

ISSN 1882-9481

**BULLETIN
OF
THE OKINAWA PREFECTURAL
AGRICULTURAL RESEARCH
CENTER**

No.19

March, 2026

沖縄県農業研究センター研究報告

第 19 号

令和 8 年 3 月

OKINAWA PREFECTURAL AGRICULTURAL RESEARCH CENTER

820, MAKABE, ITOMAN-city, OKINAWA901-0336, JAPAN

沖縄県農研セ研報
Bull.OKINAWA
Agric.Res.Cent.
No.19 2026

沖縄県農業研究センター

沖縄県糸満市真壁 820

沖縄県農業研究センター 研究報告
第19号

目 次

【原著論文】

1. 沖縄県におけるジャガイモ青枯病によるイモの被害を軽減できる種イモ植付け時期の
気温条件
.....大城 篤・新崎 泰史・恩田 聡・安次富 厚・澤岨 哲也・鈴木 崇之 1
2. トマト黄化葉巻病の自然感染宿主となりうるムラサキカタバミ
.....大城 篤・貴島 圭介・喜久村 智子 5
3. バクロブトラゾール粒剤処理による低アミロース米品種「ミルキーサマー」の倒伏軽減,
ならびに本剤の散布ムラが本品種の生育・収量等に及ぼす影響
.....大野 豪・内嶺 景太・伊禮 凧沙 11
4. ハーベスタで収穫した黒糖原料用サトウキビにおける保管中の品質変化
.....前田 剛希・広瀬 直人・恩田 聡 29

【学位論文】

1. 沖縄県の施設マンゴー栽培における炭疽病の発生生態および防除に関する研究
..... 澤岨 哲也 37

【論文抄録】

1. Field survey of Fusarium stem rot of lisianthus (*Eustoma grandiflorum*) cultivated
in Okinawa, Japan
.....T. Hanagasaki・H. Nakasone 39
2. Maximizing marketable yield of green asparagus (*Asparagus officinalis* L.) cultivated
in Miyako Island, Okinawa, Japan: Strategies for a typhoon-prone subtropical region
.....T. Hanagasaki 39
3. Investigation of Fusarium root rot of lisianthus (*Eustoma grandiflorum*) in Okinawa, Japan,
caused by *Fusarium nirenbergiae*
.....T. Hanagasaki・A. Ajitomi・E. Miwa・T. Kiyuna 40

原著論文

沖縄県におけるジャガイモ青枯病罹病イモの被害を軽減できる
種イモ植付け時期の気温条件

大城篤¹・新崎泰史²・恩田聡³・安次富厚¹・澤岷哲也³・鈴木崇之⁴

- 1 沖縄県農業研究センター
- 2 沖縄県農業研究センター名護支所（現 沖縄県庁）
- 3 沖縄県農業研究センター名護支所
- 4 農研機構九州沖縄農業研究センター

要約

青枯病罹病イモ（塊茎部）の被害軽減に効果的なバレイショ植付け時期の推定を目的として、沖縄県農業研究センター名護支所内の青枯病汚染圃場（接種菌：*Ralstonia pseudosolanacearum* MAFF 211429, biovar III）において、2021～2023年の11月から1月にかけて種イモを植付け、植付け時期が青枯病発生に及ぼす影響を検討した。その結果、植付け後30日間における日平均気温が17.1℃以下となった条件では、塊茎内部における青枯病の発生が明らかに軽減された。さらに、*in vitro* 試験により、本病原細菌は17℃条件下では増殖できないことが確認された。以上の結果から、バレイショの青枯病による塊茎被害は、植付け後30日間の平均気温が17.1℃以下となる時期に植付けることで軽減できると考えられる。

キーワード：ジャガイモ青枯病、罹病イモ、種イモ、植付け時期、日平均気温

緒言

沖縄県のバレイショ生産地域では、青枯病の発生が慢性化しており、発生すると地上部の萎凋・枯死とイモ（塊茎部）の腐敗などの症状により収穫皆無に陥ることもあり、大きな課題となっている。2000年代前半に本県のバレイショの拠点産地である宜野座村では青枯病罹病性品種である「デジマ」や「レッドムーン」が主として栽培されていたが、青枯病の発生により生産量が激減した。以後、県内では青枯病に比較的強い品種「ニシユタカ」の栽培が主流となった経緯がある。また、青枯病は地上部とイモの外部病徴で症状が確認されなくてもイモ内部でストロンから導管に沿って筋状に褐変する病徴もあり、クレームの対象となる（図1）。青枯病の対策として、



図1 青枯病によるジャガイモ内部の病徴（ストロン部から導管に沿って筋状に褐変する症状）

クロルピクリン等による土壌消毒が有効な手段であるが、本県のバレイショ生産地域は居住地と隣接しており、土壌消毒の実施は難しく、その対策としてより有効的な耕種的防除技術の開発に対する要望が高い。

一般的にジャガイモ青枯病の発生には、種イモ植付け後30日間における日平均気温が重要であることが知られている。長崎県においては、片山・木村(1987)により、秋作の植付け後、30日間の日平均気温が23℃以上の時に青枯病が地上部にて多発しやすく、それ以下では発病が著しく減少することが明らかにされた。その後、長崎県では後藤ら(1992)が日平均気温23℃を日平均気温24.3℃に修正することにより、栽培後期の初霜による収量低下と地上部にて青枯病の被害を回避することが可能であるとした。そこで、沖縄県においてもバレイショ圃場の現地調査を通して、地上部に青枯病が多発する条件を検討した結果、種イモ植付け後30日間の日平均気温が21.1℃以上で経過した場合、植付け60日以降に青枯病が多発するリスクが高いことを明らかにした（大城, 2009）。しかし、地下部のイモでの青枯病発病リスクの評価に関しては、未検討であった。

そこで、バレイショの青枯病によるイモ被害を軽減できる種イモの植付け時期を推定するために、バレイショの植付け時期である11月から1月にかけて、青枯病の汚染圃場に種イモを植付け、植付け時期が青枯病発生に与える影響を検討した。

材料および方法

バレイショの種イモの植付け時期の違いが青枯病のイモでの発病に与える影響

試験は沖縄県農業研究センター名護支所内の圃場（国

頭マーヅ：赤色土）にて行った。試験圃場（南北 22m、東西 10m、220m²）は 2021 年 11 月 20 日に青枯病菌液（沖縄県農業研究センター保存株：Ralstonia pseudosolanacearum MAFF211429【biovar III】の菌液：約 10⁸cfu mL⁻¹）を試験区全面に 100L 10a⁻¹の割合で均一に散布後、散水し汚染圃場（バレイショの栽培履歴無）とした。なお、沖縄県のジャガイモ青枯病には biovarII, III, IVの 3 種が存在するが（大城, 2009）、これら菌株を 5 年間、水保存（堀田・土屋, 2012）したところ、biovarIIIの菌のみが生存していた（水保存に供試した試験管 5 本中 3 本で生存を確認した）。さらに本菌株はニガウリにも病原性を示すことから、本県での青枯病の主要菌種であると考えられ、本菌株を使用することとした。試験に供試する品種は「ニシユタカ」を用いた。種イモは購入直後、そうか病と黒あし病対策として、オキシテトラサイクリン・ストレプトマイシン水和剤（100 倍希釈液）にて種イモを 10 秒間浸漬した。また、種イモ植付け 1, 2 カ月後に疫病対策として TPN 水和剤（1000 倍希釈液）を散布した。2021 年度は 11 月植付け区と 1 月植付け区を設け、11 月植付け区は 11 月 21 日に畝幅 80cm・畝長 6m・株間 20cm の 3 反復で、1 月植付け区は 2022 年 1 月 14 日に畝幅 80cm・畝長 3m・株間 20cm の 3 反復で種イモを植付けた。なお、試験区は乱塊法にて設置した。2022 年度は 11 月 8 日、11 月 16 日、11 月 29 日、12 月 12 日、12 月 23 日、2023 年 1 月 6 日、1 月 30 日に南北 22m の圃場に西側から順に植溝を南北方向に掘った後に、1 区当たり畝長 6m の試験区（3 反復区）を均等に配置し、各区とも畝幅 80cm・株間 20cm で種イモを植付けた。兩年ともバレイショは無マルチ栽培で行った。肥培管理は沖縄県の栽培要領に準じた。2021 年度は各植付け日の各反復区にて、2022 年度は各植付け日の各疑似反復区にて栽培期間中、萌芽率を求めるとともに、青枯病の地上部発生の様相を確認し、種イモ植付けから 120 日後を目途にイモを収穫し、イモ内部の青枯病罹病の有無や軟腐病発生について調査した。なお、全腐敗したイモは調査対象外とした。青枯病については全イモについてストロン先端部を 2～3mm 程度で薄く切り取り、青枯病の病徴（図 1）が確認された場合、筋状の褐変部位を約 5mm 角で切り取り、5mL の滅菌水の入った試験管に罹病部位を入れてから 5 分以上静置後、試験管を攪拌した。その後、試験管内の菌液（10, 20, 30μL）を滅菌ディスク白金耳にて各滴下量を原・小野培地上（堀田・土屋, 2012）に滴下・画線培養し、病原菌の分離を行った。培地上に青枯病菌に特徴的なコロニー性状を有する菌が検出された場合、青枯病罹病株と判断した。また軟腐病については、イモ内部の導管部の褐変症状が確認されず、一部が腐敗したイモを対象に腐敗部位切片を採取し、その接種源を白菜の切片（葉身部を 5cm×5cm の切片で切り出し、その中心部（約 5mm×5mm）に柄付き針にて 5 か所の傷をつけた切片）の有傷部に接種し、接種 1 日後に腐敗が確認された場合、軟腐病であると判断した。軟腐病発生イモを除く全イモに対する青枯病検出イモの割合を

青枯病罹病イモ発病率として求めた。また、種イモ植付け後 30 日間の日平均気温のデータは、沖縄気象台のデータ（観測地点：名護）を用いた。なお、農業研究センター名護支所と沖縄気象台名護観測所は直線距離で約 3.4km 離れた位置関係にある。

ジャガイモ青枯病菌（biovar III）の培養温度の違いによる増殖速度の違い

CPG 培地（堀田・土屋, 2012）が 10mL 入ったガラス試験管（外径 18mm、高さ 180mm）に前述の供試菌株希釈液（1.0×10⁷cfu/mL）を 100μL 滴下し、15, 17, 19, 21°Cのインキュベーター内で静置培養した。各温度帯の試験ごとに 12 本の試験管を用いた。静置培養 1, 2, 3 日後に各温度帯の菌密度を調査した。各日数経過後に各試験管 4 本から 1mL ずつを採取し、36mL の滅菌水の入った三角フラスコに滴下した。以後、10 倍希釈し、10⁵～7 段階まで希釈した。各希釈段階の希釈液から 100μL を採取し、ジャガイモ半合成培地上（堀田・土屋, 2012）に滴下し、コンラージ棒にて広げた。各希釈段階につきシャーレ 5 枚を用いた。25°Cで 3 日間培養後に培地上に出現したコロニー数を計測した。

結果および考察

2021 年度の圃場試験では、11 月植えと 1 月植えとも地上部での青枯病の発病は確認されなかったが、両植え付けとも青枯病によるイモ内部の病徴が確認され、特に種イモ植付け後 30 日間の日平均気温が 17.0°Cと低かった 1 月植えでは、青枯病罹病イモ率が有意に低下した。2022 年度の圃場試験では 11 月 8 日植付けの圃場にて 1 月 5 日に地上部での青枯病の発病を 1 株確認したが、その後、他の植付け日の試験区の地上部では青枯病の発病は確認されなかった（データ省略）。11 月 8 日と 16 日および 1 月 30 日植付けの収穫イモで軟腐病によるイモの腐敗が散見された（表 1）。11 月と 1 月下旬植付けで種イモの萌芽率が低かったが、その要因として、軟腐病による種イモの腐敗が考えられ、特に圃場が傾斜し排水不良である圃場の下部位にて萌芽率の低下が顕著であった。腐敗を免れたイモを対象として青枯病罹病の有無について調査した結果、各植付け時期で青枯病によるイモ内部の病徴が確認された。種イモ植付け 30 日後の日平均気温が 17.1°C以下で経過する場合、青枯病罹病イモ率が低下することが確認された（表 1）。なお、各年度とも、原・小野培地にて罹病部位から病原菌の分離を行った結果、青枯病菌が検出された。また、ジャガイモ青枯病菌の各温度での増殖速度に与える影響について試験した結果、青枯病菌（biovar III）は *in vitro* の試験で 15～17°Cでは増殖は認められないが、19～21°Cでは増殖が認められた（図 2）。以上の結果から、2021～2022 年度の試験からジャガイモの種イモの植付け後 30 日間の日平均気温が 17.1°C以下である場合、イモ内部での青枯病の被害が軽

表1 種イモ植付け後30日間における日平均気温が青枯病罹病イモ発生に与える影響

年度	植付け日	萌芽率 (%) ¹⁾	調査イモ数 ¹⁾	軟腐病罹病イモ数 ¹⁾	青枯病罹病イモ率 (%) ¹⁾	植付け後30日間の日平均気温 ³⁾
2021	11月21日	100.0	55.3	0.0	24.0	19.0
	1月14日	91.1	19.3	0.0	11.4 * ²⁾	17.0
	11月8日	42.2	62.3	5.3	23.5	22.6
	11月16日	65.6	116.3	2.3	20.1	21.5
	11月29日	87.8	97.3	0.0	12.3	18.3
2022	12月12日	76.7	172.3	0.7	9.5	16.8
	12月23日	95.6	219.0	0.0	4.4 *	17.1
	1月6日	91.1	166.3	0.0	2.8 *	16.8
	1月30日	51.1	122.7	4.7	14.4	18.1

1) 数値は各反復区の平均値を示す。

2) * を付した値は各年度の11月植付けで最も高い青枯病罹病イモ率と比較して、5%水準で有意差があることを示す(2021年度はstudentのt検定にて、2022年度はDunnett法にて、Arcsin変換後に検定を実施)。

3) 種イモ植付け後30日間の日平均気温のデータについては、沖縄気象台のデータ(観測地点:名護)を用いた。

4) 各年度の色付けした部位は種イモ植付け後30日間の日平均気温が17.1℃以下になる植付け時期を示す。

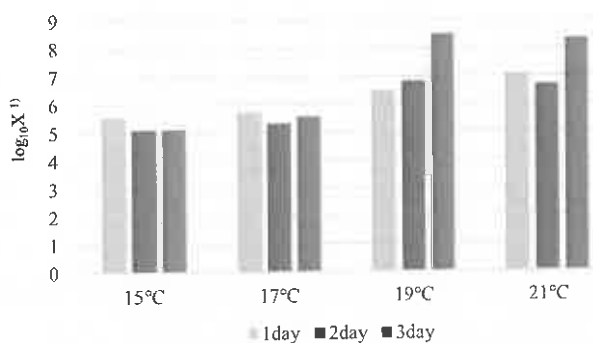


図2 青枯病菌(biovar III)の培養温度の違いによる増殖速度の違い

1) CPG培地10mLの入った試験管に供試菌株希釈液(約10⁸cfu/mL)を100μL滴下し、各温度帯で1~3日間静置培養し、希釈平板法にて液体培地1mL当たりの菌数(X)を測定した。図の縦軸の数値は菌数を対数変換した数値で示した。なお、各温度帯とも試験開始時にはCPG培地1mLあたり約1.0×10⁸cfuとなるように菌数を調整した。

表2 各観測地点で30日間(種イモ植付け後の期間を想定)の日平均気温が17.1℃以下となる時期(1991年~2020年までの平年値からの計算値:沖縄気象台のデータを引用)

観測地点	種イモの植付けを想定した時期
奥	12月1日~1月31日
伊是名島	12月20日~1月31日
名護	12月16日~1月31日
那覇	1月6日~1月22日
糸数	12月3日~1月31日
久米島	12月30日~1月28日
南大東島	— ¹⁾
宮古島	—
石垣島	—
西表島	—
与那国島	—

1) —は各観測地点で30日間の日平均気温が17.1℃以下となる時期がないことを示す。

減されること、さらに in vitro での試験結果から青枯病菌は17℃の温度条件では増殖できないことが明らかとなった。

また、沖縄県のバレイショ栽培の植付け時期は、沖縄県の野菜栽培要領(沖縄県農林水産部, 2014)によると9月中旬から12月上旬となっている。一方、恩田(2025)は品種「ニシユタカ」を用い、植付け時期別(10月, 11月, 12月, 1月, 2月)の収量性について同支所内圃場にて2022~2023年度に評価した結果、12月と1月植【12~1月植の各年の平均単収: 12月(4.4 ton), 1月(3.8 ton)】は11月植(11月植の各年の平均単収: 3.3 ton)と同程度もしくは高い収量が得られ、2月植で収量(2022年のみ試験実施, 単収: 2.3 ton)が低くなることから、バレイショの植付けの終点は1月植であることを示した。

そこで、過去30年間(1991~2020年)における沖縄気象台の各観測地点の気象データを用い、サトウキビ(夏植え)とバレイショの輪作で種イモの植付けが想定される12月1日~1月31日を植付け開始日とした場合の30日間の日平均気温を計算し、その値が17.1℃以下になる

期間を表2に示した。その結果、沖縄気象台の観測地点がある奥, 名護, 伊是名島, 那覇, 糸数, 久米島では青枯病の被害を軽減できる可能性が高い植付け時期が存在し、これらの周辺地域ではこの時期を種イモの植付け時期の参考にできると考えられた。また、南大東島, 宮古島, 石垣島, 西表島, 与那国島ではこの期間の気温条件が高い傾向にあり、この地域では、イモ内部での青枯病の発病リスクが高いと考えられた。なお、上記いずれの地域においても、バレイショの栽培期間中、青枯病の被害を回避するために健全種イモの利用や発病履歴がある圃場での栽培回避など、十分な対策を講じることは重要である。

青枯病菌はウリ科, イネ科, マメ科作物の圃場では増殖しにくいといわれている(小川, 1996)。恩田(私信)はさらに、2022~2023年度にサトウキビ残渣すき込み直後の圃場において「ニシユタカ」を栽培した場合の収量性について検討したところ、対照区と同等の収量が得られることを示しており、本県においてはイネ科作物であるサトウキビとジャガイモの輪作は青枯病対策として有効な耕種的防除技術であると考えられる。一方、サトウキビ

の製糖を早期(12月上旬)に開始した場合のサトウキビ収穫後夏植までの期間にバレイショを栽培する栽培体系を評価した結果、土地利用率が向上することでサトウキビ専作経営に比較して約3倍の所得が見込めることが提示されている(恩田, 2025)。そのため、沖縄本島とその周辺離島では12~1月にバレイショの種イモを植付け・収穫後、サトウキビを夏植え栽培する輪作体系を用いることで青枯病の被害を回避しつつ、農家の所得を向上させることができると考えられることから、今後、上記技術の普及を期待したい。なお、12~1月に種イモを植付けるバレイショ栽培体系では軟腐病の発生のリスクがあるので、栽培期間中は降雨前の銅剤等の散布による適切な予防防除が必要である。

謝辞

本研究は農林水産省・みどりの食料システム戦略実現技術開発・実証事業のうち農林水産研究の推進(委託プロジェクト研究)「南西諸島の気候風土に適した高収益品目の検討及び栽培技術体系の確立」により実施した。

引用文献

- 後藤孝雄・片山克己・東一洋(1992)メッシュ気候図利用によるジャガイモ青枯病の防除対策, 九農研, 54, p.84
- 堀田光生・土屋健一(2012)青枯病菌 *Ralstonia solanacearum*. 微生物遺伝資源利用マニュアル(12)改訂版2版, 独立行政法人農業生物資源研究所, p.32
- 片山克己・木村貞夫(1987)ジャガイモ青枯病の発生生態と防除に関する研究第2報, 各種防除法およびその体系化. 長崎県農林試研報(農業部門), 15, p.29-57
- 小川奎(1996)土壌病害をどう防ぐか: 講座微生物段階の土づくり-4, 農文協, p.184
- 沖縄県農林水産部(2014)沖縄県野菜栽培要領, 沖縄県, p.277
- 恩田聡(2025)沖縄県におけるバレイショ研究の取り組みーバレイショとサトウキビの高収益複合モデルと販売促進方向の検討ー, いも類振興情報, 第164号, p.35-39
- 大城篤(2009)植物と微生物の生物機能を利用した土壌病害防除技術に関する研究, 沖縄県農研セ研報, 2, p.30-80

Temperature conditions for planting seed tubers to mitigate diseased tubers caused by bacterial wilt in potatoes in Okinawa Prefecture, Japan

Atsushi OOSHIRO¹・Taishi ARASAKI²・Satoshi ONDA³・Atsushi AJITOMI¹・Tetsuya TAKUSHI³・Takayuki SUZUKI⁴

1 Okinawa Prefectural Agricultural Research Center

2 Okinawa Prefectural Agricultural Research Center Nago Branch
(Okinawa Prefectural Office)

3 Okinawa Prefectural Agricultural Research Center Nago Branch

4 Kyusyu Okinawa Agricultural Research Center, NARO

Abstract

To estimate the optimal planting time of potato seed tubers for reducing tuber damage caused by bacterial wilt, field experiments were conducted from 2021 to 2023 in the infested field (inoculated with *Ralstonia pseudosolanacearum* MAFF 211429, biovar III) at the Nago Branch of the Okinawa Prefectural Agricultural Research Center. Potato seed tubers were planted from November to January, and the effect of planting time on the incidence of bacterial wilt was investigated. The results showed that when the mean daily air temperature during the 30 days after planting was 17.1 °C or lower, the incidence of bacterial wilt within the tubers was markedly reduced. In addition, in vitro experiments revealed that the pathogen does not grow at 17 °C. These findings suggest that planting potato seed tubers during periods in which the mean daily temperature remains at or below 17.1 °C for the first 30 days after planting can effectively reduce tuber damage caused by bacterial wilt.

