる散布方法の検討

1) 噴霧液滴サイズ、飛行速度および散布液量の検討

噴霧液滴サイズ100 μ m、飛行速度2.0m/s、散布液量10L/10a(試験区①)と噴霧液滴サイズ285 μ m、飛行速度2.0m/s、散布液量10L/10a(試験区④)の結果から、噴霧液滴サイズの違いによる液滴付着率に差はみられなかった。噴霧液滴サイズ100 μ m、飛行速度2.0m/s、散布液量10L/10a(試験区①)と噴霧液滴サイズ100 μ m、飛行速度5.0m/s、散布液量10L/10a(試験区③)の結果から、飛

行速度の違いによる液滴付着率に差はみられなかった。噴霧液滴サイズ100 μ m、飛行速度2.0m/s、散布液量10L/10a(試験区①)と噴霧液滴サイズ100 μ m、飛行速度2.0m/s、散布液量15L/10a(試験区②)の結果から、散布液量の違いによる液滴付着率に差はみられなかった(図4)。

2) 散布高度の検討

樹冠上端から約1.0、2.0、4.0および6.0mのいずれの散布でも液滴付着率に差はみられなかった(図5)。

3) 飛行方法の検討

いずれの飛行方法の散布においても液滴付着率に差はみられなかった(図6)。一方で、直線飛行(片道および往復)にかかる散布時間は、旋回飛行およびスピニング飛行に比べて短かった(表7)。

試験2. 露地カンキツにおけるドローンを主体とした防除体系の効果の検討

1) 黒点病

ドローン散布による「土佐文旦」およびユズの黒点病の発病果率および発病度は、人力散布と同程度であった。一方、ポンカンにおいてはドローン散布での発病果率および発病度がやや高かった(表8)。

2) 貯蔵病害

ドローン散布によるポンカンおよびユズの貯蔵病害の発生は、人力散布と同程度に抑えられた(表9)。

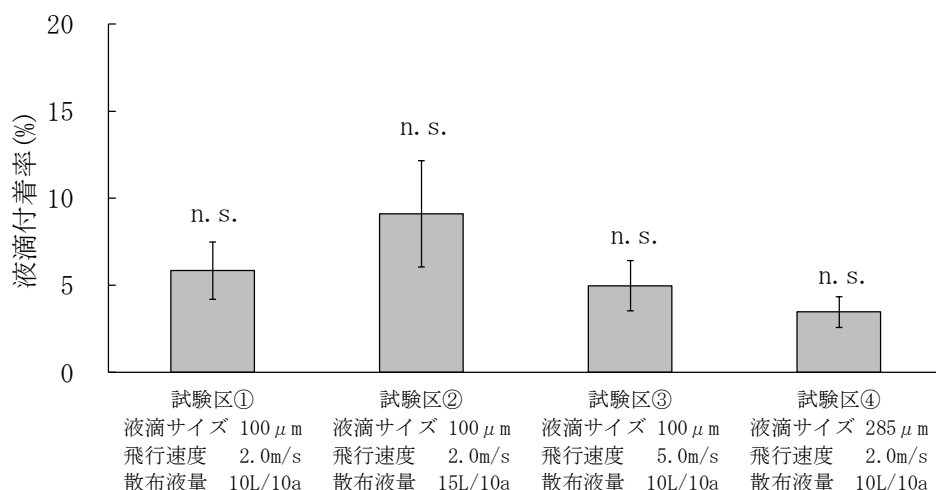


図4 噴霧液滴サイズ、飛行速度および散布液量の違いによる液滴付着率(「土佐文旦」)