Keywords: bacterial wilt of potatoes, diseased tuber, seed tuber, planting period, daily average temperature

原著論文

トマト黄化葉巻病の自然感染宿主となりうるムラサキカタバミ

大城篤¹・貴島圭介¹・喜久村智子¹

1 沖縄県農業研究センター

要約

沖縄県ではトマト黄化葉巻病(以下; TYLCV)の発生が2007年に経済栽培のトマトにおいて初確認され、以後全県的に発生し問題となっている。2013年5月と2014年10月にTYLCVが発生するトマト栽培施設内外から12科22種192個体の雑草を採取し、TYLCVの感染状況について調査した結果、施設内で採取されたウシハコベとムラサキカタバミがTYLCVに自然感染することが明らかとなった。なお、ムラサキカタバミへのTYLCVの自然感染については国内外で初知見となる。また、施設圃場と室内の試験においてTYLCV感染ムラサキカタバミの作出およびTYLCV感染ムラサキカタバミからTYLCV保毒タバコナジラミの作出が可能であることが明らかとなった。また、TYLCV感染ムラサキカタバミからタバコナジラミを介した健全トマトへのウイルスの伝播を確認した。さらに、ムラサキカタバミの増殖源となる親鱗茎と子鱗茎にもウイルスが存在し、各鱗茎から根出葉が萌芽した株からタバコナジラミを介した健全トマトへのウイルスの伝搬が可能であることも明らかにした。以上の結果より、ムラサキカタバミはTYLCVの自然感染植物として、トマトでの本病発生に重要な役割を示すことが示された。

キーワード: トマト, トマト黄化葉巻病, 自然感染宿主, ムラサキカタバミ

緒言

トマト黄化葉巻病 (tomato yellow leaf curl virus; 以下, TYLCV) はタバコナジラミ (*Bemisia tabaci*) の媒介により伝搬されるウイルス病であり (大貫ら, 1997; Kato et al., 1988), トマト栽培において重要病害の一つである。本病は1996年に長崎県, 愛知県, 静岡県で同時に発見され, 沖縄県では2007年に初めて本病の発生が確認され (上田ら, 2008), 以後県内全域で発生が拡大して問題となっている。TYLCVの防除対策は媒介虫であるタバコナジラミの防除並びにウイルスの伝染源を断ち切ることが効果的であるとされている (本多, 2006)。特にトマト以外のどの植物種がウイルスの供給源 (感染源) となり得るかを明らかにすることは防除上重要である。これまで, TYLCVの自然感染植物として, トルコギキョウ, ピーマン, タバコ, ウシハコベ, エノキグサ等の農作物, 雑草類が報告されているが (上田2004, 石井ら2003), 本県は他都道府県と比較して植生が異なることや, 冬でも温暖であり雑草が周年発生していることからTYLCVの宿主となりうる植物種が異なる可能性がある。しかし, 本県ではこれまで本調査が実施された経緯がない。そこで, 本県におけるタバコナジラミの寄主植物種 (貴島ら, 2011) を主な対象として, TYLCVが発生するトマト団地の栽培施設内外から雑草を採取し, TYLCVの感染状況について調査を行った。また, Kil et al. (2014) がホトケノザ (*Lamium amplexicaule*) を用いた方法に準じて, TYLCV

自然感染雑草からタバコナジラミを介して再度健全トマトへ媒介されるか否かについて検討し, 雑草の伝染源としての重要性について評価を行ったので報告する。

材料および方法

1. トマト栽培施設内外で発生する雑草のTYLCVの感染調査

2013年5月16, 20日と2014年6月16日に沖縄県豊見城市内のTYLCV発生トマト栽培施設6箇所(2013年:5カ所, 2014年:1カ所)の施設内外から各雑草を新芽付近5~10cmを株あたり5箇所程度採取した。採取した葉サンプルは1株ごとに5斤袋に入れ, 保冷剤を入れたクーラーボックスで保管し, 実験室に持ち帰った。後日, 各株から葉を3~5枚採集後, 各葉から葉サンプルを均等に抽出・採取し, 生重0.1gに調整した。なお各葉サンプルはPCR検定時まで-70°Cで保存した。各葉からのDNA抽出はCTAB法によって行った (Murray and Thompson, 1980)。PCR反応は10μLの1×GoTaq Green Master mix (Promega, Madison, WI, USA), 0.5 μLの各TYLCV検出プライマーは九州農業試験場 (1999) により開発されたTY-V:5' -CTCGAAGGTTTCGCCGAAGG-3' とTY-C:5' -TTGAAAAATTGG(G/A)CTCTCAA-3' を用い, 各プライマー濃度は10pmol/μLとし, 8μLの滅菌蒸留水, 1μLのDNAを含む全量20μLで行った。サーマルサイク

ラーは 2720 Thermal Cycler (Applied Biosystems, Foster City, CA, USA) を用い 95°C5 分の後、95°C50 秒・60°C 1 分・72°C3 分を 40 サイクル、72°C10 分の温度条件で DNA を増幅した。PCR 産物は 1.5%アガロースゲルで電気泳動後、エチジウムブロマイド溶液 (2µg/ml) にて染色後、紫外線照射下でバンドパターン (約 1250bp) を確認した。

2. TYLCV 感染ムラサキカタバミの作出

2013 年 11 月 7 日に沖縄県南風原町内のサトウキビ圃場からムラサキカタバミを 8 株 (No.1 ~ 8) 採取し、親鱗茎に付随した子鱗茎を除去後、育苗土 (与作 N-150) の入ったポットに親鱗茎を植えた。なお、各株の小葉 0.1g を前述の手法により PCR 検定に供試した結果、すべての株で TYLCV の感染は無かった。11 月 10 日にこれらポットを TYLCV に感染させたトマト (桃太郎) と農業研究センターでインゲンマメ (品種: 大正金時) を用いて累代飼育しているタバココナジラミ (バイオタイプ B: 2009 年 4 月 30 日に沖縄県南風原市のトマト 1 圃場から採取した個体) を 1000 頭放飼し、保存・維持している硬質フィルムハウス圃場内の各 4 辺に 2 ポットずつを均等に配置した。12 月 24 日と 2014 年 4 月 10 日に各株から小葉を 3 ~ 5 枚採取後、各小葉から葉サンプルを均等に抽出・採取し、生重 0.1g に調整した。また、硬質フィルムハウス外に生育しているムラサキカタバミ 3 株 (No.9 ~ 11) の小葉を比較対照として用いた。なお各葉サンプルは PCR 検定時まで -70°C で保存した。TYLCV 感染の有無については前述の PCR 検定により判定した。

3. TYLCV 感染ムラサキカタバミからの TYLCV タバココナジラミ保毒虫の作出

2014 年 1 月 21 日に TYLCV に感染したムラサキカタバミ No.6 株 (材料および方法の 2 で 2013 年 12 月 24 日に小葉をサンプリングし、TYLCV が検出された株) を入れた接種用ケージ (縦×横×高さ=36×34×34 cm、ナイロンゴースで被覆) に無毒のタバココナジラミ成虫 (バイオタイプ B: 材料および方法の 2 で供試した同一の成虫) を 100 頭放飼した。各接種用ケージを 3 日間 25°C の培養室 (14L10D) 内で維持した後、吸血管を用いて生存成虫をすべて採集し、99.5%エタノールに保存した。タバココナジラミからの核酸の抽出については、1 頭ずつ抽出バッファー (20µL) が入った 0.5mL 容量のチューブ内で爪楊枝を用いて磨砕後、抽出バッファー (80µL) を添加し、小型遠心機 (プチはち 2816, トミー工業株式会社, 東京) で 5 分、25°C で遠心した。なお、抽出バッファーは TE バッファー (100µL) に 5µL のプロテナーゼ K 液 (0.01g/1mL 滅菌蒸留水) を加えたものを使用した。次いでサーマルサイクラーを用い、55°C60 分の後、94°C15 分の条件で処理し、その上清 2µL を鋳型とした。PCR 反応は 10µL の 1×GoTaq Green Master mix, 1µL の各 TYLCV 検出プライマー (TY-V と TY-C の各プライマー濃度 10pmol/µL), 6µL の滅菌蒸留水、2µL の DNA を含む全量 20µL で行った。

なお、上記の PCR 反応工程以外は、材料および方法の 1 と同一の手法で行った。

4. TYLCV 感染雑草からタバココナジラミを介した健全トマトへのウイルス伝播試験

2014 年 2 月 14 日と 3 月 5 日に TYLCV に感染したムラサキカタバミ No.6 株 (材料および方法の 2 で 2013 年 12 月 24 日に小葉がサンプリングされ TYLCV が検出された株) を入れた接種用ケージ (縦×横×高さ=36×34×34 cm, ナイロンゴースで被覆) に、実験室内において前述のウイルスを保毒していないタバココナジラミ成虫 (バイオタイプ B) を 100 頭放飼し、25°C の光照射型インキュベーター (14L10D) 内で 3 日間維持した後、接種用ケージ内へ 4 ~ 5 複葉期の実生トマト苗 (品種: 桃太郎) 1 株を入れ、維持した。なお、試験に供試した実生トマト苗の小葉 0.1g を前述の手法により PCR 検定に供試した結果、TYLCV の感染は無かった。5 日後、生存成虫をすべて採集し、99.5%エタノールに保存した。実生苗は、接種用ケージから取り出した後、タバココナジラミが残存している可能性があるため、ピリダベンフロアブル 1,000 倍、エマメクチン安息香酸塩乳剤 2,000 倍、ジノテフラン 1g/株を処理した後、25°C の光照射型インキュベーター (14L10D) 内で維持した。21 日後、小葉を 3 ~ 5 枚採取後、各小葉から葉サンプルを均等に抽出・採取し、生重 0.1g に調整した。なお各葉サンプルは PCR 検定時まで -70°C で保存した。葉サンプルおよびタバココナジラミの TYLCV 感染の有無については材料および方法の 1 と 2 で述べた PCR 検定により判定した。また、材料および方法の 2 で新たに得られた TYLCV 感染ムラサキカタバミ 3 株 (No.2, 5, 8) についても上記と同様な試験を実施した。

5. 鱗茎での TYLCV 感染調査

ムラサキカタバミは地上部を防除したとしても地下部に増殖源となる鱗茎が存在するため、再度鱗茎から再萌芽した場合に再度汚染源となることも考えられる。そこで、鱗茎における TYLCV の保毒状況を調査した。2014 年 6 月 13 日に TYLCV に感染したムラサキカタバミ No.5 株 (材料および方法の 2 で 2014 年 4 月 10 日に小葉がサンプリングされ TYLCV が検出された株) の鱗茎を採集し、合計 105 個の鱗茎が得られた。サイズを小 (直径 5mm 未満), 中 (直径 5mm 以上 1cm 未満), 大 (直径 1cm 以上) に分け、それぞれの個数は小サイズが 75 個, 中サイズ 28 個, 大サイズが 2 個となり、各サイズごとに 0.1g の重さになるように調整した。なお各鱗茎サンプルは PCR 検定時まで -70°C で保存した。鱗茎サンプルの TYLCV 感染の有無については材料および方法の 1 で述べた PCR 検定により判定した。

6. TYLCV 感染ムラサキカタバミの子鱗茎から萌芽した根出葉からの TYLCV ウイルスの検出

2014年9月10日にTYLCVに感染したムラサキカタバミ No.2, 8株(材料と方法の2で2014年4月10日に小葉がサンプリングされTYLCVが検出された株)の鱗茎を採集した。それぞれの株から成熟した子鱗茎が52,8個得られ、同日中に育苗培土をつめたポットに植え付けた。2015年1月22日に根出葉が萌芽した子鱗茎数を計測し、株から小葉を3~5枚採取後、各小葉から葉サンプルを採取し、生重0.1gに調整した。なお各小葉サンプルはPCR検定時まで-70°Cで保存した。TYLCV感染の有無については材料および方法の1で述べたPCR検定により判定した。

7. TYLCV感染ムラサキカタバミの子鱗茎から根出葉が萌芽した株からのタバココナジラミを介した健全トマトへのウイルス伝播試験

2015年1月26日にTYLCVに感染したムラサキカタバミ No.2(材料および方法の2で2014年4月10日に小葉がサンプリングされTYLCVが検出された株)の親鱗茎株と子鱗茎株 No.2-1, 2-2株をそれぞれ入れた接種用ケージに実験室内において前述のウイルスを保毒していないタバココナジラミ成虫(パイオタイプB)を100頭放飼し、25°Cの培養室(14L10D)内で3日間維持した後、接種用ケージ内へ4~5複葉期の実生トマト苗(品種:桃太郎)1株を入れ、維持した。なお、試験に供試した実生トマト苗の小葉0.1gを前述の手法によりPCR検定に供試した結果、TYLCVの感染は無かった。5日後、吸虫管を用いて生存成虫すべてを採

集し、99.5%エタノールに保存した。実生苗は、接種用ケージから取り出した後、材料および方法の4と同様の試験を実施した。

結果

1. トマト栽培施設内外で発生する雑草のTYLCVの感染調査

2013年3月に雑草を採取した施設5カ所と2014年10月に雑草を採取した施設1カ所におけるトマト株のTYLCVの発生状況について病徴を指標に肉眼診断で調査した結果、発病率は41.5~85.0%であった(表1)。22草種・192個体の各雑草についてTYLCV感染の有無をPCR検定により判定したところ、施設内から採取されたウシハコベ(*Stellaria aquatica* (L.) Scop.)とムラサキカタバミ(*Oxalis corymbosa* DC.)からTYLCVが検出された(図1)。ウシハコベについては、2施設でTYLCVの感染が確認され、陽性株率は36.8%となった。ムラサキカタバミについては、2013~2014年にかけて調査を行い、2施設でTYLCVが確認され、陽性株率は36.4%となった。なお、施設外で採取された雑草11種32個体からはTYLCVは検出されなかった(表1)。



図1 トマト黄化葉巻病の自然感染宿主(左:ムラサキカタバミ、右:ウシハコベ) ムラサキカタバミの鱗茎(中)で太い矢印は親鱗茎を示し、細い矢印は子鱗茎を示す。

表1 TYLCV発生トマト栽培施設内外で発生する雑草のTYLCV感染調査結果

科	種	施設1 (79.8%) ¹⁾		施設2 (41.5%)		施設3 (79.0%)		施設4 (85.0%)		施設5 (43.0%)		施設6 (80.0%)		採取株数合計	陽性株率 (%)
		採取株数	陽性数	採取株数	陽性数	採取株数	陽性数	採取株数	陽性数	採取株数	陽性数	採取株数	陽性数		
アカザ	コアカザ	0	0	1 (1)	0	1	0	3	0	0	0	0	0	5	0
	ユウゲショウ	0	0	0	0	2 (2)	0	0	0	0	0	0	0	2	0
アカバナ	カタバミ	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
	ムラサキカタバミ	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	10	3	11	36.4
キク	ウスベニニガナ	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0
	オオアレチノギク	0	0	0	0	2 (2)	0	0	0	0	0	0	0	2	0
	オニタビラコ	1	0	1	0	1 (1)	0	0	0	0	0	0	0	3	0
	センダングサ類	0	0	1 (1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	タイワンハチジョウナ	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	タカサブロウ	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	5	0
	ノゲシ	9 (7) ²⁾	0	10 (2)	0	7 (7)	0	1	0	0	0	0	0	27	0
	ヒメムカシヨモギ	0	0	3 (3)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
	ホウキギク	0	0	5 (1)	0	2	0	0	0	0	0	0	0	7	0
	サギゴケ	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
サクランウ	ルリハコベ	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	エノキグサ	2	0	7	0	3 (1)	0	0	0	3	0	0	0	15	0
トウダイグサ	セイタカオオニシキソウ	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0
	ナス	7	0	3 (3)	0	12	0	1	0	0	0	0	0	23	0
ナデシコ	ウシハコベ	2	0	11	3	1 (1)	0	5	4	0	0	0	0	19	36.8
ヒユ	アオビユ	9	0	14	0	8	0	11	0	10	0	0	0	52	0
フウソウ	アメリカフウロ	2	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	6	0
ムラサキ	ハナイバナ	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0

1)括弧内の数値は施設内におけるトマトのTYLCV発病率を示す。

2)括弧内の数値は採取された雑草種の株数のうち、施設外で採取された雑草種の株数を示す。

3)施設1~5は2013年に調査を行い、施設6は2014年に調査を行った。

2. TYLCV 感染ムラサキカタバミの作出

第1回目(2013年12月24日)のムラサキカタバミのTYLCV感染調査の結果、比較対照として用いたムラサキカタバミ3株からは、TYLCVは検出されなかったが、TYLCVに感染させたトマトとタバコナジラミを保存・維持している硬質フィルムハウス内の圃場に配置したムラサキカタバミからは、8株中1株(No.6)でTYLCVが検出された(図2)。TYLCVに感染したムラサキカタバミ



図2 TYLCV感染トマトとタバコナジラミが存在する硬質フィルムハウス内に配置されたムラサキカタバミ株へのTYLCVへの感染
No.1-8:硬質フィルム内に配置されたムラサキカタバミ株
No.9-11:硬質フィルム外で生育するムラサキカタバミ株
-:健全トマト+:TYLCV罹病トマト
矢印はTYLCV陽性のバンドを示す。

に特徴的な病徴は見られなかった。なお、硬質フィルムハウスの外で生育する株(No.9~11)ではTYLCVは検出されなかった。第2回目(2014年4月10日)のムラサキカタバミのTYLCV感染調査の結果、新たな陽性株3株(No.2,5,8)が得られ(データ省略)、上記と同様に、ムラサキカタバミに特徴的な病徴は見られなかった。最終的にムラサキカタバミ8株中4株がTYLCVに感染した。

3. TYLCV 感染ムラサキカタバミからの TYLCV タバコナジラミ保毒虫の作出

TYLCV感染ムラサキカタバミからTYLCVタバコナジラミ保毒虫の作出について検討した結果、ムラサキカタバミNo.6株から回収されたタバコナジラミ成虫38頭中17頭がTYLCV保毒虫であり、陽性率は44.7%であった。



図3 TYLCV感染ムラサキカタバミ株(No.6株)からのタバコナジラミを介した実生トマト苗へのウイルス伝搬試験結果
1:第1回目の伝搬試験トマト株からのTYLCVの検出
2:第2回目の伝搬試験トマト株からのTYLCVの検出
-:健全トマト+:TYLCV罹病トマト

4. TYLCV 感染雑草からタバコナジラミを介した健全トマトへのウイルス伝播試験

TYLCV感染ムラサキカタバミNo.6株からタバコナジラミを介した実生トマト苗へのウイルス伝播試験を2回実施した結果、2試験とも供試したトマトはTYLCVに特徴的な葉の黄化と巻葉・縮葉症状を呈し、葉



図4 TYLCV感染ムラサキカタバミ株(No.6株)からタバコナジラミを介した伝搬試験によりトマトで再現されたTYLCVの病徴(TYLCVの特徴的な病徴である葉の黄化と巻葉・縮葉症状が確認される。)

サンプルからはTYLCVが検出された(図3,4)。なお、1回目の試験で回収されたタバコナジラミ11頭中9頭がTYLCV保毒虫であり、陽性率は81.8%であった。また、2回目の試験で回収されたタバコナジラミ17頭中7頭がTYLCV保毒虫であり、陽性率は41.2%であった。さらに、新たな陽性株3株(No.2,5,8)を用いて再試験を行った結果、上記と同様にトマト3株からTYLCVが検出された(図5)。



図5 TYLCV感染ムラサキカタバミNo.2,5,8株からのタバコナジラミを介した実生トマト苗へのウイルス伝搬試験結果
1:No.2株伝搬試験トマトからのTYLCVの検出
2:No.5株伝搬試験トマトからのTYLCVの検出
3:No.8株伝搬試験トマトからのTYLCVの検出
-:健全トマト+:TYLCV罹病トマト

なお、No.2株を用いた伝搬試験で回収されたタバコナジラミ19頭中8頭がTYLCV保毒虫であり、陽性率は42.1%であった。また、No.5株を用いた伝搬試験で回収されたタバコナジラミ21頭中10頭がTYLCV保毒虫であり、陽性率は47.6%であった。さらに、No.8株を用

いた伝搬試験で回収されたタバココナジラミ 13 頭中 5 頭が TYLCV 保毒虫であり、陽性率は 38.5%であった。

5. 鱗茎での TYLCV 感染調査

鱗茎 (図 1) のサイズごとに 0.1g になるように調整した結果、小中大のそれぞれの鱗茎サンプル数は 8, 16, 2 サンプルとなり、これらサンプルについて TYLCV 感染の有無について調査した結果、すべてのサンプルで TYLCV が検出された (図 6)。



図6 TYLCV感染ムラサキカタバミ株の鱗茎からのウイルスの検出
No. 1-8: 直径が5mm未満の鱗茎サンプル
No.9-24: 直径が5mm以上1cm未満の鱗茎サンプル
No.25-26: 直径が1cm以上の鱗茎サンプル
- : 健全トマト + : TYLCV罹病トマト