注1) Kruskal-Wallis 検定により、n. s. は有意差なし。

2) 図中のエラーバーは、標準誤差(SE)を示す。

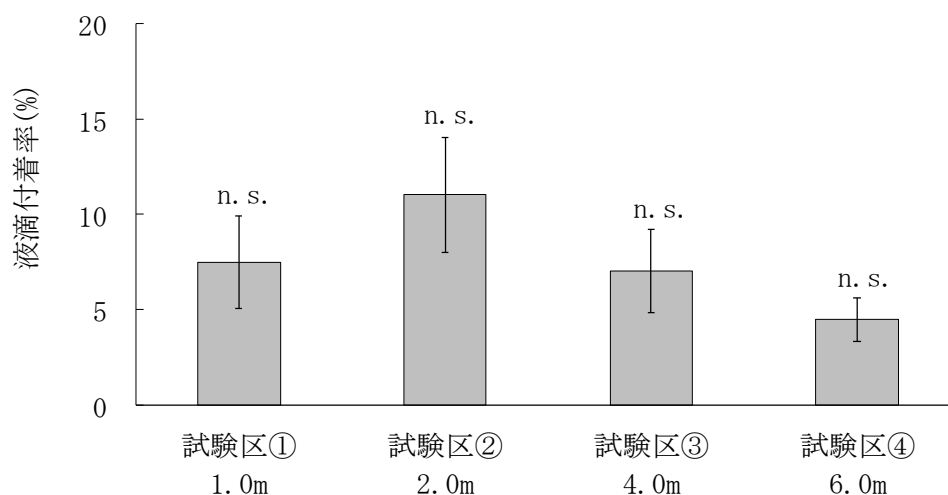


図5 樹冠上端からの距離の違いによる液滴付着率(ユズ)

注1) Kruskal-Wallis 検定により, n. s. は有意差なし。

2) 図中のエラーバーは, 標準誤差(SE)を示す。

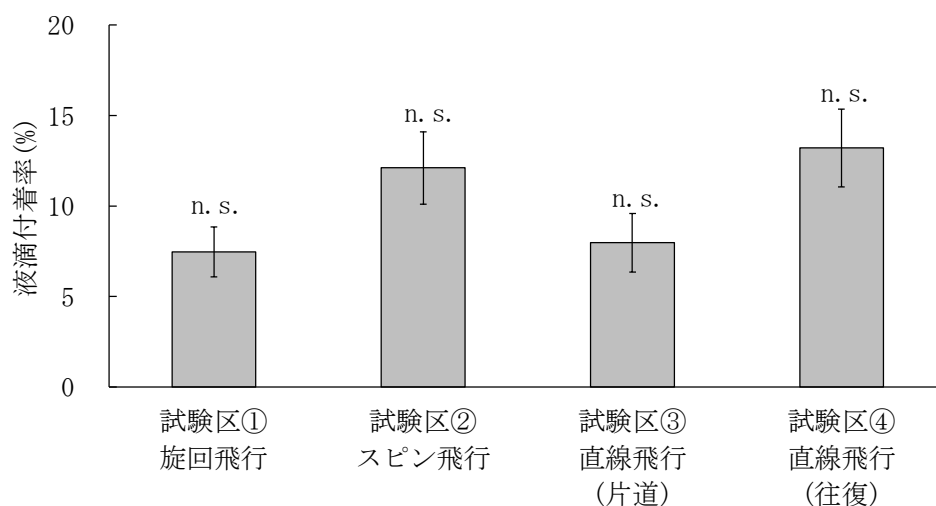


図6 飛行方法の違いによる液滴付着率(ユズ)

注1) Kruskal-Wallis 検定により, n. s. は有意差なし。

2) 図中のエラーバーは, 標準誤差(SE)を示す。

表7 飛行方法の違いによる散布所用時間

飛行方法	散布時間 ^{z)} (分)	割合 ^{y)} (%)
旋回飛行	28.1	100.0
スピン飛行	44.7	159.0
直線飛行(片道)	15.1	53.6
直線飛行(往復)	22.3	79.2