6. TYLCV 感染ムラサキカタバミの子鱗茎から萌芽した根出葉からの TYLCV ウイルスの検出

TYLCV 感染ムラサキカタバミ No.2, 8 株の成熟子鱗茎から根出葉が萌芽した子鱗茎数はそれぞれ 33, 5 株となり、萌芽子鱗茎率は 63.5, 62.5% となった。また、根出葉が萌芽したすべての株の小葉から TYLCV ウイルスが検出されるか否かについて検討した結果、No.2, 8 株由来子鱗茎株からそれぞれ 21, 2 株からウイルスが検出され、感染株率は 63.6, 40% となった。

7. TYLCV 感染ムラサキカタバミの子鱗茎株からのタバココナジラミを介した健全トマトへのウイルス伝播試験

TYLCV 感染ムラサキカタバミ No.2 株の親鱗茎株と子鱗茎株 No.2-1, 2-2 株からタバココナジラミを介した実生

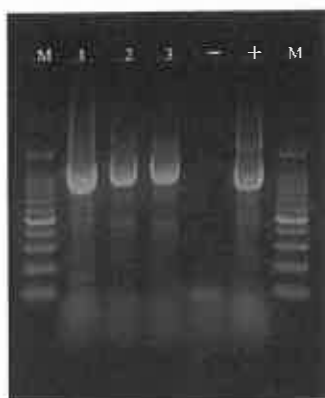


図7 TYLCV感染ムラサキカタバミNo.2株の親鱗茎と子鱗茎由来株からのタバココナジラミを介した実生トマト苗へのウイルス伝搬試験結果
1: No.2株の親鱗茎株を用いた伝搬試験トマトからのTYLCVの検出
2: No.2株の子鱗茎株No.2-1を用いた伝搬試験トマトからのTYLCVの検出
3: No.2株の子鱗茎株No.2-2を用いた伝搬試験トマトからのTYLCVの検出
- : 健全トマト + : TYLCV罹病トマト

トマト苗へのウイルス伝播試験を実施した結果、供試したトマトからは TYLCV が検出された (図 7)。各試験で回収されたタバココナジラミの TYLCV 保毒虫率は親鱗茎では、回収虫 24 頭中 14 頭が TYLCV 保毒虫であり、陽性率は 58.3%であった。また、子鱗茎 No.2-1 株では回収虫 42 頭中 22 頭が TYLCV 保毒虫であり、陽性率は 52.4%となり、子鱗茎 No.2-2 株では回収虫 7 頭中 4 頭が TYLCV 保毒虫であり、陽性率は 57.1%となった。

考察

沖縄県の TYLCV が発生するトマト栽培施設内外から雑草を採取し、TYLCV の感染状況について調査した結果、ウシハコベとムラサキカタバミが TYLCV に自然感染することが明らかとなった。これらのうちムラサキカタバミへの TYLCV の自然感染については国内外で初見となる。また、施設圃場と室内の試験において TYLCV 感染ムラサキカタバミの作出および TYLCV 感染ムラサキカタバミから TYLCV 保毒タバココナジラミの作出が可能であることが明らかとなり、さらに、TYLCV 感染ムラサキカタバミからタバココナジラミを介した健全トマトへのウイルスの伝播が確認された。また、ムラサキカタバミの増殖源となる鱗茎で本ウイルスの存在が明らかとなり、TYLCV 感染ムラサキカタバミ株から採取した子鱗茎を培養土へ移植し、萌芽した根出葉で TYLCV の感染を確認したムラサキカタバミ株を用いてタバココナジラミを介した健全トマトへの伝播試験を行った結果、ウイルスの伝播が確認された。以上の結果より、ムラサキカタバミは TYLCV の自然感染植物として、トマトでの本病発生に重要な役割を示すことが明らかとなった。

今回の結果は、Kil et al.(2014) による報告と同様に TYLCV の自然感染雑草がトマトでの本病発生に関与することを示す重要な事象であると考えられる。さらに、その後、中山・塩田 (2025) によりホトケノザとヒメオドリコンソウがトマトへの TYLCV の中間宿主となることが示され、本病発生に雑草が関与することが改めて示された。さらに、Kil et al.(2015) により、ウシハコベがトマトへの TYLCV の中間宿主となることが示されたことから、本県においてもトマト栽培期間中のウシハコベの防除は重要である。ウシハコベは日本全国に分布し、花期は4~7月、種子繁殖性で越年草または多年草であり (森田・浅井, 2014)、本種は種子が形成する前に除草するなどの対策が必要であると考えられる。

また、ムラサキカタバミは南米原産で日本では全国に分布するが寒冷地以北には少なく、九州から沖縄にかけて多く分布する多年生草である。地下部の鱗茎から根出葉と花茎を多数出し、多くの子鱗茎を作って旺盛に繁殖する難防除雑草である。また、南西諸島では 10 月下旬~11 月上旬に萌芽出葉し、11 月下旬以後開花する。冬期間中は生育を継続し、4~5 月までは旺盛に生育開花し、6 月以降には生育は衰える (森田・浅井, 2014)。沖縄県に

おけるトマト栽培期間は8月下旬～10月が苗の定植時期で収穫は翌年の4～5月頃までであり、ムラサキカタバミの発生期間と重なること、さらにムラサキカタバミの増殖源となる鱗茎について TYLCV の感染が確認されたことから、本雑草が生育している圃場ではムラサキカタバミを株ごと掘り取り、鱗茎を除去する必要があると考える。なお、鱗茎での TYLCV ウイルスの保毒期間の解明が必要であるため、今後の研究に期待したい。

引用文献

- 本多健一郎 (2006) トマト黄化葉巻病と媒介コナジラミ、防除法を巡る研究情勢と問題点。野菜茶業研究集報, 3, 115-122
- 石井貴明・嶽本弘之・上田重文 (2003) トマト黄化葉巻ウイルス (TYLCV) の宿主範囲について, 九病虫研会報, 49, 178
- Kato, K., Onuki, M., Fuji, S. and Hanada, K. (1998) The first occurrence of tomato yellow leaf curl virus in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) in Japan, *Ann Phytopathol Soc Jpn*, 64, 552-559
- 貴島圭介・上田重文・上宮建吉・喜久村智子・来間美紀・大石毅・大野豪 (2011) 琉球諸島におけるタバココナジラミバイオタイプの野生寄主, *日本応動昆虫誌*, 55, 249-253
- Kil, E.-J., Park, J., Lee, H., Kim, J., Choi, H.-S., Lee, K., Kim, C.-S. and Lee, S. (2014) *Lamium amplexicaule* (Lamiaceae): a weed reservoir for tomato yellow leaf curl virus (TYLCV) in Korea, *Arch virol*, 159, 1305-1311
- Kil, E.-J., Byun, H.-S., Kim, S., Cho, S., Cho, S., Roh, K., Lee, K.-Y., Choi, H.-S., Kim, C.-H. and Lee, S. (2015). Tomato yellow leaf curl virus Can Overwinter in *Stellaria aquatica*, a Winter-Hardy TYLCV-Reservoir Weed, *Plant Disease*, 99(5), 588-592.
- 九州農業試験場 (1999) トマト黄化葉巻病の簡易診断法, <https://www.naro.go.jp/project/results/laboratory/karc/1999/konarc99-441.html>
- 森田弘彦・浅井元朗 (2014) 原色雑草診断・防除辞典, 全国農村教育協会 (東京), 畑 p.596
- Murray, M.G. and Thompson, W.F. (1980) Rapid isolation of high molecular weight plant DNA, *Nucleic Acids Res*, 8, 4321-4325
- 中山大誠・塩田あずさ (2025) トマト黄化葉巻ウイルス (TYLCV) に感染したヒメオドリコソウ, ホトケノザはトマトへの中間宿主となる, 第69回日本応動昆虫会大会講演要旨集, 85
- 大貫正俊・小川哲治・加藤公彦・花田薫 (1997) 長崎県のトマトに発生したジェミニウイルスの塩基配列, *日植病報*, 63, 482(講要)
- 上田重文 (2004) トマト黄化葉巻ウイルス病 トマト黄化葉巻ウイルス病の現在及び新系統発生の可能性, *植物ウイルス病研究会レポート*, 7, 101-109
- 上田重文・貴島圭介・二神和靖・金城衣恵・村山裕子・谷口昌弘・河野伸二・大貫正俊 (2008) 沖縄県におけるトマト黄化葉巻病の初発生と病原ウイルスの系統及び遺伝子グループ, *日植病報*, 74, 32(講要)

Oxalis corymbosa DC acts as a weed reservoir for tomato yellow leaf curl virus

Atsushi OOSHIRO¹・Keisuke KIJIMA¹・Tomoko GANAHA-KIKUMURA¹

¹ Okinawa Prefectural Agricultural Research Center

Abstract

After the first identification of tomato yellow leaf curl virus (TYLCV) in Okinawa, Japan, in 2007, TYLCV rapidly spread to tomato farms across Okinawa. In 2013, a survey was conducted in major tomato production areas of Okinawa to identify natural weed hosts that could serve as reservoirs of TYLCV. A total of 192 samples were collected and identified as 22 species belonging to 12 families. TYLCV was detected by PCR analysis, and positive samples were identified in two species, *Stellaria aquatica* and *Oxalis corymbosa*. Transmission of TYLCV by *Bemisia tabaci* from TYLCV-infected tomato plants to *O. corymbosa* was confirmed, although TYLCV-infected *O. corymbosa* plants showed no visible symptoms. In addition, TYLCV was detected in bulbs of TYLCV-infected *O. corymbosa*. Furthermore, transmission of TYLCV by *B. tabaci* from TYLCV-infected *O. corymbosa* to healthy tomato plants was also confirmed. This study is the first to demonstrate that *O. corymbosa* functions as a reservoir weed host for TYLCV.

Keywords: tomato, tomato yellow leaf curl virus, weed reservoir, *Oxalis corymbosa*

原著論文

パクロトラゾール粒剤処理による低アミロース米品種「ミルキーサマー」の倒伏軽減、
ならびに本剤の散布ムラが本品種の生育・収量等に及ぼす影響

大野 豪¹・内嶺景太²・伊禮風沙²

1 沖縄県農業研究センター石垣支所

2 沖縄県八重山農林水産振興センター農業改良普及課

要約

低アミロース米の良食味品種「ミルキーサマー」は、主として西表島の水稲二期作栽培における二作目で栽培されており、地域特産品としてのブランド化が期待され、遊休水田の有効活用にも寄与しうる品種である一方で、倒伏しやすいという欠点をもつ。最近の研究から、植物成長調整剤の一種パクロトラゾール粒剤の処理が、本品種の稈長を安定的に短く保つことが明らかにされ、倒伏軽減にも有効である可能性が示唆されている。そこで本研究では、石垣島の試験圃場、ならびに同島と西表島の農家圃場において、「ミルキーサマー」に対する本剤の倒伏軽減効果の実証を試みる。とともに、試験圃場においては、本剤の普及を考慮する上で重要となる情報として、本剤の散布ムラが本品種の生育・収量等に及ぼす影響についてのデータも取得した。試験圃場における本剤の処理は、標準施肥量 (6.4 Nkg/10a) および多肥 (12.8 Nkg/10a) の双方の条件下において、無処理区と比べて有意に稈長を短く保つことが再確認されたとともに、倒伏率を低く、かつゼロに近い値にまで抑えた。石垣島・西表島の農家圃場においても、本剤の処理は有意に稈長を短く保つとともに、後者では有意な倒伏軽減効果も確認された。本剤は同時に、出穂期や穂長等、いくつかの生育特性に影響を及ぼしたものの、成熟期や収量、食味に関するほとんどの項目に有意な影響を示さなかったため、本品種の倒伏軽減剤として有望であると考えられた。散布ムラを模して本剤を不均一に散布した試験区の中で、本剤が集中的に投下された範囲では、均一に散布した区と比べ、収量の有意な低下はみられなかったものの、かなりの短稈となることが判明した。このように、本剤の散布ムラは圃場内で局所的に短稈となる部分を生み出すため、たとえ圃場に存在する玄米量に変化がなかったとしても、機械による収穫・脱穀時に回収されない穂が占める割合が上がることで、減収につながる可能性も考えられる。このため、本剤の使用時にはできるだけ均一に散布することが推奨される。

キーワード：沖縄県、収量構成要素、植物成長調整剤、食味官能評価、二期作、八重山地域。

緒言

沖縄県の八重山地域と沖縄諸島では、その温暖な気候を活かして水稲 (*Oryza sativa* L.) の二期作栽培が行われているが、いずれの地域においても、水田面積は他県と同様に年々減少しており、その減少程度は、二期作栽培の一作目 (以下、単に「一期作」と略) と比して、高温や台風等の影響によって低収となる二作目 (以下、「二期作」と略) でより大きい (沖縄県農林水産部, 2023)。水田は食糧生産の場であると同時に、洪水や土砂崩れ等自然災害の防止、地下水の涵養、気候変動の緩和、生物多様性の保全、文化の継承等のさまざまな機能をもつため (Matsuno *et al.*, 2006)、水田の減少は一般に、こうした多面的機能の損失という点からも問題視されている。特に八重山地域では、水田を含む湿地を餌場として利用する絶滅危惧種カンムリワシ *Spilornis cheela perplexus* Swann (Ueta and Minton, 1996; 水谷ら, 2022) をはじめとして、多くの固有種や希少種が湿地とその周辺に生息しており、これら湿地性の生物の代替生息地としての水田の役割 (鷲

谷, 2007; Natuhara, 2013) が重視されている。最近では西表島が世界自然遺産に登録されたことにより、本地域の環境保全への気運がより高まっている (伊澤, 2022; 吉田, 2022)。このため、本地域の水田減少の阻止、特に二期作における遊休水田の有効活用のための方策は、農家所得の向上や国土保全のために不可欠であると同時に、世界自然遺産登録地とその周辺の生物多様性保全においても重要な意味をもつ。

このような、本県の二期作における水田の維持に寄与しうる方策のひとつが、低アミロース米の良食味品種「ミルキーサマー」の栽培の普及である。低アミロース米品種は、炊飯後に冷めても硬くなりにくいために、おにぎりや弁当等への利用拡大が見込まれている。本品種は、良食味品種「ミルキークイーン」の遺伝的背景に、インド型品種「Kasalath」由来の出穂性遺伝子を含むゲノム領域を持たせたものであり、沖縄県の栽培条件下では、「ミルキークイーン」よりも多収となり、かつ食味が同等に優れる等の理由から、2011年に本県の奨励品種に採用された (山城ら, 2011; 竹内ら, 2013)。そして 2014

年から、八重山地域の西表島の二期作で、従来栽培されていた「ひとめぼれ」に代わって本品種が栽培されるようになり、地域特産品としてのブランド化が期待されている（沖縄県八重山農林水産振興センター，2023）。しかしながら、本品種には、特に二期作において「ひとめぼれ」よりも倒伏しやすいという特性がある（山城ら，2011；竹内ら，2013）。水稻の倒伏は一般に、登熟阻害や穂発芽の促進等によって収量や品質の低下をもたらす、さらには収穫作業の効率も低下させるため、この特性は本品種の安定生産や栽培面積拡大、ブランド化の障壁となっている。

この問題の解決に寄与しうるのが、植物成長調整剤の一種であるバクロブトラゾールである。本剤は根から吸収され、ジベレリンの生合成を阻害することによって植物体をわい化させる作用をもち、水稻では上位3節間の伸長を抑制することによって倒伏しにくくする（上野，1989；French *et al.*，1990）。安次富ら（2021）は、「ミルキーサマー」へのバクロブトラゾール（スマレクト®）粒剤（以下、PBZと略）の利用を初めて検討し、八重山地域（石垣島）と沖縄本島北部（名護市）の一期作において、本剤が玄米収量には有意な影響を及ぼさず、かつ他の植物成長調整剤2種（ユニコナゾールP粒剤、プロヘキサジオンカルシウム塩水和剤）よりも安定して稈長を短く保つこと、および統計的な有意差を示してはいないものの、倒伏程度の値を無処理区よりも低く保つことを報告している。このため、本剤は「ミルキーサマー」の倒伏軽減に有効である可能性があるものの、現在の主要作期である二期作において倒伏軽減効果を示すかどうかはまだ明らかでなく、また収量構成要素や食味等の諸特性への影響についても不明な点が多い。そこで本研究では、PBZ処理が本品種の倒伏程度と他の諸特性に及ぼす影響を、いくつかの異なる栽培環境下で明らかにすることを第一の目的として、2021年の二期作において、石垣島の試験圃場での標準施肥量下、および地力の高い圃場を想定した多肥条件下と、同島の農家圃場での慣行栽培条件下における試験を実施した。さらに、2021年の試験から得られた結果が、西表島の農家圃場でも再現されるかどうかを確かめるため、2023年と2024年の二期作において、西表島

の隣接する2水田のうち片方にPBZ処理を行い、生育収量を比較する試験を実施した。

また、我々が2021年の一期作において「ミルキーサマー」の試験圃場にPBZを処理した時の予備的観察から、本剤の散布ムラが顕著な生育ムラ（外観上の、草丈のばらつき）をもたらす可能性が示唆された。PBZの散布ムラが生育ムラをもたらすことについては、本剤の用法等を示したパンフレット（<https://ibj.iskweb.co.jp/wp/wp-content/uploads/2025/01/Smarect-all.pdf>）にも記載されているが、その一方で、本剤の散布ムラが水稻の生育・収量等の諸特性に及ぼす影響を詳しく調べた研究例は見当たらない。このため、この点を明らかにすれば、今後の「ミルキーサマー」の栽培への本剤の普及を考慮する上で重要となるだけでなく、水稻栽培全般にも有益となる情報を提供できる可能性がある。そこで本研究では、本剤の散布ムラが「ミルキーサマー」の諸特性に及ぼす影響を明らかにすることを第二の目的として、上述の試験圃場での効果試験では、無処理区・PBZ処理区と同時に、本剤を局所的に散布することによって人為的に散布ムラを再現させた試験区も設けて栽培試験を実施した。その結果、生育ムラが生じることがデータで示されただけでなく、これまで知られていなかった米の品質等へPBZの影響も明らかになったため、それらの結果も報告する。

材料および方法

育苗：沖縄県農業研究センター石垣支所において、2021年7月28日に、「ミルキーサマー」の種子を食塩水（比重1.06）で選別後、表1に示した3種薬剤の混合液に24時間浸漬し、さらに1日間水に浸漬した。育苗箱（内寸58cm×28cm×2.8cm）に水稻育苗用培土（くみあい培土，JAおきなわ）を入れて十分量灌水し、これに150gずつ播種し、殺菌剤（表1）を灌注したのち同じ培土で覆土し、育苗用シート（シルバークラップ #90，東籬興産（株））で被覆して日陰に2日間保管した。その後、育苗箱を天井にビニール（農サクビ）を張った育苗ハウスに移し、移植日まで毎日灌水した。移植前日（8月10日）に、病害虫被害予防のための箱処理剤（表1）を散布した。

表1. 育苗・栽培期間中に使用した農薬の一覧（2021年）

処理日	農薬名	有効成分 (%)	処理量・方法
7月21日	テクリード®Cフロアブル	イプロナゾール (5.0)，水酸化第二銅 (4.6)	200倍希釈液に24時間種子浸漬
	スターナ®水和剤	オキシリニック酸 (20.0)	同上
	スミチオン®乳剤	MEP (50.0)	1,000倍希釈液に24時間種子浸漬
7月30日	タチガレエースM®液剤	ヒドロキシノキサゾール (30.0)，メタラキシルM (2.0)	1,000倍希釈液を播種後（覆土前）に
8月10日	デジタルコラトップアクタラ®箱粒剤	チアメトキサム (2.0)，ピロキロン (12.0)	育苗箱1箱あたり1L灌注
8月17日	スパークスター®1キロ粒剤	エスプロカルブ (15.0)，ジメタメトリン (0.6)，	育苗箱1箱あたり50g散布
		ピラゾスルフロンエチル (0.3)，プレチラクロール (4.5)	5a圃場全面に500gを灌水散布
9月14日	スケダチ®1キロ粒剤	フルセトスルフロン (0.33)	5a圃場全面に750gを灌水散布
	キラップ®粒剤	エチプロロール (2.0)	5a圃場全面に1.5kgを灌水散布
	バダン®粒剤4	カルタップ塩酸塩 (4.0)	同上
	フジワン®粒剤	イソプロチオラン (12.0)	5a圃場全面に2kgを灌水散布
9月16日	スマレクト®粒剤	バクロブトラゾール (0.6)	均一：局所散布区のみ、1区 (18.6m ²)あたり56g散布
10月1日	スタークル®豆つぶ	ジノテフラン (12.0)	5a圃場全面に125gを灌水散布