z) 83 本/10a に換算した散布時間. バッテリーや農薬の交換時間は含まない。

y) 旋回モードの散布時間を 100% としたときのそれぞれの飛行時間の割合。

表8 「土佐文旦」、ポンカンおよびユズの収穫果実における黒点病の発病指数別の果実割合

品目	散布方法	連制	調査 果数	発病指数別果数 ^{z)}				発病果率 (%)	発病度 ^{y)}
				0	1	3	5		
土佐文旦	ドローン	I	221	7	161	53	0	96.8	20.7
		II	158	27	116	11	3	82.9	15.5
		III	164	15	144	4	1	90.9	14.0
		平均	181	16.3	140.0	22.7	1.33	90.2	16.7
	人力	I	149	30	117	2	0	79.9	11.8
		II	135	30	100	5	0	77.8	12.2
		III	182	10	147	23	2	94.5	17.7
		平均	155	23.3	121.0	10.0	0.67	84.0	13.9
ポンカン	ドローン	I	100	93	7	0	0	7.0	1.0
		II	100	95	5	0	0	5.0	0.7
		III	100	83	16	1	0	17.0	2.7
		平均	100	90.3	9.3	0.3	0.0	9.7	1.5
	人力	I	100	98	2	0	0	2.0	0.3
		II	100	100	0	0	0	0.0	0.0
		III	100	99	1	0	0	1.0	0.1
		平均	100	99.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.1
ユズ	ドローン	I	100	59	41	0	0	41.0	5.9
		II	100	41	57	1	1	59.0	9.3
		III	100	42	57	1	0	58.0	8.6
		平均	100	47.3	51.7	0.7	0.3	52.7	7.9
	人力	I	100	36	63	1	0	64.0	9.4
		II	100	38	62	0	0	62.0	8.9
		III	100	75	25	0	0	25.0	3.6
		平均	100	49.7	50.0	0.3	0.0	50.3	7.3

z) 調査基準は、日本植物防疫協会の調査法に準じた。

発病指数：0;病斑なし, 1;病斑が散見される, 3;病斑が果面の1/4以下に分布する, 5;病斑が果面の1/4~1/2に分布する

7;病斑が果面の1/2以上に分布する

y) 発病度 = 調査果数 × Σ(程度別発病果数 × 指数) / (調査果数 × 7)

表9 ポンカンおよびユズの収穫果実における腐敗果率

品目	散布方法	連制	調査 果数	累計 腐敗果数 ^{z)}	腐敗果率 (%)
ポンカン	ドローン	I	60	46	76.7
		II	60	37	61.7
		III	60	44	73.3
		平均	60	42.0	70.6
	人力	I	60	41	68.3
		II	60	38	63.3
		III	60	41	68.3
		平均	60	40.0	66.7
ユズ	ドローン	I	30	11	36.7
		II	30	29	96.7
		III	30	27	90.0
		平均	30	22.3	74.4
	人力	I	30	15	50.0
		II	30	17	56.7
		III	30	19	63.3
		平均	30	17.0	56.7

z) ポンカンは貯蔵開始27日後、ユズは貯蔵開始56日後の青かび病と緑かび病を合計した腐敗果実発生数を示す。

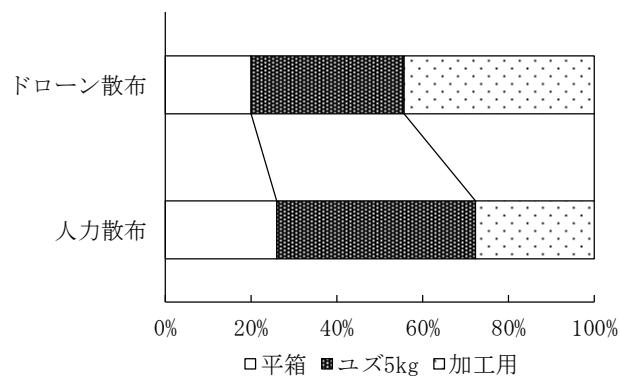


図7 ユズの収穫果実における等級比率(2023)

注1) 「ユズ出荷規格表」(高知県農業協同組合営農販売事業本部)に準じて分類した。

2) χ^2 検定により、ドローン散布と人力散布の等級比率に有意差なし。

表10 ユズの「ユズ5kg」（旧冬至）および「加工用」果実への落等原因(2023)

落等原因	散布方法	連制	調査果数	落等果実数
灰色かび病	ドローン	I	100	9
		II	100	8
		III	100	9
		平均	100	8.7
	人力	I	100	9
		II	100	0
		III	100	3
		平均	100	4.0
有意差			n. s.	
訪花害虫	ドローン	I	100	13
		II	100	11
		III	100	18
		平均	100	14.0
	人力	I	100	12
		II	100	13
		III	100	12
		平均	100	12.3
有意差			n. s.	
黒点病	ドローン	I	100	0
		II	100	2
		III	100	3
		平均	100	1.7
	人力	I	100	29
		II	100	42
		III	100	2
		平均	100	24.3
有意差			*	
チャノキイロアザミウマ	ドローン	I	100	14
		II	100	6
		III	100	9
		平均	100	9.7
	人力	I	100	0
		II	100	0
		III	100	2
		平均	100	0.7
有意差			*	
スレ	ドローン	I	100	1
		II	100	5
		III	100	3
		平均	100	3.0
	人力	I	100	7
		II	100	10
		III	100	8
		平均	100	8.3
有意差			*	

注1) Mann-Whitney 検定により*は5%水準で有意差あり, n. s. は有意差なし.

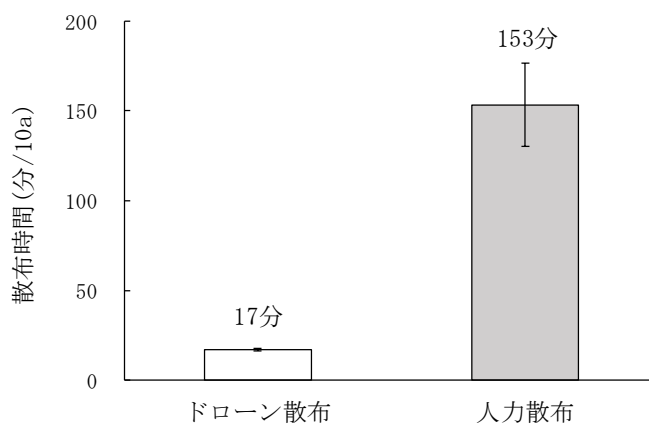


図8 ドローン散布と人力散布における10a当たりの散布所要時間

注) 図中のエラーバーは標準偏差を示す.

3) 等級比率

ドローン散布によるユズの等級比率は、人力散布と同程度であった(図 7)。また、ドローン散布による主な落等原因は、チャノキイロアザミウマの前期被害であった。また、ドローン散布によるスレ果の増加はみられなかった(表 10)。

試験 3. ドローンによる露地カンキツの防除体系における労力軽減効果の検討

ドローンによる 10a 当たりの農薬散布時間は、人力散布と比較して 89%減少した(図 8)。

考 察

まず、「土佐文旦」でドローン散布における、噴霧液滴サイズ、飛行速度および 10a 当たりの散布量を違えて比較し、最適な散布方法を検討した。いずれの試験においても有意な差はみられなかったが、噴霧液滴サイズ 100 μ m、飛行速度 2.0m/s、10a 当たりの散布量 15L の散布では、他の散布設定と比較して液滴付着率が高い傾向がみられた。Yan et al. (2023)¹¹⁾は、平均樹高 2.6m、平均樹高 2.9m のカンキツ類(品種の記載なし)に対するドローン散布において、散布量を 60L/ha から 120L/ha に増加させると、樹冠内の液滴落下数および葉面上の液滴被覆面積率が大幅に向上したと報告しており、本研究の結果においても散布量は異なるものの同様の傾向を示した。噴霧液滴サイズについては、100 μ m と比較して 285 μ m では液滴付着率が低い傾向がみられた。増井ら(2021)⁷⁾は、ウンシュウミカン「青島温州」(20 年生、開心自然形)のドローン散布において、散布粒径(噴霧液滴サイズ)が 100~195 μ m の範囲では粒径が小さいほど、樹冠内に設置した感水紙の液滴被覆面積率が高くなったと報告している。本研究でも噴霧液滴サイズが大きい場合、風の影響を受けず液滴が真下に落下することにより、樹全体への液滴付着率が低下する傾向がみられたと考えられた。一方で、噴霧液滴サイズが小さい場合、風やダウンウォッシュの影響を受けやすく液滴が飛散し、樹全体への液滴付着率が高くなる傾向がみられたと考えられた。なお、ポンカンやユズも平坦地では樹体が大きくなりやすく、薬液の付着は同様の傾向になると考えられた。