実験デザイン、栽培管理および PBZ 処理：沖縄県農業研究センター石垣支所内の試験用水田（5a, 沖積土壌）に、PBZ 処理に関する 3 試験区（無処理区、均一散布区、および散布ムラを模した局所散布区；図 1）と、施肥量 2 水準（標準：6.4 Nkg/10a；倍量：12.8 Nkg/10a）を組み合わせた計 6 試験区を、3 ブロックの乱塊法により配置して試験を実施した。標準施肥量および栽培管理法全般については、沖縄県水稲栽培指針（八重山地域版）（沖縄県農業研究センター石垣支所・沖縄県八重山農林水産振興センター農業改良普及課、2017）に準じた。8 月 4 日までに圃場全面の代掻きを済ませたのち、8 月 6 日に、幅 30cm の畔波板を半分程度の深さまで埋め込んで各区の移植予定範囲（2.7m×6.9m）を囲むとともに、内外を仕切る畔波板の下に各区 1 個ずつ、硬質ポリ塩化ビニル管で作成した U 字管（内径 12 mm）を、開口部が水面と同じ高さになるように埋め込んだ。同日、それぞれの枠内に、試験区に応じて標準量（744g）または倍量（1,488g）の元肥一発型肥料セラコート R600（BC）[N:P:K=16:10:10；セントラル化成（株）] を散布し、枠外（各ブロックの周囲）には同肥料を標準量（6.4 Nkg/10a）となるよう散布した。8 月 11 日に、それぞれの枠内に、株あたり 3～4 葉齢の苗 4 本を株間 15cm・条間 30cm で 360 株（45 株×8 条）手植えし、枠外にも同じ密度で移植した。以降、落水時には U 字管の開口部を土表面まで下げ、再入水時には再び水面まで上げた。8 月 17 日に除草剤（表 1）を処理し、9 月 6 日から 13 日にかけて中干しのため落水し、9 月 14 日に再度入水したのち除草剤と殺虫・殺菌剤（表 1）を処理した。9 月 16 日に、PBZ を均一散布区と局所散布区に 56g（3kg/10a）ずつ散布した。各ブロック内では異なる試験区が 1 枚の畔波板で仕切られており、枠外から PBZ を均一に散布することが難しいため、枠内に入って散布した。各区につき、14g の PBZ を入れた 50ml 遠沈管を 4 本ずつ準備し、枠内の 4 条間を歩行しながら、均一散布区では各条間に 14g を、歩いた後ろ側にできるかぎり均一に散布し、局所散布区では枠内の中間部分（15 株×8 条）の範囲だけに同量を散布した（図 1）。無処理区では、枠内の歩行のみ同様に行った。10 月 1 日に殺虫剤（表 1）を処理し、収穫に向けて 10 月 15 日に落水し、10 月 26 日に各区を囲む畔波板を取り外した。

収穫前の調査：各区の枠内を便宜的に 15 株×8 条の 3 区画（図 1）に分け、それぞれの区画ごとに各特性の調査を行った（ただし、一部の項目については中間の区画のみ調査した；以下参照）。出穂については、9 月 24 日に圃場の一部で初確認され、9 月 26 日より全区画を、穂揃いまで毎日観察し、それぞれの区画の出穂始期（有効茎のうち 10～20% で出穂がみられた日）、出穂期（同、50%）、および穂揃期（同、80～90%）を達観で判定した（一部の区画では 9 月 26 日が出穂期と判定され、その場合の出穂始期は 9 月 25 日とした）。移植日から出穂期までの期間を到穂日数、出穂始期から穂揃期までの日数を穂揃

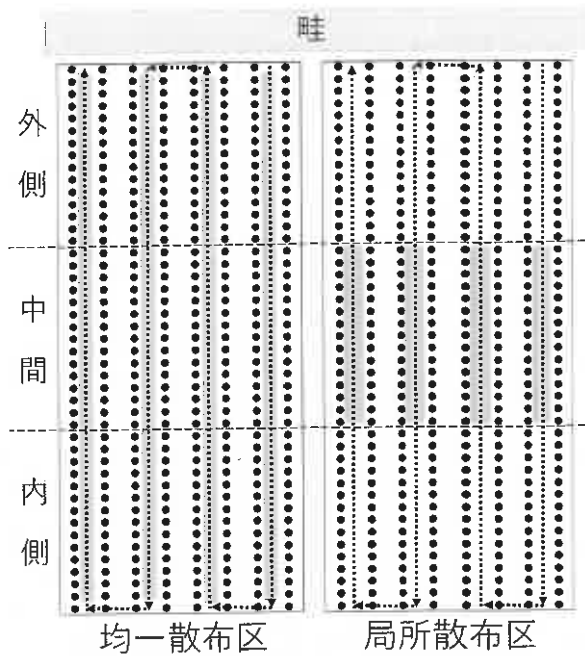


図 1. PBZ 散布方法を異にする 2 試験区と、調査対象とした 3 区画の模式図。黒丸は稲株、点線矢印は散布者の歩行軌跡、グレーの部分は散布範囲を示す。局所散布区では、均一散布区と同量の PBZ を中間の区画のみに集中的に散布し、歩行は均一散布区と同様に行った。「外側」は畦寄り、「内側」は圃場中央寄りの区画。

期間とした。10 月中旬より、大陸からの高気圧の張り出しに伴って風雨が強まり、これをきっかけに倒伏し始めたため、10 月 15 日・22 日・29 日の 3 回、全区画について、倒伏している部分の面積の割合（以下、倒伏面積比率）を、達観により 10% 刻みで記録した。ここで、倒伏している部分とは、作物調査基準（日本作物学会九州支部会、2013）の 10 頁に図示された、倒伏程度 0 から 5 の 6 段階区分のうち、3 以上（倒伏角度にして約 45°以上）の顕著な倒伏がみられる部分を指し、同基準における倒伏程度 1～2 に該当する、収穫作業に問題の生じない軽微な倒伏が認められる部分については、圃場の残りの部分すべてがそれに該当したため、倒伏面積には含めなかった。籾の成熟については、10 月下旬から 11 月上旬にかけて週 3 回、2～3 日間隔で圃場を観察し、青籾の残存率が達観で 10% 以下になったと判断された日を成熟期とした。11 月 4 日に、各区画内の、外縁部（畔波板沿いに植えられた株）を除く任意の 5 株のそれぞれを対象として、穂を含む全長が最も長い茎の稈長（地表から穂首節までの長さ）と全長（同、穂の先端までの長さ）を 2mm 単位で測定し、穂数を記録した。全長から稈長を引いた値を穂長とした。

収穫および収量構成要素等の調査：11 月 4 日に、各区画の外縁部を除く範囲から、籾数・登熟歩合の調査のため任意の 2 株を刈りとったのち、玄米収量等の調査のため 60 株を刈りとった。食味官能評価の際の基準米として用いるため、枠外からも、圃場外縁部および畔波板に隣接する株を除く全体から、合計 250 株程度刈りとった。籾数・登熟歩合調査株については、乾燥舎で 2 週間乾燥

させたのち室内に持ち込み、各区画について穂数（2株の合計）を記録したのち、12月中旬にかけて順次、籾をクシ等を用いてしごき、籾を外れたものと穂に残ったものに分け、双方を（後者は不稔籾として）計数した。外れたものについては、食塩水（比重 1.06）に浸漬し、浮かんだものを不稔籾として除去したのち再計数し、これらの値から登熟歩合を算出した。収量調査用および食味基準用の株については、乾燥舎で 32～34 日間乾燥させたのち脱穀・唐箕・籾摺りに供した。前者から得た玄米についてはさらに、区画ごとに重量を記録した上、米麦水分計 PB-ID2（株）ケツト科学研究所）を用いて水分含量を 2 回測定し、その平均値を記録した。屑米歩合と千粒重の調査には、各区内の 3 区画のうち中央の区画の玄米のみを供試した。100g 前後の玄米を目合い 1.8mm の篩にかけ、篩に残った米と落ちた米を計量し、後者が占める割合を屑米歩合とした。千粒重については、篩に残った米から、割れ米・欠け米を除去した上で 25.0g を量りとり、これに含まれる粒を計数することによって算出した。玄米重・千粒重とも、米麦水分計による測定値を用い、水分含量 15% の時の値に換算した。食味基準用を含む残りの玄米については、続く調査に供するまで 10°C 下で保存した。

食味官能評価：この調査においても、3 区画のうち中央の区画の玄米だけを供試した。2022 年 3 月 2 日に、玄米を、白度を「2」に設定した精米機 VP-32（株）山本製作所）に 2 回通すことによって精米し、上述の米麦水分計を用いて再度水分含量を 2 回測定し、平均値を記録したのち、精米を 4°C 下に保存した。翌日から 3 月 10 日にかけて、6 回（各ブロック 2 回×3 ブロック）に分けて食味官能評価を行った。1 回の評価においては、ブロック内の 6 試験区から、3 区の精米を無作為に選び、以下のように炊飯・評価した。3 区および食味基準用の精米の供試量をいずれも 360g とし、これら 4 種を無作為順で手早く洗米した。洗米時には、水道水を注いで捨てる作業を 3 回繰り返したのち、水道水を注いで手で 10 回かき回してから捨てる作業を 3 回繰り返した。炊飯時には、精米の水分含量に応じて加水量を調整し、たとえば水分 14.1% の場合には水量を 498.0g（精米との合計重で 858.0g）とし、水分含量が 0.1% 変わるときに水を 0.96g ずつ増減させた。炊飯には IH ジャー炊飯器 SR-KA051（パナソニック（株））を用い、洗米後すみやかに「エコ炊飯」コースで炊飯した。炊飯終了後、10 分間静置してからフタを開け、しゃもじで米粒を潰さないよう丁寧に攪拌し、釜に濡れ布巾を被せてさらに 10 分間静置してから評価者（1 回につき 14～20 名）に供試した。この時、基準米を皿の中央に盛りつけ、3 試験区の米をその周囲に無作為順で並べた。評価者には、香り、外観、味、粘り、硬さ、および総合評価の 6 項目を、基準米との比較のもと、+3 から -3 の 7 段階で相対評価させた。ここで、粘り・硬さを除く 4 項目については、「基準米よりかなり良い（悪い）」を +(-)3、「少し良い（悪い）」を +(-)2、「わずかに良い（悪い）」を +(-)1、「基準米と

変わらない」を 0 とし、粘り・硬さについては、「良い」を「粘る・硬い」に、「悪い」を「粘らない・軟らかい」に読みかえて評価した。

データ解析 (1) 共通：統計分析フリーソフト R version 4.0.3 (R core team, 2020) およびいくつかの R パッケージ（以下参照）を用い、一般化線形混合モデル (generalized linear mixed model; 以下 GLMM と略) および関連する方法により、得られたデータの統計解析を行った。PBZ 処理の諸特性への影響評価においては、無処理区と均一散布区の間でデータの比較を行い、PBZ 散布ムラの諸特性への影響評価においては、均一散布区と局所散布区の間でデータの比較を行った。このように、これらの比較は双方とも均一散布区のデータを用いているため、統計的に独立ではなく、したがって個々の有意性検定においては、検定全体の有意水準を 0.05 とし、これを 2 で割った値 (0.025) よりも有意確率が小さければ有意であると判定した (Bonferroni 法)。倒伏面積比率については、平均値が大きいほどデータのばらつきも大きくなる傾向がみられたため (結果を参照)、GLMM あてはめの際のリンク関数に対数を使用したほうが好ましい可能性が考えられ、この点を検討するため、すべてのデータに 1 を足した上で解析した。いずれの場合においても、GLMM のあてはめには R パッケージ lme4 (Bates et al., 2015) の glmer 関数を用いた。倒伏面積比率や稈長、玄米重等の連続データについては、R パッケージ lmer (Zeileis and Hothorn, 2002) の lrttest 関数を用いて、確率分布に正規分布を仮定してリンク関数を用いないモデル、正規分布を仮定しリンク関数を対数としたモデル、およびガンマ分布を仮定しリンク関数を対数としたモデルの対数尤度をそれぞれ算出し、尤度比検定によってこの値が他より有意に高かった組み合わせを採用した。穂数および籾数については、ポアソン分布を仮定したモデルと負の二項分布を仮定したモデル (リンク関数はどちらも対数) の間で同様な尤度比検定を行い、対数尤度が有意に高いほう (差がない場合は前者) を採用した。なお籾数については、穂あたりの数として比較するため、合計籾数を目的変数とし、調査穂数の対数をオフセット項としてモデルに加えた。登熟歩合に関しては、登熟籾・不稔籾の計数データに対し、二項分布を仮定し、リンク関数を logit としたモデルをあてはめた。屑米歩合については、屑米重を目的変数、リンク関数を対数とし、供試した合計玄米重の対数をオフセット項としてモデルに加えた。いずれの場合においても、R パッケージ car (Fox and Weisberg, 2019) の Anova 関数を用い、II 型の逸脱度分析によってモデルに含めた固定効果の有意性を検定した。食味官能評価に関する 6 項目 (以下、食味データ) については、順序データとして取得されているため、ランダム効果も扱うことができる順序ロジットモデルのあてはめが可能な、R パッケージ ordinal (Christensen, 2019) の clmm 関数を用いて解析した。この時、R パッケージ RVAideMemoire (Hervé, 2022) の Anova.clmm 関数を用い、

II 型の逸脱度分析により、モデルに含めた固定効果の有意性検定を行った。

データ解析 (2) PBZ 処理の影響評価：倒伏面積比率については、PBZ 処理、施肥量、観察日とそれらの総当たりの二元交互作用を固定効果、ブロックと調査区画 (PBZ 処理有無 × 2 施肥水準 × 3 ブロック × 3 区画の計 36 区画) をランダム効果とした GLMM をあてはめ、各固定効果の有意性を検定した。いずれかの効果が有意だった場合、その結果に基づいて固定効果として含めるグループ変数を再検討した上で、R パッケージ multcomp (Hothorn *et al.*, 2008) の `glht` 関数を用い、GLMM に適用可能な Tukey 型の多重比較を行った。食味データを除く他の諸特性については、PBZ 処理、施肥量とそれらの交互作用を固定効果、ブロックをランダム効果とした GLMM をあてはめ、各固定効果の有意性を検定し、いずれかの効果が有意だった場合、同じパッケージ・関数を用いて 4 試験区 (PBZ 処理有無 × 2 施肥水準) を固定効果とした GLMM に基づく Tukey 型の多重比較を行った。食味データについては、PBZ 処理、施肥量とそれらの交互作用を固定効果とし、ブロック、評価者および調査日をランダム効果とした順序ロジットモデルをあてはめた (調査日もランダム効果に含めたのは、同一ブロック内の異なる試験区を 2 日に分けて調査しており、その影響を除去するためである)。いずれかの固定効果が有意だった場合、Mangiafico (2016) が示す手順に従い、R パッケージ emmeans (Length, 2022) と multcomp を用いて 4 試験区間での Tukey 型の多重比較を行った。

データ解析 (3) PBZ の散布ムラの影響評価：ここでは特に、PBZ 処理法 (均一散布・局所散布) と調査区画 (外側・中央・内側；図 1) の交互作用に着目して検定を行った。これは、もし散布ムラを模した局所散布が倒伏面積比率や稈長、あるいは他の生育特性等のムラをもたらすのであれば、局所散布区では中央の調査区画とその両側の区画の間でこれらの値が異なってくるが、均一散布区ではそのような差は生じにくいために、上記の交互作用が有意になることが予想されるためである。解析に用いた R パッケージは上記と同様である。倒伏面積比率については、PBZ 処理法と調査区画に施肥量と観察日も加え、それらの総当たりの二元交互作用を固定効果、ブロックおよび上記と同様の 36 調査区画をランダム効果とした GLMM をあてはめ、II 型の逸脱度分析により各固定効果の有意性を検定した。他の諸特性について、3 区画すべてからデータが取得されている場合、PBZ 処理法、調査区画、施肥量およびすべての二元交互作用を固定効果、ブロックをランダム効果とした GLMM をあてはめ、II 型の逸脱度分析によって固定効果の有意性検定を行った。ここで、複数の効果が有意だった場合には、12 群 (2 処理法 × 2 施肥水準 × 3 区画) を固定効果とした GLMM に基づく Tukey 型の多重比較を行った。単一の効果が有意だった場合、必要に応じて、GLMM に含めるグループ変数を再検討したのち同様な多重比較を行った。中央の区

画だけから取得されているデータ (千粒重、屑米歩合および食味データ) については、PBZ 処理法、施肥量とそれらの交互作用を固定効果とした GLMM あるいは順序ロジットモデル (ランダム効果については、PBZ 処理の影響評価の時と同様) をあてはめ、II 型の逸脱度分析によって固定効果の有意性検定を行った。いずれかの効果が有意だった場合、必要に応じて上記と同様な多重比較を行った。

石垣島の農家圃場における試験

沖縄県農業研究センター石垣支所において、2021 年 8 月 2 日に「ミルキーサマー」種子を試験圃場の場合と同様に選別し、同じ薬液 (表 1) に 1 日、水に 1 日浸漬した。これをロックウール育苗マット (D タイプ、岩谷マテリアル (株)) をはめ込んで十分に灌水した育苗箱に 150g ずつ播種した。以降も試験圃場の場合と同様に、殺菌剤 (表 1) を灌注して覆土し、育苗用シートを 2 日間被覆したのち、育苗ハウス内に保管して毎日灌水した。8 月 16 日に、クロラントラニリプロール・チアジニル (ブイグット®・フェルテラ®) 粒剤を育苗箱あたり 50g ずつ散布したのち、石垣市宮良の農家圃場 10a (沖積土壌) のうち 2.5a に、株間 17.5cm・条間 30cm で機械植えし (残りの部分には別品種・系統を同様に移植し)、同時に塩化リン安 1 号 (N:P:K = 14:14:14；セントラル硝子 (株)) を圃場全面に 40kg、全量元肥 (5.6 Nkg/10a) として施用した。8 月 31 日に、圃場内の任意の 4 箇所において、隣接する 2 区 (1 区 16 株 × 8 条；6.72m²) を、試験圃場と同様に畔波板を埋め込んで囲い、U 字管も同様に、各区 1 個ずつ埋め込んだ。2 区のうち無作為に選んだ片方を PBZ 処理区とし (4 ブロックの乱塊法)、9 月 22 日に PBZ を 20.2g (3kg/10a) ずつ、区外からできるだけ均一に散布した。病害虫対策として、出穂前にジノテフラン・トリシクラゾール水和剤 (ビーム™エイトスタークル®ゾル) 1,000 倍希釈液が、出穂後にエトフェンプロックス水和剤 (トレボン®EW) 1,000 倍希釈液が全面散布された。収穫作業およびその前後の調査については、各区を細分しない以外は試験圃場と同様に実施した (ただし、稈長・全長・穂数の記録は各区 7 株を対象とした)。食味官能評価については、試験圃場の場合と同じ手順で、2022 年 2 月 19 日に精米を行い、2 月 21 日と 22 日の二回に分けて 4 サンプル (2 試験区 × 2 ブロック) ずつ、評価者 (15 ~ 18 名) に評価させた。データ解析については、試験圃場の場合と同じソフト・パッケージを用い、PBZ 処理を固定効果、ブロックをランダム効果とした GLMM (食味データには、評価者もランダム効果に含めた順序ロジットモデル) をあてはめ、II 型の逸脱度分析により PBZ 処理の効果を検定した。

西表島の農家圃場における試験

西表島 (竹富町高那) の、「ミルキーサマー」が株間 20 ~ 21cm・条間 30cm で機械植えされた、東西に並ぶ 3 水

田(16～18a, 沖積土壌)で、2023年と2024年に試験を行った。2023年には東側の水田を無処理区、中央の水田をPBZ処理区とし、2024年には中央の水田を無処理区、西側の水田をPBZ処理区とした。育苗、移植、施肥、雑草・病害虫対策ほか栽培管理作業は栽培者により行われた(移植日は2023年8月21日・2024年8月23日;他の詳細については省略)。PBZ処理については、両年とも中干し終了直後の10月7日に、2023年には散粒機(背負式肥料散布機さんすけ, 株式会社向井工業)を用い、2024年には人手で、処理量が10aあたり3kgとなるよう、できるだけ均一に散布した。この時、各圃場内の3か所(サイコロの「3」の目状)に支柱を立て、この支柱を中心とした20株×4条程度の範囲を以降の調査プロットとした。出穂期については、週1回の観察と栽培者への聞きとりから、2023年では10月11日前後、2024年では10月16日前後と判定された(毎日観察していないため、圃場・プロットごとの出穂期は明らかでない)。なお、2023年の出穂後に台風の接近はなかったが、2024年には、10月31日に台風21号が接近し、西表島が強風域に含まれた。両年とも11月15日時点で成熟期に達していたため、各プロットにおいて、倒伏程度および任意の5～10株の稈長、穂長と穂数を記録したのち、60株を刈りとった。ここで倒伏程度については、プロット全体の平均的な倒伏程度が、上述の作物調査基準が示す0から5の6段階の区分のどれに最も近いかを遠視により判定し、その数値を記録した。刈りとった株については沖縄県農業研究センター石垣支所に持ち込み、石垣島での試験と同様に乾燥～糲摺りに供し、玄米重と水分含量を記録した。データ解析については、上記と同じソフト・パッケージを用い、玄米収量と倒伏程度にはそれぞれ、PBZ処理、試験

年とそれらの交互作用を固定効果、圃場をランダム効果としたGLMMと順序ロジットモデルを、稈長、穂長と穂数にはさらにプロットもランダム効果に加えたGLMMをあてはめ、II型の逸脱度分析により効果の検定を行った。

結果

PBZの倒伏軽減効果および諸特性に及ぼす影響

本剤の処理が「ミルクィーサマー」の倒伏および他の生育・収量等諸特性に及ぼす影響を施肥量と関連づけて調べた結果を、図2と表2～4に示した。GLMMあてはめの際に、どの確率分布・リンク関数の組み合わせを採用したかについては、図の説明文あるいは表の脚注に示した(尤度比検定の結果は省略)。

試験圃場の倒伏面積比率については、PBZ処理・施肥量・観察日の全効果およびPBZ処理と観察日の交互作用が有意だったため、固定効果を図2中の12群のみとしたGLMMに基づいて、総当たりの多重比較を行った。倒伏面積比率は、無処理区の標準施肥条件下では7～23%、同区の倍量施肥条件下では30～58%の範囲で推移したのに対し、双方の施肥条件下において、PBZ処理はほぼ一貫して、無処理区よりも倒伏を有意に少なく、かつゼロかそれに近い値(3%以内)に保つことがわかり(図2)、本剤の倒伏軽減効果が実証された。倍量施肥・無処理区では、標準施肥・無処理区と比べ、数値の上では一貫して倒伏面積比率が高かったものの、これら2区間で有意差がみられたのは10月15日(前者で30%、後者で7%)のみであり(図2)、したがって多肥条件下でより倒伏軽減効果が高いといった傾向は検出されなかった

表2. 石垣島における生育・収量等のデータに対するPBZ処理と施肥量の効果の検定ならびに各試験区の平均値¹⁾

	出穂期 ²⁾	穂揃期間 (日) ³⁾	稈長 (cm) ⁴⁾	穂長 (cm) ⁵⁾	穂数/株 ⁶⁾	一穂粒数 ⁷⁾	登熟歩合 (%) ⁸⁾	千粒重 (g) ⁹⁾	玄米収量 (g/m ²) ⁹⁾	屑米歩合 (%) ¹⁰⁾
試験圃場										
効果の検定										
PBZ処理	*	*	*	*	ns	ns	*	ns	ns	ns
施肥量	*	ns	*	ns	*	ns	ns	*	ns	*
PBZ処理×施肥量	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	ns
平均値										
標準施肥・無処理	9月27日 c	3.2 b	78.8 b	16.1 ab	15.7 b	64.4	49.7 a	20.2 a	286	5.72 b
標準施肥・PBZ処理	9月28日 ab	4.2 a	64.2 d	15.6 c	16.4 b	63.0	41.9 c	20.4 a	268	6.02 ab
倍量施肥・無処理	9月28日 b	3.7 ab	83.6 a	17.2 a	20.1 a	69.5	43.8 b	20.1 a	290	6.64 ab
倍量施肥・PBZ処理	9月29日 a	4.1 a	68.7 c	16.1 bc	19.1 a	62.1	45.7 b	19.0 b	308	7.93 a
農家圃場										
PBZ処理の効果の検定										
無処理	10月6日	3.8	75.3	18.2	17.0	59.5	60.7	21.8	274	8.39
PBZ処理	10月7日	3.5	67.8	18.5	16.8	57.3	54.1	21.9	275	7.75

1) *: $p < 0.05$, ns: $p > 0.05$ (ブロックをランダム効果としたGLMMおよびII型の逸脱度分析による); 同一英小文字を共有しない試験区間に有意差あり(Tukey型多重比較, $p < 0.05$). 2) ガンマ分布, リンク=log. 3) 正規分布, リンク=log. 4) 正規分布, リンク関数なし. 5) 正規分布, 試験圃場ではリンク=log, 農家圃場ではリンク関数なし. 6) ポアソン分布, リンク=log. 7) 目的変数は穂の合計数, 負の二項分布, リンク=log, オフセット項にlog(調査穂数). 8) 目的変数は登熟粒と不稔粒の実数, 二項分布, リンク=logit. 9) 水分含量15%に換算した値. 10) 幅1.8mm未満の玄米の重量比; 目的変数は屑米重, 試験圃場ではガンマ分布, 農家圃場では正規分布, いずれもリンク=log, オフセット項にlog(調査玄米重).