ユズでの散布高度検討では、散布高度による液滴付着率の差はみられなかったが、Ranabhat et al. (2025)の綿等での報告⁹⁾と同様に樹冠上端から約 2.0m の上空からの散布が他の散布高度と比較すると高くなる傾向がみられた。一方で、樹冠から約 1.0m の上空からの地点での散布では、散布幅が狭くなり樹冠上部の枝葉に液滴が遮られたこと、また、約 4.0m 以上の上空からの散布では、液滴の拡散や風の影響を受けやすくなったことで液滴付着率が低くなる傾向がみられたと考えられ

た。以上により、散布高度は樹体特性よりも環境条件に影響される傾向が強いと考えられるため、葉や樹体の大きさに関係なく「土佐文旦」およびポンカンにおいても同様の結果になると考えられた。

飛行方法の検討においても、飛行方法による差はみられなかったが、直線飛行(往復)およびスピン飛行での散布が他の飛行方法と比較して液滴付着率が高い傾向であり、これは直線飛行(往復)より螺旋飛行(本研究における旋回飛行)が薬液の被覆面積率が高くなったとする増井ら(2021)の報告⁷⁾と異なった。増井ら(2021)の報告⁷⁾では、散布液量 10L/10a、飛行速度 1.5m/s で散布しているが、本研究では散布液量を 15L/10a、飛行速度を旋回飛行およびスピン飛行では 2.0m/s、直線飛行(片道および往復)では 1.0m/s としており、散布液量 15L/10a で散布するためには機体の設定上、直線飛行では飛行速度が遅くなるため液滴付着率が高くなる傾向がみられたと考えられた。スピン飛行では、旋回飛行より 1 樹当たりにかかる散布時間が長くなったため、液滴付着率が高くなる傾向がみられたと考えられた。また、直線飛行(片道および往復)にかかる散布時間は、旋回飛行やスピン飛行と比較して短かった。これは、旋回飛行およびスピン飛行では散布開始および終了時にホバリングするため、ホバリング回数が直線飛行に比べて多くなったと考えられた。したがって、直線飛行(往復)が同じ散布時間で最も多くの面積を散布でき、防除効果を最大限発揮できると考えられた。飛行方法に関しても樹体特性より環境条件やドローンの機体条件に影響される傾向が強いと考えられるため、「土佐文旦」およびポンカンでも、薬液の付着は同様の結果になると考えられた。

次に、ドローン散布を主体とした防除を実施し、防除効果および労力削減効果を評価した。熊本ら(2021)⁴⁾はウンシュウミカンの黒点病防除において、ドローン散布と人力散布でマンゼブ水和剤を 4 回ずつ散布して防除効果を比較した結果、ドローン防除では防除効果が低くなったと報告している。本研究においても、ポンカンで防除効果がやや劣る結果となったが、ユズおよび「土佐文旦」では同等であった。ポンカンにおいてもドローン散布では発病指数 0 の果実が全体の 90.3%であったことから、実用性はあると考えられた。

ユズにおいて、灰色かび病や訪花害虫による防除効果も人力散布と同等であった。これは、開花期間において葉が十分に展葉しておらず、樹冠内部に空間があり薬液が付着しやすく適期防除により人力散布と同等の防除効果が得られると考えられた。また、クロチアニジン水溶剤およびテブコナゾール・トリフロキシストロビン水和剤は浸透移行性があり、灰色かび病や訪花害虫に対して十分な効果が発揮されたと考えられた。さらに、ドローン散布によるスレ果の増加もなかった。生