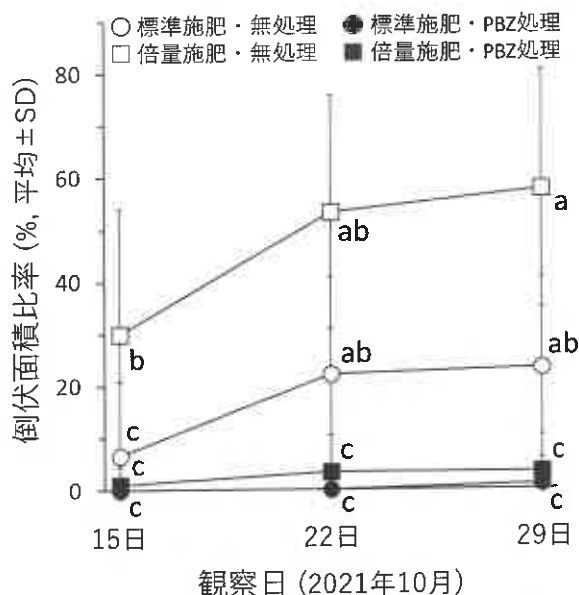


図 2. 試験圃場における倒伏面積比率の推移とその 4 試験区間での比較. 図中の英小文字は, 全データに 1 を足した上で, ブロックと全調査区画をランダム効果とした GLMM (ガンマ分布, リンク=log) に基づき, 図中の 12 群間で Tukey 型の多重比較を行った結果を示す (同一文字を共有しない群間に有意差あり, $p < 0.05$).

た. 他の諸特性については, 出穂期では逸脱度分析で PBZ 処理と施肥量の双方が統計的に有意となり, それらの交互作用は有意でなかった. 多重比較により, 標準施肥条件下では PBZ 処理は出穂を, 9 月 27 日から 28 日へと 1 日遅らせ, 倍量施肥条件下では, 無処理区・PBZ 処

理区とも標準施肥の場合より 1 日ずつ出穂が遅れる (それぞれ, 9 月 28 日と 29 日になる) ことが判明した (表 2). 穂揃期間については, PBZ 処理の効果だけが有意となり, 本剤の処理によって延長する傾向がみられたが, 有意差がみられたのは標準施肥・無処理区の値 (3 日) と標準・倍量施肥双方の PBZ 処理区の値 (いずれも 4 日) の間だけだった (表 2). 成熟期については, 試験区間や調査区画間に外観上明らかな差異は観察されず, 圃場全体で 11 月 1 日に成熟したと判定された. 稈長については出穂期と同様, PBZ 処理と施肥量の効果が有意となり, 標準施肥条件下と倍量施肥条件下で, 無処理区の値はそれぞれ 79cm と 84cm, PBZ 処理区ではそれぞれ 64cm と 69cm となり, PBZ 処理が稈長を短く保つ効果をもつことが再確認されたとともに, 倍量施肥条件下では無処理区・PBZ 処理区の双方で有意に長稈となった (表 2, 以下同様). 穂長については, PBZ 処理の効果だけが有意となり, 標準・倍量施肥の双方の条件下で, PBZ 処理区の値 (16cm 前後) が, 無処理区の値 (16 ~ 17cm) よりも有意に小さくなることが判明した. 穂数については施肥量の効果だけが有意となり, PBZ 処理の影響は検出されず, 倍量施肥によって 16 本前後から 20 本前後に増加した. 一穂粒数については, PBZ 処理・施肥量の効果がともに有意でなく, これらの影響は検出されなかった. 登熟歩合については, PBZ 処理の効果, およびそれと施肥量との交互作用が有意となり, 倍量施肥条件下ではいずれも 45% 前後であり, PBZ 処理の有意な影響はみられなかったものの, 標準施肥条件下では, PBZ 処理により 50% から 42%

表 3. 石垣島における食味データに対する PBZ 処理と施肥量の効果の検定ならびに各試験区の平均値¹⁾

	外観	香り	味	粘り	硬さ	総合
試験圃場						
効果の検定						
PBZ 処理	ns	ns	ns	ns	ns	ns
施肥量	ns	ns	ns	ns	ns	ns
PBZ 処理 × 施肥量	*	*	ns	ns	ns	ns
平均値						
標準施肥・無処理	0.02 a	-0.06 a	0.26	0.15	0.20	0.15
標準施肥・PBZ 処理	0.24 a	0.18 a	0.18	0.04	-0.02	0.20
倍量施肥・無処理	0.16 a	0.11 a	0.20	0.05	0.27	0.25
倍量施肥・PBZ 処理	-0.08 a	-0.02 a	0.11	-0.06	0.41	0.18
農家圃場						
PBZ 処理の効果の検定	ns	ns	ns	ns	*	ns
平均値						
無処理	0.27	0.11	0.28	0.29	-0.33	0.31
PBZ 処理	0.15	0.12	0.08	0.26	0.08	0.16

1) *: $p < 0.05$, ns: $p > 0.05$ [ブロックと評価者を (試験圃場では調査日も) ランダム効果とした順序ロジットモデルおよび II 型の逸脱度分析による]; 同一英小文字を共有する試験区間には有意差がない (Tukey 型多重比較, $p > 0.05$).

へと有意に低下した。千粒重については、PBZ 処理の効果だけが有意となり、多重比較では、倍量施肥・PBZ 処理区の値 (19g) が、他の 3 区の値 (いずれも 20g) よりも有意に小さかった。玄米収量については、PBZ 処理・施肥量の効果のいずれも有意ではなく、いずれの区でも 1m²あたり 300g 前後 (1a あたり 30kg 前後) であった。屑米歩合については、施肥量の効果だけが有意となり、多重比較では標準施肥・無処理区の値 (6%) と倍量施肥・PBZ 処理区の値 (8%) の間にだけ有意差がみられた。また、玄米収量から屑米歩合の分を差し引いた値 (精玄米重) についても、PBZ 処理や施肥量による有意な変化は観察されなかった (データ省略)。食味データ 6 項目のうち、外観と香りでは PBZ 処理と施肥量の交互作用が有意となったが、多重比較では 4 試験区間に有意差はみられず、残り 4 項目については、PBZ 処理・施肥量の効果はともに有意ではなかった (表 3)。

石垣島の農家圃場においては、無処理区・PBZ 処理区とも倒伏は観察されなかったため、PBZ の倒伏軽減効果を評価できなかった。試験圃場と同様に、PBZ 処理は出穂を 10 月 6 日から 7 日へと 1 日遅らせたが、穂揃期間には有意差をもたらさなかった (表 2)。成熟期については、圃場全体で 11 月 5 日に成熟したと判定され、処理区間の差は観察されなかった。PBZ 処理区の稈長 (68cm) は無処理区の値 (75cm) よりも有意に小さかった (表 2、以下同様)。穂長と穂数は PBZ 処理によって有意に変化しなかった。一穂粒数と登熟歩合についてはそれぞれ、無処理区では 60 本と 61%、PBZ 処理区では 57 本と 54% となり、

処理によって有意に減少あるいは低下した。千粒重・玄米収量・屑米歩合は PBZ 処理によって有意に変化しなかった (玄米収量は 275g/m² 前後)。食味データに関しては、PBZ 処理により、硬さが 0.1 から -0.3 へと有意に低下した一方で、他の 5 項目では処理の有意な効果はみられなかった (表 3)。

西表島の農家圃場における試験結果を表 4 に示した。稈長においては、PBZ 処理と試験年の効果がともに有意となり、2 年を通じて、無処理区 (84~87cm) よりも PBZ 処理区 (69~78cm) のほうで短く保たれたとともに、2024 年のほうが 2023 年よりも双方の区で短穂となった。穂長と穂数では、処理、年とそれらの交互作用のいずれも有意ではなかった。倒伏程度については、処理の効果だけが有意であり、いずれの年においても無処理区では倒伏程度 5 (全倒伏) であったのに対し、PBZ 処理区では倒伏程度 3 以下であった。玄米収量に関しては、処理の効果は有意ではなく、年の効果だけが有意であり、2024 年 (220g/m² 前後) には 2023 年 (410g/m² 前後) の半分程度の低収となった (この原因は明らかでないが、台風 21 号が影響した可能性もある)。これにより、西表島においても、PBZ は収量への有意な影響なしに倒伏を軽減することが確かめられた。

PBZ 剤散布ムラが諸特性に及ぼす影響

本剤の散布ムラが「ミルキーマー」の倒伏面積比率に及ぼす影響を GLMM (ガンマ分布, リンク=log) によって調べた結果、PBZ 散布法 (均一散布・局所散布) と調査

表 4. 西表島の農家圃場における生育・収量データに対する PBZ 処理と試験年の効果の検定ならびに各年・試験区の平均値¹⁾

	稈長 (cm) ²⁾	穂長 (cm) ³⁾	穂数/株 ⁴⁾	倒伏程度 ⁵⁾	玄米収量 (g/m ²) ^{2,6)}
効果の検定					
PBZ 処理	*	ns	ns	*	ns
試験年	*	ns	ns	ns	*
PBZ 処理 × 試験年	ns	ns	ns	ns	ns
2023 年の平均値					
無処理	87.1	18.3	25.4	5.0	405
PBZ 処理	77.9	17.6	26.0	2.7	415
2024 年の平均値					
無処理	83.5	17.5	24.2	5.0	212
PBZ 処理	68.5	17.1	22.9	3.0	230

1) *: p < 0.05, ns: p > 0.05 [圃場を (稈長~穂数では調査プロットも) ランダム効果とした GLMM あるいは順序ロジットモデル, および II 型の逸脱度分析による]。2) 正規分布, リンク関数なし。3) ガンマ分布, リンク=log。4) 負の二項分布, リンク=log。5) 日本作物学会九州支部会 (2013) に準じて判定。順序ロジットモデル。6) 水分含量 15% に換算した値。

表 5. 石垣島の試験圃場における生育・収量等のデータに対する PBZ 散布法（均一散布・局所散布），調査区画および施肥量の効果の検定¹⁾

	到穂日数 ²⁾	穂揃期間	稈長 ³⁾	穂長 ³⁾	穂数 ⁴⁾	一穂粒数 ⁵⁾	登熟歩合 ⁶⁾	千粒重 ^{3,7,8)}	玄米収量 ^{3,7)}
PBZ 散布法	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	ns
調査区画	*	ns	*	ns	ns	*	*	*	*
施肥量	*	ns	*	*	*	ns	*	*	*
PBZ 散布法 × 調査区画	*	*	*	ns	ns	ns	*	*	ns
PBZ 散布法 × 施肥量	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	ns
調査区画 × 施肥量	ns	ns	*	ns	ns	ns	*	*	ns

1) 散布法と調査区画の詳細については図 1 を参照。*: $p < 0.05$, ns: $p > 0.05$ (ブロックをランダム効果とした GLMM および II 型の逸脱度分析による)。2) 移植から出穂期までの日数; 正規分布, リンク=log。3) 正規分布, リンク関数なし。4) ポアソン分布, リンク=log。5) 目的変数は穂の合計数, 負の二項分布, リンク=log, オフセット項に $\log(\text{調査穂数})$ 。6) 目的変数は登熟粒と不稔粒の実数, 二項分布, リンク=logit。7) 水分含量 15% に換算した値。8) 3 つの調査区画のうち中間の区画だけからデータを得たため, 調査区画に関連する要因は含まれない。

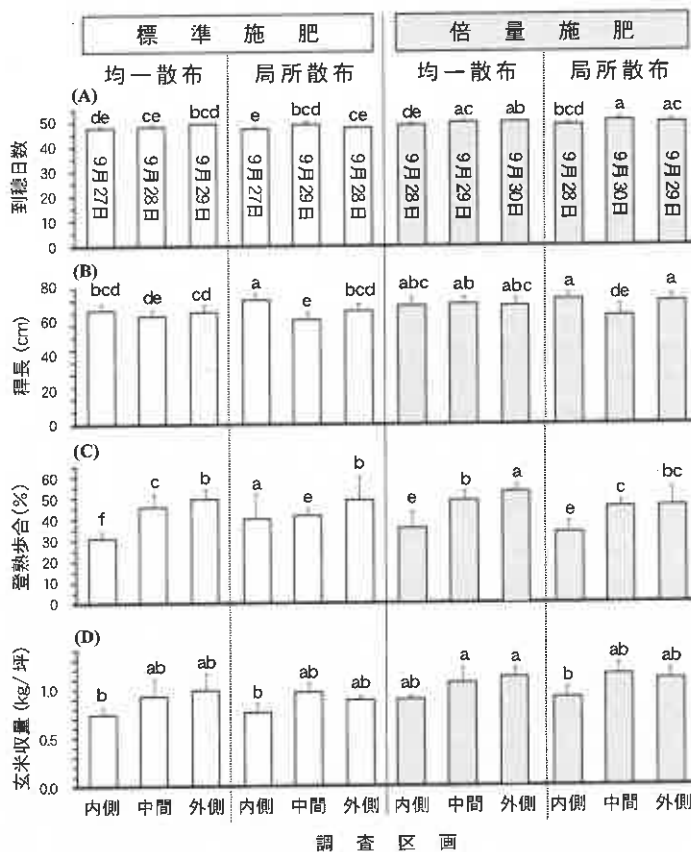


図 3. 標準・倍量施肥条件下における PBZ 均一散布・局所散布区画, および区内の調査区画間での到穂日数 (A), 稈長 (B), 登熟歩合 (C) および玄米収量 (D) の平均値の比較。エラーバーは標準偏差。(A) に示されている日付は出穂期の平均値 (2021 年)。均一散布区では区画の位置にかかわらず PBZ を均一に散布した一方で, 局所散布区では中央の区画にのみ同量の PBZ を散布した (図 1 も参照)。図中の英小文字は, ブロックをランダム効果とした GLMM (確率分布, リンク関数等の情報については表 4 を参照) に基づいて図中の 12 群間で Tukey 型の多重比較を行った結果を示す (同一文字を共有しない群間に有意差あり, $p < 0.05$)。

区画を含む 4 要因とそれらの二元交互作用の中で, 5%水準で有意になったものはなく (データ省略), 散布ムラが倒伏のムラとして現れるという証拠は得られなかった。他の生育・収量等諸特性に及ぼす影響を施肥量と関連づけて調べた結果を, 採用された確率分布・リンク関数の組み合わせ等とともに, 主として表 5, 図 3 および表 6 に示した。

到穂日数, 穂揃期間および稈長においては, PBZ 散布法と調査区画の交互作用が有意となり (表 5), 散布ムラ

がこれらの特性のムラをもたらすことが示された。到穂日数と稈長では, 施肥量の効果も有意であり, 後者ではさらに調査区画と施肥量の交互作用も有意だった (表 5)。標準・倍量施肥の双方の条件下で, 局所散布区の中央の区画では, その両側の区画や均一散布区と比べて出穂が 1~2 日遅れ, 稈長がいずれも約 60cm と短く保たれた (図 3A, B; ただし一部の群間には有意差がみられない)。施肥量の効果に関しては, 倍量施肥のほうが長稈となり, かつ出穂が遅れる傾向があり, さらに施肥量によって,

局所散布による稈長への影響のしかたが異なる（たとえば、標準施肥では、内側の区画の値が均一散布区より局所散布区で有意に大きくなっているのに対し、倍量施肥ではそのような差がみられない）傾向がみられた（図3A, B）。穂揃期間については、単一の効果だけが有意であったため、元の GLMM からすべての交互作用項を除き、固定効果を6試験区（PBZ 散布法2処理×3調査区画）と施肥量だけとしたモデルに基づき、6試験区間で Tukey 型の多重比較を行った。その結果、数値の上では中央の区画の値が、その両側の区画や均一散布区と比べて大きかった（すなわち、穂揃いにより時間を要していた）が、有意差がみられたのは局所散布区の中央の区画（平均4.8日）と同区の内側の区画（平均3.8日）の間だけであり（他区のデータは省略）、上記2特性において観察されたような明らかな傾向はみられなかった。穂長と穂数については、PBZ 散布法に関連する効果は有意ではなく、施肥量の効果だけが有意であり（表5）、倍量施肥条件下でより長く（多く）なっていた（データ省略）。一穂粒数については、調査区画の効果だけが有意だった（表5）ため、元の GLMM からすべての交互作用項を除き、固定効果を調査区画を含む3要因のみとしたモデルに基づき、3調査区画間で Tukey 型の多重比較を行った。その結果、内側の区画の値（平均60.7）が外側のそれ（67.2）より有意に小さく、中間の区画の値（62.0）はどちらも有意に異ならなかった。登熟歩合については、3要因およびすべての交互作用が有意となり（表5）、多重比較では多くの群間に有意差がみられた（図3C、以下同様）。標準・倍量施肥の双方の条件下において、均一散布区では3区画間に有意差がみられ、内側から外側にかけて値が大き

なっていたのに対し、局所散布区ではこのような明瞭な傾向はみられなかった。3区画のうち中間の区画の値に注目すると、標準・倍量施肥の双方の条件下において、局所散布区の値のほうが均一散布区よりも有意に小さかった。局所散布区だけの値に着目すると、標準施肥条件下では、中間の区画の値は内側の区画と有意に異ならず、外側の区画より有意に小さかったのに対し、倍量施肥条件下では、この値は内側の区画より有意に大きく、外側の区画とは有意に異ならなかった。これらの傾向が、3つの交互作用の有意性として検定結果に反映されたものと思われる。千粒重については、PBZ 散布法、施肥量とそれらの交互作用のいずれも有意でなかった（表5）。玄米収量については、調査区画と施肥量の効果だけが有意となり、PBZ 散布法の効果は有意でなかった（表5）ため、散布ムラの収量への影響は認められなかった。実際のデータを見ると、内側の区画の収量が他の区画より少なく、倍量施肥のほうが標準施肥よりも全体的に多収となっているように見えるものの、多重比較の結果では多くの群間に有意差がなく、標準施肥の内側の区画と、倍量施肥の中間・外側の区画の間だけに有意差がみられた（図3D）。

屑米歩合については、PBZ 散布法と施肥量の効果が有意であり、局所散布と倍量施肥の双方の影響によって平均値が上昇する傾向がみられたが、多重比較の結果では、標準施肥・均一散布区と他3区の間だけに有意差がみられた（表6）。食味データのうち、外観では施肥量の効果だけが有意となり、倍量施肥によって評価が低下する傾向がみられたが、有意差がみられたのは標準施肥・均一散布区と他3区の間だけであった（表6、以下同様）。香

表6. 屑米歩合と食味データに対するPBZ散布法（均一散布・局所散布）と施肥量の効果の検定ならびに各試験区の平均値¹⁾

	屑米歩合 (%) ²⁾	食味データ ³⁾					総合
		外観	香り	味	粘り	硬さ	
効果の検定							
PBZ 散布法	*	ns	*	ns	ns	ns	*
施肥量	*	*	ns	ns	ns	*	*
PBZ 散布法×施肥量	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
平均値							
標準施肥・均一散布	6.02 a	0.24 a	0.18 a	0.18	0.04	-0.02 a	0.20 a
標準施肥・局所散布	7.76 b	-0.11 b	-0.11 ab	0.09	0.00	0.02 a	0.13 ab
倍量施肥・均一散布	6.65 b	-0.08 b	-0.02 b	0.11	-0.06	0.41 a	0.18 ab
倍量施肥・局所散布	7.94 b	-0.12 b	-0.16 b	-0.02	0.12	0.24 a	-0.12 b

1) 散布法の詳細については図1を参照。数値は3つの調査区画のうち、中間の区画(図1)から得たデータに基づく。
*: $p < 0.05$, ns: $p > 0.05$ (II型の逸脱度分析による); 同一英小文字を共有しない試験区間に有意差あり ($p < 0.05$)。均一散布区の平均値は、表2・表3に示された試験圃場のPBZ処理区のものと同じ。2) 幅1.8mm未満の玄米の重量比; ブロックをランダム効果としたGLMM, 目的変数は屑米重, ガンマ分布, リンク=log, オフセット項にlog(調査玄米重)。3) ブロックと評価者をランダム効果とした順序ロジットモデル。

りについては、PBZ 処理法の効果だけが有意となり、局所散布によって評価が低下する傾向がみられたものの、有意差がみられたのは標準施肥・均一散布区と倍量施肥 2 区の間だけであった。味と粘りについてはいずれの効果も有意ではなく、硬さについては、施肥量の効果が有意であったものの、多重比較では 4 区間に有意差はみられなかった。総合については、PBZ 処理法と施肥量の効果が有意であり、局所散布と倍量施肥によって評価が低下する傾向がみられたものの、有意差がみられたのは標準施肥・均一散布区と倍量施肥・局所散布区の間だけであった。

考 察

本研究により、標準施肥量と多肥の双方の栽培条件下において、パクロブトラゾール粒剤 (PBZ) の処理が「ミルキーサマー」の稈長を短く保つだけでなく、実際に倒伏を軽減することが、石垣島の二期作において初めて実証され、その効果は、本品種が主に栽培されている西表島の農家圃場においても確かめられた。本剤の処理は、出穂期や穂揃期間を含むいくつかの生育特性と収量構成要素に影響を及ぼす場合があったものの、いずれの試験においても、成熟期については明確な差がみられず、玄米収量への有意な影響も示さず、また石垣島での食味データについても、硬さを上昇させた場合があったことを除けば、有意に影響しなかった。これらの結果は、本剤が収穫期や収量、食味等にほぼ影響せず、本品種の倒伏を効果的に抑制できることを示しており、西表島を中心とした本品種の栽培地において、実際に倒伏が問題となっている圃場で本剤の使用を推奨するに足るものである。本剤の普及によって「ミルキーサマー」の栽培が拡大し、二期作の栽培面積の減少に歯止めがかかることを期待したい。

ただし、西表島の農家圃場の PBZ 処理区における倒伏程度が 2.7 ~ 3.0 であった (表 5) のに対し、石垣島の試験圃場の同区では、倒伏面積比率がほぼゼロ (図 2)、すなわち倒伏程度 3 以上の倒伏がほとんどみられなかったため、今回の結果からは、西表島の農家圃場のほうで倒伏程度がより高かったと言える。このような倒伏程度の差をもたらした原因については、異なる場所・年において行われた試験間での比較であるために確かなことは言えないが、PBZ の処理時期による可能性が高いだろう。すなわち、試験圃場での PBZ 処理時期 (9 月 16 日) は、出穂期 (9 月 27 ~ 30 日; 図 3) の 11 ~ 14 日前であったのに対し、農家圃場では中干しの終了に合わせて処理を行った結果として、処理時期 (10 月 7 日) が出穂期 (10 月 11 ~ 16 日頃) の約 4 ~ 9 日前と、より遅くなった。このため、実際に西表島で本剤の使用を普及するためには、中干しの開始時期を早めるか、あるいは期間を短縮した上で、今回よりも 1 週間ほど早く PBZ 処理を行うよう指導するのがよいものと思われる。ただし、こうした

指導の根拠を得るためにも、今後は「ミルキーサマー」において PBZ 処理時期と倒伏程度の関係が詳しく調べられることが望ましい。

本研究はさらに、PBZ の散布ムラを模した局所散布が、玄米収量には有意な変化をもたらさないものの、稈長をはじめとしたいくつかの特性に明らかなムラをもたらすことを実証した。このように、本剤の散布ムラは圃場内で局所的に短稈となる部分を生み出すため、たとえ圃場に存在する玄米量に変化がなかったとしても、コンバイン等の機械による収穫・脱穀時に回収されない穂が占める割合が上がることで、減収をもたらす可能性も考えられる。また、本剤の局所散布により、層米歩合の上昇や、いくつかの食味データの低下がみられる場合があり (表 6)、これらの点でも散布ムラは好ましくない可能性が示唆される。これらの理由から、本剤の普及を今後進める場合、その使用時にはできるだけ均一に散布するよう指導することが推奨される。なお、本研究のように、PBZ の散布ムラが水稻の生育・収量等に及ぼす影響を詳しく調べた事例は他に見当たらないため、本研究の結果は、他地域における水稻栽培で本剤の利用が検討される際にも参照可能な、有用なものとなるであろう。

本研究は、イネの倒伏や生育特性から収量構成要素、食味データに至る種々の特性に及ぼす PBZ 処理の影響を、適切な実験デザインと統計モデル解析に基づいて明らかにした数少ない例でもある。イネの諸特性に対する PBZ 粒剤の影響を調べた研究例は、世界各地に多数あり (日本本土 : 伊藤ら (1986), 上野 (1989), 佐藤ら (1993), 渡部 (1993), 小菅・木野田 (1999); 韓国 : Oh *et al.* (1984), Pyon and Huh (1985), Kang *et al.* (1985), Im *et al.* (1987, 1988), Lee *et al.* (1987), Lee (1988), Lee and Kim (1988), Lee and Dedatta (1991), Kang *et al.* (1992); 中国 : Goufo *et al.* (2011), Xie *et al.* (2019), Xu *et al.* (2020), Xing *et al.* (2020), Wen *et al.* (2020), Cao *et al.* (2021); フィリピン : Mactal and Canare Jr. (2016), Magtalas *et al.* (2020), Azarcon *et al.* (2022); マレーシア : Sinniah *et al.* (2012), Syahputra *et al.* (2016); インドネシア : Wahyuni *et al.* (2002), Dewi *et al.* (2016), Dewi and Darussalam (2018), Syahputra *et al.* (2018), Silitonga and Nasution (2019), Sitepui *et al.* (2019), Darussalam and Dewi (2022); インド : Mukherjee (2020); スペイン : Bridgemohan and Bridgemohan (2014); 米国 : Street *et al.* (1986); ブラジル : Alvarez *et al.* (2012, 2014)), さまざまな品種や栽培条件において、PBZ が稈長を短く保ったり、倒伏を軽減することが報告されている。これらの研究では、収量とその構成要素を同時に調べている例が多いが、食味を含む米の品質への影響まで調べた例は少なく、その点で本研究では、新規性の高い知見も多く得られている。以下では本研究で調べられた、倒伏と稈長以外の諸特性への PBZ の影響について、他地域での研究結果とも関連させながら議論する。

出穂に対する PBZ の影響を検討した研究例は少なく、韓国での数例に限られる。Im *et al.* (1987, 1988) では出穂

期への影響がみられず、Kang *et al.* (1992) では、処理による1~3日の遅延がみられる。本研究では、標準施肥・多肥の双方の条件下において、PBZ処理(均一散布)は出穂を1日遅らせ(表2)、本剤の濃度がより高くなっていることが想定される局所散布区の中央の区画では、出穂がさらに1日遅れた(図3A)。Kang *et al.* (1992) では、PBZ処理量と出穂期との関連については言及されていないもの、表に示されたデータからは処理量が増えると出穂が遅れる傾向が読みとれるため、本研究と類似した結果が得られている。一方、穂揃期間へのPBZの影響を調べた文献は見当たらないため、本研究がその影響を初めて示した例となるだろう。本研究では、試験圃場においてPBZ処理が穂揃期間を延長する傾向がみられており(表2)、局所散布区における中央の区画ではこの値がより大きくなる傾向がみられた(結果を参照)。これらの結果は、本剤の処理が株間あるいは茎間での出穂のばらつきを増大させていることを示すとともに、局所的な処理濃度の上昇により、そのばらつきがさらに増大することを示唆している。出穂期の遅延については、PBZによる生育遅延作用が出穂にも反映されたものと解釈することができるが、出穂のばらつきの増大のメカニズムについては全く見解がない。ひとつの可能性として、均一散布区や、局所散布区の中央の区画においては、今回の処理方法(人手による散布)では制御できないPBZの散布ムラが生じており、これによって吸収されるPBZの量が散布範囲内の株間で異なり、こういった出穂のばらつきをもたらしていることも考えられる。この点については今後詳しく調べる必要があるだろう。

穂長については、PBZ処理により短く保たれる(あるいは、その点に言及はないが、データからそのように読みとれる)例が多く(Oh *et al.*, 1984; Kang *et al.*, 1985; Pyon and Huh, 1985; Im *et al.*, 1987, 1988; 上野, 1989; 渡部, 1993; Mukherjee, 2020)、他のいくつかの例では有意な影響がみられていない(Lee and Dedatta, 1991; Mactal and Canare Jr., 2016; Cao *et al.*, 2021)。本研究においても、試験圃場では本剤の処理により穂長が短く保たれ、その一方で農家圃場では、有意な効果はみられなかった(表2)。穂長短縮のメカニズムについては、PBZによる茎の生長抑制と同じメカニズム(上野, 1989)が働いたものと解釈できるだろう。Magtalas *et al.* (2020)だけが唯一、本剤の処理により、供試系統の一部で穂長が有意に伸長したことを報告しており、この現象は興味深い。

穂数については、PBZ処理による影響はないとする(あるいは、そのような記述はないが、データからそう読みとれる)研究例が多く(Oh *et al.*, 1984; Im *et al.*, 1987; Lee, 1988; 上野, 1989; 遠藤ら, 1990; Lee and Dedatta, 1991; 渡部, 1993; Wahyuni *et al.*, 2002; Sinniah *et al.*, 2012; Xie *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2020; Cao *et al.*, 2021)、本研究でも、試験圃場と農家圃場の双方において、穂数への本剤の影響は検出されなかった(表2)。他の研究例では、本剤の処理によって穂数が減少する場合がある例(Lee and

Kim, 1988; Pyon and Huh, 1985; Lee *et al.*, 1987; Alvarez *et al.*, 2012, 2014)と、増加がみられる場合がある例(Lee *et al.*, 1987; Im *et al.*, 1988; Syahputra *et al.*, 2016; Sitepu1 *et al.*, 2019; Magtalas *et al.*, 2020; Azarcon *et al.*, 2022)の双方がある。一穂数についても同様に、研究例によって結果が異なるが、PBZ処理による有意な影響がない例(Im *et al.*, 1987; Mactal and Canare Jr., 2016; Xie *et al.*, 2019; Cao *et al.*, 2021; 本研究(表2)よりも減少する場合がある例(Oh *et al.*, 1984; Kang *et al.*, 1985; Pyon and Huh, 1985; 伊藤ら, 1986; Lee *et al.*, 1987; Im *et al.*, 1988; Lee, 1988; Lee and Kim, 1988; 上野, 1989; 遠藤ら, 1990; 渡部, 1993; Alvarez *et al.*, 2012, 2014; Xu *et al.*, 2020)のほうが多く、増加する場合がある例(Lee *et al.*, 1987; Syahputra *et al.*, 2016; Magtalas *et al.*, 2020)はやや少ない。これらの研究例の間では、供試品種・系統や栽培条件、地域等いくつかの要因が異なるため、どの要因がこのような結果の差をもたらすのかについては、現時点では明らかでない。

緒言において言及した、PBZの用法等を示したパンフレット中には、「スマレクトを散布したイネは止葉が直立し、受光態勢のよい草姿となります。その結果、登熟歩合・千粒重が向上することが、多くの試験を通して確認されています。」という記述がある。しかし、本研究ではそのような結果は得られず、むしろ逆の傾向がみられた。すなわち、登熟歩合については、試験圃場の標準施肥条件下と農家圃場ではPBZ処理区の値が小さく、千粒重については試験圃場の倍量施肥条件下で同区の値が小さかった(表2)。本剤の農薬登録のために取得されたデータの一部を掲載している上野(1989)では実際に、本剤の処理により登熟歩合の値がやや上昇しているように思われるが、他の研究例では必ずしもそうではない。Pyon and Huh(1985)、Lee *et al.* (1987)、Lee(1988)およびAlvarez *et al.* (2012, 2014)では、特定の品種なり施肥量、処理条件下においては、本剤の処理により登熟歩合が低下することが示されているか、あるいはそのような記述がないにしても、データからそういった傾向を読み取ることができる。Oh *et al.* (1984)、Lee and Dedatta(1991)、渡部(1993)、Xie *et al.* (2019)、Xu *et al.* (2020)およびCao *et al.* (2021)では、本剤の処理による登熟歩合への有意な影響は認められていない。その一方で、本剤によって登熟歩合が向上する場合があることを示した(あるいは、データからそのように読みとれる)例は多い(遠藤ら, 1990; Pyon and Huh, 1985; Lee *et al.*, 1987; Im *et al.*, 1987, 1988; Lee and Kim, 1988; Mactal and Canare Jr., 2016; Dewi *et al.*, 2016; Syahputra *et al.*, 2016; Magtalas *et al.*, 2020)。千粒重についても、パンフレットに記載されているように、PBZ処理によって増加する場合があることを示した(あるいは、データからそのように読みとれる)例は多い(Pyon and Huh, 1985; Im *et al.*, 1987, 1988; Lee and Kim, 1988; 渡部, 1993; Wahyuni *et al.*, 2002; Sinniah *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2020)が、影響がみられないとする例も同程度に多い(上野, 1989; 遠藤ら, 1990; Lee, 1988; Lee and Dedatta,

1991; Goufo *et al.*, 2011; Alvarez *et al.*, 2012; Mactal and Canare Jr., 2016; Xie *et al.*, 2019; Cao *et al.*, 2021). それらと比べると、本研究のように千粒重の減少がみられる場合があることを示した(あるいは、データからそのように読みとれる)例は少ないものの、いくつかある(渡部, 1993; Alvarez *et al.*, 2014; Mukherjee, 2020). 穂数等の場合と同様に、どのような要因がこうした結果の差をもたらすのかについては現時点では明らかでなく、今後追及する必要があるが、少なくともパンフレットに記載されたとおりの結果が得られない場合があることは事実であるため、本剤の使用時にはその点にも留意する必要がある。

玄米収量については、本研究では試験圃場と農家圃場の双方で PBZ 処理の有意な影響がみられず、他の研究でもそのような例はあるものの (Pyon and Huh, 1985; 小菅・木野田, 1999; Goufo *et al.*, 2011; Mactal and Canare Jr., 2016; Bridgemohan and Bridgemohan, 2014), 増加する場合があることを示した(あるいは、データからそのように読みとれる)研究例のほうがはるかに多い (Oh *et al.*, 1984; Street *et al.*, 1986; Im *et al.*, 1987, 1988; Lee *et al.*, 1987; 上野, 1989; 遠藤ら, 1990; Kang *et al.*, 1992; Lee and Dedatta, 1991; 佐藤ら, 1993; Wabyuni *et al.*, 2002; Sinniah *et al.*, 2012; Syahputra *et al.*, 2016; Sitepul *et al.*, 2019; Mukherjee, 2020; Xu *et al.*, 2020; Cao *et al.*, 2021; Xing *et al.*, 2022; Magtalas *et al.*, 2020; Azarcon *et al.*, 2022) [なお, Liao *et al.* (2023) は、複数の文献のデータを対象としたメタ分析により、PBZ の米の収量への有意な影響はないとしているが、彼らはこれらの増収がみられた事例のほとんどを引用していないため、この結論は適切であるとは言いがたい]. 本剤の収量構成要素への影響については、上で述べたとおり、穂数への影響がみられない例が多く、一穂粒数については減少する場合がある例が多い一方で、登熟歩合と千粒重については向上・増加する場合がある例が多いため、これら 2 つの特性の変化が増収の主要因となっていると言えるだろう。これだけ多くの研究で、玄米収量を含むこれらの特性の増加・向上がみられていることを考慮すると、「ミルキーサマー」においても同様な増加・向上を実現できる余地は十分にあると思われる。今後は本品種の増収をめざして、本剤の使用により適した栽培条件(施肥量, 移植時期等)や、処理時期・処理量等を検討する必要がある。その一方で、伊藤ら (1986), Lee *et al.* (1987), Lee (1988), Lee and Kim (1988), 渡部 (1993), Alvarez *et al.* (2012, 2014) および Xu *et al.* (2020) は、本剤の処理により減収する場合があることを示している。「ミルキーサマー」においても、本剤が増収ではなく減収をもたらすような栽培・使用条件がある可能性があり、こういった点を明らかにすることも本剤の普及を考慮する上で重要となるので、今後同時に検討するのが望ましい。

すでに述べたとおり、収量およびその構成要素への PBZ の影響を調べた例は多数あるのに対し、食味を含む米の品質への本剤の影響を調べた例は少ない。屑米歩合

への影響については、言及している例が見当たらず、本研究が初めての事例となろう。本剤を均一に散布した場合、屑米歩合への有意な影響はみられなかったが(表 2), 局所散布区の中央の区画では、均一散布区と同じ区画よりも屑米歩合が高くなる場合があり(表 5), この結果は本剤が高濃度になると屑米歩合を上昇させることを示唆する。これについては、処理量と屑米歩合とのより詳しい関係と、本剤が屑米を増やすメカニズムの解明が望まれる。食味については、Lee *et al.* (1987) は、韓国におけるいくつかのうるち米品種を対象に、PBZ 処理された米と無処理の米の食味を官能評価によって比較し、“eating quality”においてはこれらの米を区別できないと述べている(ただし、統計検定はされていない)。現時点で、食味に関する特性への PBZ の影響を調べた研究例として信頼できるものは、Goufo *et al.* (2011) ただひとつである。彼らは、中国南部で栽培される香り米 2 品種に本剤を処理すると、いずれの品種においても香氣成分(主に 2-acetyl-1-pyrroline)が減少し、官能評価における香りも低下することを明らかにしている。本研究の試験圃場の例では、無処理区と PBZ 処理区(均一散布区)の食味比較においては本剤の影響は明らかでなかったものの、均一散布区と局所散布区の中央の区画の間での食味の比較においては、PBZ 処理法の効果が「香り」と「総合」で有意となっており、本剤がより高濃度で処理された想定される局所散布区において、これらの数値が低くなる傾向がみられている(表 5)。この結果は、Goufo *et al.* (2011) で観察されたような香氣成分の減少によってもたらされた可能性もあるだろう。これまでに、PBZ が米の食味に及ぼす影響についてはあまり注目されてこなかったものと思われるが、Goufo *et al.* (2011) と本研究は、少なくとも香りについては影響があることを明確に示しており、また本研究では、農家圃場で栽培された米の「硬さ」が低下するという影響もみられている(表 2)。本剤の米の食味への影響の実態やそのメカニズムについてはまだほとんど研究が進んでおらず、不明な点が多いため、今後詳しく調べることの価値は高い。

最後に、本研究から得られたデータに基づく考察ではないが、世界自然遺産に登録されている西表島を中心として PBZ の使用を今後普及・指導する際の参考情報として、本剤の環境影響に関連するこれまでの知見を整理しておく。本剤の各種動物への毒性や、作物・環境への残留性は総じて低いとされている (French *et al.*, 1990; 食品安全委員会, 2009; European Food Safety Authority, 2010)。また本剤は、水稻のバイオ肥料としても注目される藍藻類のいくつかの種の増殖を促すとする研究例 (Zhang *et al.*, 2011) もある。本剤の導入が藍藻類を増殖させ、それが化学肥料の使用量削減に結びつくのであれば、それは環境保全と農家所得の双方に好ましい状況をもたらすだろう(この点は今後詳しく追及される価値がある)。しかしながら、本剤は沖縄県に分布する、あるいは本県で養殖されている水生生物(魚類, 甲殻類等)にマイナスの影