産者からは、ユズの枝梢のトゲによってドローンの風圧によるスレ果の発生が懸念されているが、自然風と比べてドローンによるダウンウォッシュは一時的であったため、スレ果が少なかったと考えられた。

ポンカンおよびユズにおいて、貯蔵病害による腐敗果の発生割合も人力散布と同等であった。これは、チオファネートメチル水和剤の浸透移行性により、十分な防除効果が発揮されたと考えられた。なお、本研究において貯蔵病害の発生割合がドローン、人力散布とも60%を超えているが、これは、日本植物防疫協会調査法のかんきつ貯蔵病害(付傷試験)に準じて実施したため、付傷処理により貯蔵病害が発生しやすい条件であったことを考慮する必要がある。

よって、ドローンを利用した防除で人力散布と同等の防除効果が得られたため、ドローンを主体とした防除体系は、「土佐文旦」、ポンカンおよびユズでも実用性があると考えられた。一方、ユズの収穫果実における等級比率の調査より、チャノキイロアザミウマの被害は、ドローン散布で多い傾向が示唆された。これは、ドローン散布では1樹当たりの散布量が人力散布に比べて少なく、また、試験1の結果から1樹内で散布ムラがあり(データ略)、農薬が害虫に対して直接かからなかったため被害が多くなる可能性が考えられた。同様にハダニ類やカイガラムシ類でも、ナンにおいて薬液付着率の低下によりナミハダニ雌成虫の死虫率が低下した報告¹⁾もあるため、散布ムラがあると防除効果が不安定となることが懸念される。そのため、これらの害虫を対象とした防除は、人力散布で補完する必要があると推察された。

最後に、労力軽減効果について、病害虫防除にかかる散布時間を人力散布と比較した。その結果、ドローン散布では人力散布よりも散布時間を約90%削減できた。ただし、今回算出した散布時間は、ユズ11樹を用いたドローンの離陸から着陸までの時間と、人力散布の散布開始から終了までの時間を計測し、10a相当に変換したものである。本研究を実施したほ場は直線上に樹が植わっており、途中で障害物のない平坦なほ場であった。生産現場では様々な条件があるため、ドローンの飛行経路や障害物の有無により散布時間が変動することに留意する必要がある。

以上より、「土佐文旦」、ポンカンおよびユズにおけるドローン散布による樹体への液滴付着率および病害虫に対する防除効果が明らかとなった。ドローン散布により一定の防除効果は期待できるが、一部の病害虫では人力散布と比較して効果がやや劣った。カンキツ類は樹形が立体的であり、ドローンによる上空からの散布では、樹体内部や下部および葉裏への液滴付着率が低くなると考えられる。なお、今回使用したP30は2025年7月現在、製造が中止されており、後継機種はP40

となっている。

利益相反の有無

本研究の一部は、バイエルクロップサイエンス株式会社より研究費を受け共同で実施した。また、一部の試験について、入交アグリーン株式会社と共同で実施した。本研究の内容および結論に影響はない。