響を及ぼす可能性もある。たとえば、本剤はコイ目コイ科の純淡水魚ゼブラフィッシュ *Danio rerio* (Hamilton) の胚発生を阻害する (Yetki *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2019)。沖縄県に分布する淡水魚の種の多くは通し回遊性であり (産卵・孵化とも海で行われる)、純淡水魚のほとんどは外来種であるもの (吉郷, 2018)、コイ目の純淡水魚であるフナ類 *Carassius spp.* (コイ科) とドジョウ類 *Misgurnus spp.* (ドジョウ科) については、主に DNA 情報から、沖縄県在来の個体群の存在も示唆されている (Takada *et al.*, 2010; 高田ら, 2010; 清水ら, 2011; 岡ら, 2021)。甲殻類については、沖縄県を含む日本全国に分布する通し回遊性のモクズガニ *Eriocheir japonica* (de Haan) (モクズガニ科) の近縁種であり、中国・台湾等での重要な食用種でもあるチュウゴクモクズガニ *E. sinensis* (H. Milne-Edwards) において、本剤は個体の生存には影響しないものの、脱皮に関するいくつかの遺伝子の発現に影響することから、脱皮への悪影響が疑われている (Li *et al.*, 2022)。Kamble *et al.* (2020) は、同じく重要な食用種で、東南アジア・南アジア各地で養殖されているバナメイエビ *Litopenaeus vannamei* (Boone) (クルマエビ科) の幼体を用い、本剤の濃度の上昇に伴い、血球数の減少や食細胞の活性低下、血液凝固時間の延長等が起こることを明らかにし、養殖場付近での本剤の利用を制限すべきと述べている。沖縄県在来の淡水性甲殻類としては、サワガニ科、ヌマエビ科、テナガエビ科を中心として、八重山地域を含む地域に多数の固有種・希少種が分布している (成瀬, 2016)。これらの多くは河川の上流域に生息するが、たとえば石垣島に固有の純淡水性種イシガキヌマエビ *Neocaridina ishigakiensis* (Fujino & Shokita) (ヌマエビ科) は中流域にも生息するため、周辺の農耕地で使用された農薬による本種への悪影響が懸念されている (沖縄県環境部自然保護課, 2017)。また、八重山地域においては、クルマエビ (*Marsupenaeus japonicus* Bate; クルマエビ科) の養殖場の一部は水田の近くにある (筆者による観察)。このため、養殖場付近の水田で PBZ を散布する場合には、本剤の飛散に注意すべきであろう。上述のように、PBZ が在来の水生生物に悪影響を及ぼす可能性もあることを考慮すると、本剤の無差別的な使用は避けるべきであり、実際に倒伏が問題となる圃場に限定して使用されるべきである。今後は、本剤の使用時における注意点をより明確にするためにも、上記のような沖縄県に固有の水生動物の種・個体群や、主要な養殖品目への影響が解明されることが望まれる。

謝 辞

圃場や収穫物等の管理、サンプル調製ならびにデータ取得作業を手伝って下さった喜友名栄輝氏をはじめとする沖縄県農業研究センター石垣支所職員の皆様、石垣島の農家圃場における試験に協力して下さった栽培者の長浜栄包氏およびご家族の皆様、西表島の農家圃場にお

ける試験に協力して下さった栽培者の本原 聡氏、沖縄県農林水産振興センター農業改良普及課の田部井大介元班長、大前加陽子氏、豊崎孟哉氏および中村 翼氏、琉球大学熱帯生物圏研究センター西表研究施設の城本啓子氏、いくつかのデータ解析法をご教示いただいた琉球産経 (株) の本間 淳氏、ならびに本稿を読んで有益なコメントを下さった沖縄県農業研究センター石垣支所の玉城盛俊元支所長、浦崎直也支所長、井上裕嗣元研究主幹、前田剛希元席研究主幹、太郎良和彦元席研究主幹および匿名の査読者に厚くお礼申し上げる。石垣島における試験は、沖縄振興特別推進交付金による「島嶼を支える作物生産技術高度化事業」(研究期間: 2018 ~ 2021 年度) の一環として行われた。西表島における試験は、2023 年度には「特産農作物生産強化支援事業」、2024 年度には「おきなわ特産農作物産地支援事業」(いずれも沖縄県農林水産部糖業農産課) の補助によって行われた。

引用文献

- 安次富厚・伊禮風沙・田中洋貴 (2021) 水稻奨励品種「ミルキーサマー」に対する植物成長調整剤の倒伏軽減効果, 令和 2 年度沖縄県試験研究成果情報 (沖縄県企画部, 那覇), p.11-12.
- Alvarez, R. C. F., C. A. C. Crusciol and A. S. Nascente (2014) Produtividade de arroz de terras altas em função de reguladores de crescimento, *Revista Ceres*, 61, p.42-49.
- Alvarez, R. C. F., C. A. C. Crusciol, A. S. Nascente, J. D. Rodrigues and G. Habermann (2012) Gas exchange rates, plant height, yield components, and productivity of upland rice as affected by plant regulators, *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47, p.1455-1461.
- Azarcon, R. P., P. T. Vizmonte Jr. and A. M. L. Agustin (2022) Effects of paclobutrazol on growth, yield and water use efficiency of rice (*Oryza sativa* L.) under drought stress condition, *Mindanao Journal of Science and Technology*, 20, p.38-60.
- Bates, D., M. Maechler, B. Bolker and S. Walker (2015) Fitting linear mixed-effects models using lme4, *Journal of Statistical Software*, 67(1), p.1-48.
- Bridgemohan, P. and R. S. H. Bridgemohan (2014) Evaluation of anti-lodging plant growth regulators on the growth and development of rice (*Oryza sativa*), *Journal of Cereals and Oilseeds*, 5(3), p.12-16.
- Cao, F., T. Lei, J. Cao, J. Chen, M. Huang and Y. Zou (2021) Effects of spraying different biochemical regulators in different periods on yield and lodging resistance of high-quality rice, *China Rice*, 27, p.76-78 (in Chinese with English Abstract).
- Christensen, R. H. B. (2019) ordinal-Regression Models for Ordinal Data, R Package Version 2019.12-10, <https://CRA>

- N.R-project.org/package=ordinal.
- Darussalam and K. Dewi (2022) Paclobutrazol and cytokinin regulation on culm growth of black rice (*Oryza sativa* L. “Cempo Ireng”), *Bioeksperimen*, 8, p.121-128.
- Dewi, K., R. Z. Agustina and F. Nurmalika (2016) Effects of blue light and paclobutrazol on seed germination, vegetative growth and yield of black rice (*Oryza sativa* L. ‘Cempo Ireng’), *Biotropia*, 2, p.84-95.
- Dewi, K. and Darussalam (2018) Effect of paclobutrazol and cytokinin on growth and source-sink relationship during grain filling of black rice (*Oryza sativa* L. “Cempo Ireng”), *Indian Journal of Plant Physiology*, 23, p.507-515.
- 遠藤昌幸・今野 周・芳賀静雄 (1990) 水稻における倒伏診断と生育調節, 日本作物学会東北支部会報, 33, p.15-16.
- European Food Safety Authority (2010) Conclusion on the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance paclobutrazol, *EFSA Journal*, 8(11), p.1-60.
- Fox, J. and S. Weisberg (2019) An R Companion to Applied Regression, Third Edition, Sage Publications, p.608.
- French, P., H. Matsuyuki and H. Ueno (1990) Paclobutrazol: control of lodging in Japanese paddy rice, *Pest Management in Rice* (B. T. Grayson *et al.* eds.), Elsevier Applied Science, p.474-485.
- Goufo, P., S. Wongpornchai and X. Tang (2011) Decrease in rice aroma after application of growth regulators, *Agronomy for Sustainable Development*, 31, p.349-359.
- Hervé, M. (2022) RVAideMemoire: Testing and Plotting Procedures for Biostatistics, R package version 0.9-81-2, <https://CRAN.R-project.org/package=RVAideMemoire>.
- Hothorn, T., F. Bretz and P. Westfall (2008) Simultaneous inference in general parametric models, *Biometrical Journal*, 50, p.346-363.
- Im, I. B., S. Y. Lee and M. S. Lim (1987) Growth and lodging of paddy rice as affected by paclobutrazol application under the different level of nitrogen fertilizer, *Korean Journal of Weed Science*, 7, p.171-178 (in Korean with English Abstract).
- Im, I. B., S. Y. Lee and J. H. Kim (1988) Effect of paclobutrazol application on the growth and characters related with lodging of paddy rice plant, *Korean Journal of Weed Science*, 8, p.324-329 (in Korean with English Abstract).
- 伊藤夫仁・前田光裕・前重道雅 (1986) 生育調節剤による水稻の稈長短縮と倒伏軽減効果について, 日本作物学会中国支部研究集録, 28, p.35-36.
- 伊澤雅子 (2022) 「奄美大島, 徳之島, 沖縄島北部及び西表島」-「島」の世界自然遺産の特徴, *ランドスケープ研究*, 86, p.96-99.
- Kamble, S. N., H. B. Dhamagaye, S. J. Meshram, B. R. Chavan and G. N. Kulkarni (2020) Toxic effect of fungicide paclobutrazol on immunological parameters of juveniles whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei*, *Journal of Experimental Zoology, India*, 23, p.895-901.
- Kang, C. K., G. J. Ryu and K. H. Lee (1992) Effects of plant growth retardants on the growth and characters related with lodging in rice, *Korean Journal of Weed Science*, 12, p.31-38 (in Korean with English Abstract).
- Kang, K. K., Y. W. Kwon and C. Y. Yoo (1985) Effect of applied GA3 and paclobutrazol, an inhibitor of GA biosynthesis, on the growth of internodes and panicle of the rice plants, *Korean Journal of Crop Science*, 30, p.471-480.
- 小菅孝一・木野田憲久 (1999) 水稻品種「つがるロマン」に対する倒伏軽減剤の利用基準, *東北農業研究* (52), p.33-34.
- Lee, E. W., Y. W. Kwon and C. H. Soh (1987) Lodging liability and response to paclobutrazol application of high eating quality japonica rice varieties, *Korean Journal of Crop Science*, 32, p.224-223 (in Korean with English Abstract).
- Lee, S. C. and S. K. Dedatta (1991) Effect of plant growth regulators on lodging in rice, *Korean Journal of Weed Science*, 11, p.87-99.
- Lee, S. S. (1988) Lodging related traits and yield of two rice varieties as affected by paclobutrazol at different N levels and split rates, *Korean Journal of Weed Science*, 8, p.64-70 (in Korean with English Abstract).
- Lee, S. S. and T. J. Kim (1988) Lodging related traits and yield of rice as affected by time of paclobutrazol application, *Korean Journal of Crop Science*, 33, p.336-342 (in Korean with English Abstract).
- Length, R. V. (2022) emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means, R Package Version 1.7.3, <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>.
- Li, C., L. Huang, Y. Zhang, X. Guo, N. Cao, C. Yao, L. Duan, X. Li and S. Pang (2022) Effects of triazole plant growth regulators on molting mechanism in Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*), *Fish & Shellfish Immunology*, 131, p.646-653.
- Liao, P., S. M. Bell, L. Chen, S. Huang, H. Wang, J. Miao, Y. Qi, Y. Sun, B. Liao, Y. Zeng, H. Wei, H. Gao, Q. Dai and H. Zhang (2023) Improving rice grain yield and reducing lodging risk simultaneously: A meta-analysis, *European Journal of Agronomy*, 143, p.126709.
- Mactal, A. G. and J. G. Canare Jr. (2016) Lodging resistance and yield performance of two traditional rice varieties applied with nitrogen and paclobutrazol, *Annals of Tropical Research*, 38, p.106-129.
- Magtalas, M. P., P. T. Vizmonte, Jr. and A. M. L. Agustin (2020) Promoting effects of paclobutrazol on the

- productivity of different rice (*Oryza sativa* L.) ecotypes under rainfed lowland condition, *Mindanao Journal of Science and Technology*, 18, p.157-173.
- Mangiafico, S.S. (2016) Summary and Analysis of Extension Program Evaluation in R, Version 1.19.10, <https://rcompanion.org/handbook/>.
- Matsumo, Y., K. Nakamura, T. Masumoto, H. Matsui, T. Kato and Y. Sato (2006) Prospects for multifunctionality of paddy rice cultivation in Japan and other countries in monsoon Asia, *Paddy and Water Environment*, 4, p.189-197.
- 水谷 晃・山本誉士・河野裕美 (2022) GPS ロガーを用いたカムリワシの生息域および利用環境の解明, 自然保護助成基金助成成果報告書, 31, p.40-47.
- Mukherjee, D. (2020) New approach to increasing rice (*Oryza sativa* L.) lodging resistance and biomass yield through the use of growth retardants, *Journal of Cereal Research*, 12, p.247-256.
- 成瀬 貫 (2016) 琉球列島の陸水無脊椎動物の特徴と最近の発見, *陸水学雑誌*, 77, p.203-209.
- Natuhara, Y. (2013) Ecosystem services by paddy fields as substitutes of natural wetlands in Japan, *Ecological Engineering*, 56, p.97-106.
- 日本作物学会九州支部会 (編) (2013) 作物調査基準, 日本作物学会九州支部, p.181.
- Oh, S. M., H. K. Lee and K. H. Lee (1984) Effect of paclobutrazol and flurprimido application on characteristics related with lodging of paddy rice plant, *Korean Journal of Weed Science*, 4, p.163-168 (in Korean with English Abstract).
- 岡慎一郎・笹井隆秀・花原 望・宮本 圭・小林大純・村田尚史・前田 健 (2021) 沖縄県におけるヒョウモンドジョウの遺伝的特性, *Fauna Ryukuana*, 59, p.57-61.
- 沖縄県環境部自然保護課 (編) (2017) 改訂・沖縄県の絶滅のおそれのある野生生物 第3版 (動物編) —レッドデータおきなわ—, 沖縄県環境部自然保護課, p.712.
- 沖縄県農業研究センター石垣支所・沖縄県八重山農林水産振興センター農業改良普及課 (編) (2017) 沖縄県水稲栽培指針 (八重山地域版), 沖縄県米穀種子協会, p.17.
- 沖縄県農林水産部 (2023) 農業関係統計, 沖縄県農林水産部, p.208.
- 沖縄県八重山農林水産振興センター (編) (2023) 令和4年度 八重山の農林水産業, 沖縄県八重山農林水産振興センター, p.69.
- Pyon, J. Y. and Y. K. Huh (1985) Effect of paclobutrazol on anti-lodging characteristics and yields of rice, *Research Reports of Agricultural Science and Technology, Chungnam National University*, 12, p.183-190 (in Korean with English Abstract).
- R Core Team (2020) R: A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing, <https://www.R-project.org/>.
- 佐藤 勉・林 恒夫・岩田忠寿 (1993) 画像解析を利用した水稲の生育診断技術 第2報 葉面積指数及び植被率を指標とした生育診断と制御技術, 福井県農業試験場報告, (30), p.19-26.
- 清水孝昭・鈴木寿之・高木基裕・大迫尚晴 (2011) 沖縄島と西表島より得られたドジョウの形態的・遺伝的特徴, *日本生物地理学会会報*, 66, p.141-154.
- 食品安全委員会 (2009) 農薬評価書 パクロプロトラゾール, 食品安全委員会, 34p.
- Silitonga, R. S. and J. Nasution (2019) Pengaruh kotoran ayam dan paclobutrazol terhadap jumlah anakan dan tinggi batang padi hitam (*Oryza sativa* L.) kabupaten tapanuli selatan, *J-PEN Borneo: Jurnal Ilmu Pertanian*, 2, p.36-40.
- Sinniah, U. R., S. Wahyuni, B. S. A. Syahputra and S. Gantait (2012) A potential retardant for lodging resistance in direct seeded rice (*Oryza sativa* L.), *Canadian Journal of Plant Science*, 92, p.13-18.
- Sitepu1, F. R., J. Ginting and N. Rahmawati (2019) Response of growth and production of rice (*Oryza sativa* L) to paclobutrazol application with JajarLegowo 4:1 planting system, The 3rd International Conference Community Research and Service Engagements, p.409-418.
- Street, J. E., J. H. Jordan, M. W. Ebelhar and D. L. Boykin (1986) Plant height and yield responses of rice to paclobutrazol, *Agronomy Journal*, 78, p.288-291.
- Syahputra, B. S. A., U. R. Sinniah, M. R. Ismail, M. K. Swamy (2016) Optimization of paclobutrazol concentration and application time for increased lodging resistance and yield in field-grown rice, *Philippine Agricultural Scientist*, 99, p.221-228.
- Syahputra, B. S. A., M. Siregar, R. R. A. Tarigan and N. J. B Ketaren (2018) Modification vegetative of plant height in paddy after PBZ application with rice-oil palm planting system, *Proceeding International Conference on Sustainable Agriculture and Natural Resources Management*, 2, 44-47.
- Takada, M., K. Tachihara, T. Kon, G. Yamamoto, K. Iguchi, M. Miya and M. Nishida (2010) Biogeography and evolution of the *Carassius auratus*-complex in East Asia, *BMC Evolutionary Biology*, 10, p.7. (<http://www.biomedcentral.com/1471-2148/10/7>).
- 高田未来美・立原一憲・西田 睦 (2010) 琉球列島におけるフナ分布と生息場所: 在来フナと移殖フナの比較, *魚類学雑誌*, 57, p.113-123.
- 竹内善信・安東郁男・根本 博・加藤 浩・平林秀介・太田久稔叫・石井卓郎・前田英郎・竹本陽子・井辺時雄・佐藤宏之・平山正賢・出田収 (2013) ミルキークイーンの出穂性を改変した水稲品種「ミルキーサ

- マー」の育成, 作物研報, 14, p.77-95.
- 上野 博 (1989) パクロブトラゾールの作用特性と植物矮化剤としての実用性, 植物の化学調節, 24, p.127-141.
- Ueta, M. and J. S. Minton (1996) Habitat preference of crested serpent eagles in southern Japan, *Journal of Raptor Research*, 30, p.99-100.
- Wahyuni, S., U. R. Sinniah, M. K. Yusop and R. Amarthalinga (2002) Effect of paclobutrazol and prohexadione calcium on growth, lodging resistance and yield of wet seeded rice, *Penelitian Pertanian Tanaman Pangan*, 21, p.24-30.
- Wang, W., C. Wu and B. K. Lonameo (2019) Toxic effects of paclobutrazol on developing organs at different exposure times in zebrafish, *Toxics*, 7, p.62 (<https://doi.org/10.3390/toxics7040062>).
- 鷺谷いずみ (2007) 氾濫原湿地の喪失と再生: 水田を湿地として活かす取り組み, 地球環境, 12, p.3-6.
- 渡辺 篤 (1968) 水田農業における藍藻類の窒素固定の利用, 科学と生物, 6, p.287-292.
- 渡部富男 (1993) 早期栽培地帯における水稻障害冷害に関する研究 第3報 倒伏軽減剤による危険期深水灌漑湛水深の低下, 日本作物学会紀事, 62, p.53-59.
- Wen, T. W., Wang, W. Yang, X. Du, Z. Wang, Y. Jia, X. Qian, N. Su, H. Shi and D. Gu (2020) Morphological characteristics and lodging resistance of rice stems and its response to exogenous plant growth regulators, *Journal of Southern Agriculture*, 51, p.48-55 (in Chinese with English Abstract).
- Xie, Z., J. Zhang, Q. Lin, F. Liu, C. Zhang, F. Zhuo, Z. Jiang and C. Zhuo (2019) Effect of plant growth regulators on rice lodging resistance and grain production of main-crop and ratooning rice, *Chinese Journal of Rice Science*, 33, p.158-166 (in Chinese with English Abstract).
- Xing, P., M. Duan, Y. Liu, Z. Mo, R. Lai and X. Tang (2022) Enhancement of yield, grain quality characters, 2-Acetyl-1-pyrroline content, and photosynthesis of fragrant rice cultivars by foliar application of paclobutrazol, *Journal of Plant Growth Regulation* (<https://doi.org/10.1007/s00344-022-10582-9>).
- Xu, F., P. Jiang, X. Zhou, M. Liu, L. Zhang, H. Xiong, Y. Zhu and X. Guo (2020) Effects of paclobutrazol on yield and lodging resistance with different dense-fertilizer population in mid-season hybrid rice, *Journal of Nuclear Agricultural Science*, 34, p.1088-1096 (in Chinese with English Abstract).
- 山城信哉・田部井大介・呉屋光一・田中洋貴・与那嶺要・大城和久・照屋寛由・大工政信・安東郁男・竹内善信 (2011) 沖縄県における奨励品種候補低アミロース米品種「ミルキーサマー」の特性について, 沖縄県農業研究センター研究報告, (5), p.2-26.
- Yekti, A. P. A., H. Hsu and W. Wang (2014) The effect of paclobutrazol on the development of zebrafish (*Danio rerio*) embryos, *Zebrafish*, 11, p.1-9.
- 吉田正人 (2022) 奄美大島・徳之島・沖縄島北部及び西表島の世界自然遺産登録の経緯とその課題, ランドスケープ研究, 86, p.92-95.
- 吉郷英範 (2018) 琉球列島産陸水魚類相および文献目録, *Fauna Ryukyuan*, 9, p.1-153.
- Zhang, A., X. Xie and W. Liu (2011) Enantioselective separation and phytotoxicity on rice seedlings of paclobutrazol, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59, p.4300-4305.
- Zeileis, A. and T. Hothorn (2002) Diagnostic checking in regression relationships, *R News*, 2(3), p.7-10.