引用文献

- 1) 飯塚亮・嶋田綾・坂本彩・加藤綾奈・山口修平(2018). 東京都のナンにおけるナミハダニ黄緑型の薬剤感受性と葉の巻きによる薬液付着量の低下が死虫率に及ぼす影響. 関東東山病害虫研究会報. 第65集. PP. 139-143.
- 2) 角川修・深山大介・荒木琢也(2008). 感水紙を用いた茶園における農薬散布時のドリフトの評価. 茶研報. 106: 21-38.
- 3) 高知県農業振興部(2025). 高知県農業の動向(令和7年度). PP. 8-16.
- 4) 熊本昌平・衛藤夏葉・武田知明(2021). ドローンを用いたマンゼブ水和剤散布によるウンシュウミカンにおけるカンキツ黒点病に対する防除効果. 和歌山県農林水研報 9: 47-54.
- 5) Lou, Z., F. Xin, X. Han, Y. Lan, T. Duan and W. Fu(2018). Effect of unmanned aerial vehicle flight height on droplet distribution, drift and control of cotton aphids and spider mites. *Agronomy*, 8(9). 187.
- 6) 増井伸一・山根俊・土田祐大・村田裕行・加藤光弘(2020). 無人航空機を用いた少量散布によるカンキツ樹冠内の液滴の付着特性. 関東東山病害虫研究会報第67集: 87-89.
- 7) 増井伸一・村田裕行・土田祐大・加藤光弘・小林泉・猪俣敏一(2021). マルチローター式無人航空機による薬剤散布時の飛行経路と散布粒径がカンキツ樹冠内における液滴の付着性に及ぼす影響. 関西病虫研報 (63): 27-32.
- 8) 農林水産省. 特産果樹生産動態等調査. 令和4年産.
- 9) Ranabhat, S. and R. Price(2025). Effects of flight heights and nozzle types on spray characteristics of unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer in common field crops. *AgriEngineering*. 7(2). 22.
- 10) 齋田直哉・山崎裕子・松倉開成(2021). 水稻栽培における農業用ドローンによる空中散布精度. 四国支報. 58: 8-9.
- 11) Yan, Y., Y. Lan, G. Wang, M. Hussain, H. Wang, X. Yu, C. Shan, B. Wang and C. Song(2023). Evaluation of the deposition and distribution of spray droplets in citrus orchards by plant protection drones. *Front.*

Plant Sci., 14:1303669.

Summary

This study investigated different drone-spraying methods to establish a disease and pest control system for Tosa buntan (*Citrus maxima* (Burm.) Merr.), ponkan (*Citrus reticulata* Blanco), and yuzu (*Citrus junos* Sieb. ex Tanaka). This study evaluated the efficacy of these methods and quantified their labor-saving effects.

1. No differences in droplet adhesion rates for Tosa buntan were observed with respect to spray droplet size (100 or 285 μm), flight speed (2.0 or 5.0 m/s), or spray volume per 10 ares (10 or 15 L). Similarly, no differences in droplet adhesion rates for yuzu were observed with respect to spray height (1.0, 2.0, 4.0, or 6.0 m above the canopy) or flight method (circular, spin, straight one-way, or straight flight round-trip). Straight flights (one-way and round-trip) required less spraying time than circular or spin flights.

2. Disease control using drone spraying resulted in an incidence of citrus melanose comparable to that achieved via manual spraying for Tosa buntan and yuzu, but a slightly lower incidence in ponkan. The incidence of citrus storage diseases in ponkan and yuzu following drone spraying was comparable to that following manual spraying. Conversely, pest control using drone spraying in yuzu resulted in a higher proportion of fruits damaged by gray mold and yellow tea thrips compared with manual spraying.

3. The time required to apply pesticides per 10 ares was reduced by 89% with drone spraying compared with manual spraying.

Key words: Pest and disease control, drone spraying, flight methods, labor-saving

編集委員長 高橋 昭彦（所長）

副委員長 細川 卓也（企画監兼作物園芸課長）
片岡 明彦（技術次長兼専門企画員）
朝比奈泰史（研究企画課長）
下元 満喜（農業情報研究室長）
青木こずえ（生産環境課長）

委 員	岡 美佐子	森實 祐香	山崎 睦子
	田村 悠	下村 文那	原 寛佳
	坂田 雅正	松本 久美	谷本 祐
	佃 浩輔		

事務局 柿内 優実

高知県農業技術センター

〒783-0023 高知県南国市廿枝 1100 番地
TEL 088-863-4912

高知県農業技術センター 果樹試験場

〒780-8064 高知県高知市朝倉丁 268 番地
TEL 088-844-1120

高知県農業技術センター 茶業試験場

〒781-1801 高知県吾川郡仁淀川町森 2792 番地
TEL 0889-32-1024

令和 8 年 6 月 30 日 発 行

編集発行者 高知県農業技術センター

〒783-0023 高知県南国市廿枝 1100 番地
TEL 088-863-4912