Prevention of lodging in the low-amylose rice cultivar ‘Milky Summer,’ using paclobutrazol granules and the effects of nonuniform granule dispersion on growth, grain yield, and other traits

Suguru OHNO¹, Keita UCHIMINE² and Nagisa IREI²

¹Ishigaki Branch, Okinawa Prefectural Agricultural Research Center

²Agricultural Development Division, Yaeyama Agriculture, Forestry and Fisheries Promotion Center, Okinawa Prefectural Government

Abstract

‘Milky Summer,’ a low-amylose rice cultivar with desirable flavor, is mainly cultivated as the second crop in double-cropping systems on Iriomote Island in southwestern Japan and is expected to be marketed as a local specialty product. Although this cultivar may promote effective use of idle paddy fields, it has a disadvantage of high lodging susceptibility. A prior study reported that the plant growth regulator paclobutrazol shortens culm length in this cultivar and suggested its potential for lodging reduction. In the present study, we evaluated the effectiveness of paclobutrazol granules in reducing lodging of ‘Milky Summer’ in experimental and farmer-managed rice paddies on Ishigaki Island and Iriomote Island. Additionally, we collected data on the effects of uneven granule distribution on cultivar growth and yield, which is important for promoting practical application. We confirmed that paclobutrazol granule application significantly reduced culm length compared with untreated plots under both standard (6.4 Nkg/10a) and high (12.8 Nkg/10a) fertilization rates and further demonstrated that lodging rates were effectively lowered. Although the granules influenced several growth traits, including heading date and panicle length, they had no significant effects on grain maturity, yield, or rice flavor, indicating strong potential for lodging control in this cultivar. Plots with localized, topical granule application simulating uneven distribution showed no significant grain yield reduction but exhibited significantly shorter culms compared with uniformly treated plots. Thus, even if field-level grain production remains unchanged, the proportion of panicles not recovered during mechanical harvesting and threshing may increase owing to shortened culms, potentially reducing harvested yield. Therefore, uniform dispersion of this granule is recommended during application.

Key words: dual cropping, organoleptic evaluation, plant growth regulator, Ryukyus, Yaeyama region, yield component.

原著論文

ハーベスタで収穫した黒糖原料用サトウキビにおける貯蔵中の品質変化

前田剛希¹・広瀬直人^{2,3}・恩田聡¹

- 1 沖縄県農業研究センター名護支所 (〒905-0012 沖縄県名護市字名護 4605-3)
- 2 沖縄県農業研究センター (〒901-0336 沖縄県糸満市真壁 820)
- 3 現所属：九州大学農学研究院 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

要約

1. ハーベスタ収穫茎（以後 HV 収穫茎）を模して長さ 30 cm 程度に切りそろえたサトウキビのチョッピング茎を貯蔵後、搾汁して黒糖を製造し、貯蔵期間が黒糖の品質に与える影響を調査した。試験の結果、蔗汁の品質劣化に伴って黒糖製造工程における加熱濃縮と冷却攪拌に要する時間は長くなる傾向を示し、色調や質感など黒糖の品質も変化することが確認された。
2. サトウキビの HV 収穫茎について貯蔵試験を行った結果、曇天時でも HV 収穫茎は緩やかに品質劣化していることが推察された。晴天時に同様の貯蔵試験を行った結果、HV 収穫茎を積み上げた山の内部は外気温よりも低い温度で推移した一方、山の表面温度は外気温と同様に推移し、遮光せずに直射日光に曝された場合、積み上げ後 24 時間以内に HV 収穫茎の純糖率は有意に低下した。

キーワード：原料ヤード，遮光，気温

緒言

サトウキビ (*Saccharum spp. hybrid*) は、熱帯原産のイネ科サトウキビ属の植物であり、成熟した茎に多量のショ糖を蓄える (佐藤, 2006) ことから、世界各地で製糖原料として栽培されている。日本国内では沖縄県と鹿児島県の南西諸島地域で、サトウキビの生産が盛んであり、サトウキビを原料として黒糖 (サトウキビの搾汁を煮詰めて、糖以外の成分を含めたまま結晶化させた含蜜糖) と原料糖 (サトウキビの搾汁を煮詰めた後に遠心分離でショ糖結晶を回収した分蜜糖。粗糖とも呼ばれる白糖の原料) が製造されている。沖縄県では、8 つの離島で黒糖が工場生産されている。成熟してショ糖を蓄積したサトウキビの茎は、12 月から 4 月にかけて収穫されて、各島の黒糖工場へ黒糖原料として搬入される。

サトウキビの収穫法は斧や鎌で行う手刈り収穫とケーンハーベスタ (以後ハーベスタ) による機械収穫に大別される。沖縄県における近年のサトウキビ生産は、生産者の高齢化によって作業軽減・省力化を目的とした機械化推進が余儀なくされており、ハーベスタによる機械収穫の割合も年々増加している (沖縄県農林水産部, 2022)。ハーベスタには、サトウキビを刈り倒していくだけのパリカンタイプと刈り倒しと同時に収穫した茎を 30 cm 程度に切断していくチョッピングタイプの 2 種類がある (Ma *et al.*, 2014)。沖縄県で使用されているハーベスタは、

一部の離島を除いて、チョッピングタイプが主流である。ハーベスタは、畝に沿って前進しながら機械前面に取り付けられたリフターと呼ばれる装置でサトウキビを機械内部に引き込みながら、機械前面下部に設置されたベースカッターと呼ばれる円盤状の刃を回転させてサトウキビを地際から刈り取る。チョッピングタイプのハーベスタは、刈り取りと同時に機械内部にあるチョッパーで収穫した茎を 30 cm 程度に細断し、機械後部に取り付けた収穫袋に収納する (Ma *et al.*, 2014)。ハーベスタで収穫されたサトウキビ (以後 HV 収穫茎) は斧や鎌を使って人力で一本一本丁寧に刈り取られた手刈り収穫の全茎原料と比較して、切断面積が多いことに加えて茎の損傷も多く、品質劣化が早い (上野・泉, 1992, WOOD, 1976)。

黒糖工場に搬入された HV 収穫茎は、製糖設備が設置されている建屋に隣接したコンクリート敷きの原料ヤードに山積みされる。沖縄県は冬場でも 25°C 以上の夏日が多く、ほとんどの製糖工場の原料ヤードに屋根が設置されていないことから、保管中の HV 収穫茎は直射日光に晒されて急速に品質が悪くなると考えられている。黒糖工場は、全茎原料より優先して HV 収穫茎を製糖ラインへ投入しており、搬入後 24 時間以内に HV 収穫茎の投入が終了するように原料管理している。黒糖工場の場合、原料となるサトウキビ搾汁 (以後蔗汁) の純糖率 (サトウキビ搾汁中の可溶性固形分にしめるショ糖の割合) の変化を正確に把握しておくことが、黒糖の製造管理・品質

管理の面から重要である。蔗汁の純糖率が 85% 未満になると黒糖が固化しづらくなる（前田ら、2015、垣花ら、2015a）ことから、純糖率の低下は黒糖製造そのものに影響する。また、還元糖率（ショ糖に対する還元糖の割合）の増加も結晶化を阻害する要因の一つである（垣花ら、2015a）。

しかしながら、黒糖原料用サトウキビにおける保管中の純糖率や還元糖率の経時変化および品質劣化したサトウキビを原料とする黒糖の品質について、詳細な検討はされていない。

そこで本研究では、まず刈り置き時間の長期化が黒糖品質に与える影響を確認するために、HV 収穫茎を模して長さ 30cm 程度に切り揃えたサトウキビ（以後チョッピング茎）を一定期間貯蔵後、搾汁して黒糖を試作し、サトウキビの貯蔵期間が黒糖品質に与える影響を調査した。次いで、黒糖工場の原料ヤードおよび原料ヤードを模したコンクリート敷きの場所で積み上げたサトウキビの HV 収穫茎の貯蔵試験を行い、蔗汁品質の指標として純糖率などの経時変化を調査した。

材料および方法

チョッピング茎の貯蔵期間と黒糖品質の関係

1) 供試材料

2022 年 11 月 28 日に沖縄県農業研究センター石垣支所大俣圃場から、「NiF8」と「Ni27」（2020 年 9 月植え付け、2022 年 3 月収穫・株出し処理）をそれぞれ 150 茎ずつ収穫して供試した。

2) 貯蔵試験

収穫した蔗茎は、ただちに葉と梢頭部を取り除いて 10 茎ずつの 15 群に分け、苗調製用の押切で長さ 30 cm に切り揃えた（以後チョッピング茎）。チョッピング茎は、蔗茎 10 本分を網袋に詰めて、沖縄県農業研究センター石垣支所内にあるコンクリート敷きの大型機械倉庫の直射日光が当たらない場所に並べて静置し、チョッピング処理終了時点を貯蔵 0 時間として 96 時間貯蔵した。試験期間中の天候について、貯蔵 24 時間後までは快晴、貯蔵 48 時間後以降は曇天で気温も低下した。倉庫内の気温と湿度は、チョッピング茎を詰めた網袋周辺に温湿度記録用データロガー（おんどとり TR72A2, T&D）を置いて測定した。気温は平均 $25.1 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 、最低 20.9°C 、最高 31.1°C 、湿度は平均 $77.9 \pm 0.3\%RH$ 、最低 $61.0\%RH$ 、最高 $91.0\%RH$ であった。

3) 蔗汁分析

貯蔵 0, 24, 48, 72, 96 時間後に各品種 3 袋ずつ抜き取り、重量測定後、二軸式小型圧搾機 TM-340（株）マツオで搾汁した。搾汁は収穫当日から 24 時間間隔で行った。得られた蔗汁について、pH をコンパクト pH メーター（LAQUAtwin pH-11B, 株式会社堀場アドバンスドテクノ）で測定した。Brix と純糖率は、広瀬ら（2018）の方法に準じて蔗汁をメンブレンろ過後（GD/X25mmPVDF0.45, ワッ

トマン）、ポータブル屈折旋光計（RePo-1,（株）アタゴ）で測定した。各項目の分析は、網袋毎（ $n=3$ ）に行い、平均値を算出した。

4) 黒糖の製造と分析

分析した残りの蔗汁 3 袋分（黒糖製造 1～2 回分）をひとまとめにして水酸化カルシウムで pH を 7.5 に調整、煮沸後、室温 20°C の部屋で一晩静置し、上清を回収した。回収した上清を Brix50% になるまで加熱濃縮（以後シラップ）して、黒糖の試作に供した。黒糖は、広瀬ら（2019）の方法に準じて卓上型黒糖試験製造装置（西川計測）を用い、次のとおりに製造した。まず、シラップ 800g をステンレス製試料ポット（ $\Phi 160\text{mm} \times$ 深さ 220mm）に入れて加熱攪拌容器にセットして、加熱濃縮を開始した。加熱濃縮は、攪拌羽根でポット内のシラップを攪拌（回転速度 100rpm）しながら行い、シラップ液温が 130°C に到達した時点で終了した。加熱濃縮終了後、引き続きシラップを攪拌羽根で攪拌（回転速度 200rpm）しながら冷却した。冷却攪拌は、 100°C 前後まで低下したシラップ液温が結晶熱で再び上昇開始した時点で終了した。冷却攪拌終了後、直ちに濃縮したシラップをステンレス製バットに移して放冷し、固化させた。

製造した黒糖は、色調と切断面の様子を目視で確認後、次のとおりに分析した。水分は、乳鉢で粉碎した黒糖を 1.0～1.5g 量りとして加熱乾燥式水分計（MX50, エー・アンド・ディ）で測定した。水分計の測定条件は、加熱温度： 150°C 、加熱速度：標準、測定感度：Low とした。水分活性は、粉碎した黒糖 5.0g を量り取って電解質電気抵抗湿度センサ式水分活性計（LabSwift-aw, ケット科学研究所）で測定した。色調については、20% 黒糖水溶液を試料とし、分光測色計（CM-2600d, コニカミノルタ）を用いて L^* 値（明度：数値が大きいほど白方向、小さいほど黒方向を表す）と a^* 値（色度：数値が大きいほど赤方向、小さいほど緑方向を表す）、 b^* 値（色度：数値が大きいほど青方向、小さいほど黄方向を表す）および彩度（ C^* 値：数値が大きいほど鮮やかな色、小さいほどくすんだ色を表す）を測定した。

曇天時における原料ヤード保管中の HV 収穫茎の品質変化

1) 供試材料

搬入前日に収穫して一晩圃場で静置後、2020 年 1 月 29 日 11 時に宮古製糖多良間工場へ搬入された HV 収穫茎（品種：Ni27, 作型：株出し）を用いた。なお、調査前夜から続く降雨によって、搬入された HV 収穫茎は完全に濡れた状態だった。

2) 貯蔵試験

曇天で気温の低い日が続いた 2020 年 1 月 29 日から 31 日にかけて、宮古製糖多良間工場で実施した。日中の陽射しを遮るものが無いストックヤードの外側を非遮光区とし、日中の日差しが屋根で遮られているストックヤード内側を遮光区とした。まず、原料ヤードに搬入された約 7 トンの HV 収穫茎を 2 つに分け、非遮光区および遮

光区のそれぞれに山状に積み上げた（図 1）。約 5kg の HV 収穫茎を詰めた網袋を 27 袋用意して、3 袋は貯蔵 0 時間後の分析用試料とし、残りの網袋は各試験区 12 袋ずつを積み上げた HV 収穫茎の山の中心部に静置した。温度記録用データロガー（おんどとり TR52S, T&D）のケーブルセンサ先端を、積み上げた HV 収穫茎の山中心部に刺しこんで温度を記録した。積み上げた時点から貯蔵 0 時間後として、貯蔵 0 時間後の網袋 3 袋と各試験区の HV 収穫茎の山から貯蔵 6, 12, 24, 41 時間後に 3 袋ずつ抜き取った網袋から取り出した HV 収穫茎を、原料ヤード隣接の品質調査室に運んで製糖工場の品質管理法に準じてシュレッダー（CSS-NS-01-C, 日特機械化工業株式会社）で細裂後、油圧プレス（CSS-NP-01-H, 日特機械化工業株式会社）で圧搾した。得られた蔗汁は分析まで -20°C で保存した。

3) 蔗汁分析

蔗汁の pH はコンパクト pH メーター（LAQUAtwin B-712, 堀場製作所）で測定した。Brix と純糖率は、前述チョッピング茎の試験の 3) と同様にして測定した。各項目の分析は、網袋毎（n=3）に行い、平均値を算出した。

晴天時における原料ヤード保管中の HV 収穫茎の品質変化

1) 供試材料

2020 年 3 月 23 日に沖縄県農業研究センター（沖縄県糸満市）の圃場から小型ハーベスタ（MCH-15WEC, 松元機工株式会社）で収穫したサトウキビ（品種：NiF8, 作型：夏植え）を用いた。収穫後の HV 収穫茎曇天時の試験と同様に、収穫袋に入れた状態で圃場の傍に一晩静置後、貯蔵試験に用いた。

2) 貯蔵試験

貯蔵試験は、晴天で日中最高気温 25°C 以上の夏日が続いた 2020 年 3 月 24 日から 26 日にかけて、沖縄県農業研究センターで実施した。日中の陽射しを遮るものが無い堆肥置き場を非遮光区とし、建物の陰によって日中の日差しが遮られている大型機械倉庫北側を遮光区とした。HV 収穫茎を遮光区と非遮光区（いずれもコンクリート敷き）の 2 カ所に運び、山状に積み上げた（図 2）。一山の HV 収穫茎の量は 500 kg 容収穫袋 4 袋分（HV 収穫茎約 2 トン）とした。曇天時の原料ヤード保管試験と同様に、4 ~ 5kg の HV 収穫茎を詰めた網袋を 27 袋用意して、3 袋は貯蔵 0 時間後の分析用試料とした。各試験区それぞれ 6 袋を積み上げた HV 収穫茎の山の中心部に、さらに 6 袋を山の上部に並べて置いた。温度記録用データロガー（おんどとり TR52S, T&D）のケーブルセンサ先端を積み上げた HV 収穫茎の山中心部に刺しこんで山中心部の温度を、さらに山の上にも温度記録用データロガーを置いて、山表面の温度を記録した。貯蔵開始 0 時間後の網袋 3 袋と、貯蔵 24, 48 時間後に各試験区の山の内部と上部からそれぞれ抜き取った網袋 3 袋について HV 収穫茎を取り出して 2 軸圧搾機（沖縄機械開発）で搾汁した。得られた蔗汁は分析まで -20°C で保存した。

3) 蔗汁分析

得られた蔗汁について、前項 3) と同様にして pH, Brix と純糖率、還元糖率を測定した。

統計解析

図表中の値は平均値と標準誤差で示した。統計解析にはエクセル統計（株）社会情報サービス）を用い、貯蔵 0 日後を対照として Dunnet の多重比較検定で有意差を求めた。

結果および考察

チョッピング茎の貯蔵期間と黒糖品質の関係

図 1 に、チョッピング茎における収穫後の蔗汁品質の推移を示した。pH については、NiF8 と Ni27 いずれも収穫後貯蔵 48 時間まで低下し、以後、平衡に達する傾向を示した。蔗汁 Brix は、品種によらず収穫後貯蔵 96 時間でも差は認められなかった。一方、純糖率は、収穫後貯蔵 48 時間以降、低下する傾向を示した。NiF8 は Ni27 と比較して純糖率の低下が顕著であった。還元糖率は、貯蔵中にいずれの品種も増加し続けた。

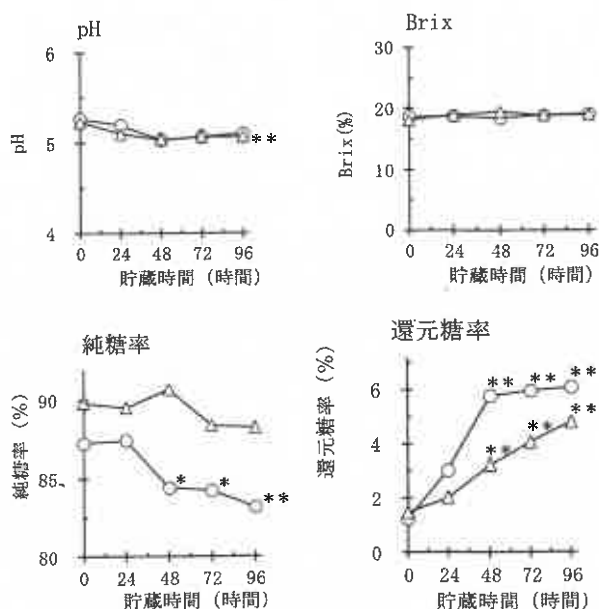


図 1 サトウキビチョッピング茎における収穫後の蔗汁品質の推移

○: NiF8, △Ni27

*: P<0.05, **: P<0.01, n=3(収穫後貯蔵 0 時間を対照とする Dunnet 法)

表 1 に収穫後貯蔵時間と黒糖製造時間の関係を示す。収穫後の貯蔵時間の異なる蔗汁を原料として黒糖を試作した結果、NiF8 と Ni27 いずれも、収穫後貯蔵時間に依存して 130°C に達するまでの加熱濃縮時間と結晶熱が確認されるまでの冷却攪拌時間が長くなる傾向を示した。

黒糖の製造工程において冷却攪拌は、加熱濃縮して過飽和に達した糖液を冷やしながら攪拌することで糖液中のショ糖を結晶化させる工程である(垣花ら, 2015b)。冷却攪拌時間が原料サトウキビの収穫後貯蔵時間に依存して長くなるのは、蔗汁に含まれる還元糖が貯蔵中に増加

しただけでなく、蔗汁 pH が貯蔵中に低下したことで加熱濃縮時のショ糖の熱分解が促進されて還元糖がさらに増加したために、ショ糖の結晶化が抑制されたことも原因の一つであることが示唆された。

製造した黒糖は、全て固化したものの、達観による色

表1 サトウキビ収穫後貯蔵時間と黒糖製造時間の関係

	収穫後の貯蔵時間(時間)	加熱濃縮時間 ¹⁾	結晶熱発生までの冷却攪拌時間 ²⁾	試作時間 ³⁾
NiF8	0	60分00秒	5分46秒	65分46秒
	24	64分18秒	5分46秒	70分04秒
	48	91分18秒	5分29秒	96分47秒
	72	84分57秒	7分48秒	92分45秒
	96	84分33秒	6分19秒	90分52秒
Ni27	0	81分01秒	4分03秒	85分04秒
	24	89分28秒	4分03秒	93分31秒
	48	84分41秒	3分51秒	88分32秒
	72	87分09秒	4分03秒	91分12秒
	96	95分25秒	5分47秒	101分12秒

- 1) 加熱濃縮時間：加熱開始後、シロップ温度が130°Cに達するまで
- 2) 結晶熱発生までの冷却攪拌時間：シロップ温度が130°Cに達して確までの時間。から結晶熱の発生までの時間。
- 3) 試作時間：加熱開始後、結晶熱の発生が確認されるまでの時間。
- 4) 試作回数は各1回。

調および表面と割った時の断面の質感などが収穫後貯蔵時間に依存して変化した(図2)。収穫後貯蔵24時間を超えるといずれの品種も黄色の色調が強くなり、表面や断面の結晶によるざらざらした感じは弱くなることが観察された。製造した黒糖の水分は NiF8 で 4.70 ~ 7.50%、Ni27 で 4.15 ~ 6.65%、水分活性は NiF8 で 0.583 ~ 0.644AW、Ni27 で 0.648 ~ 0.709AW の範囲にあり、一定の傾向は認められなかった。色調の分析結果について、NiF8 では一定の傾向が認められなかったが、Ni27 については、明度を示す L* 値と黄方向の色度を示す b* 値に収穫後貯蔵日数に依存して増加する傾向が見られており、

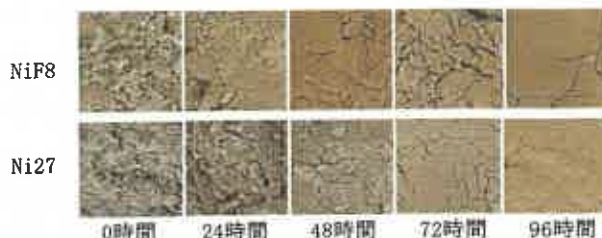


図2 収穫後0時間~96時間貯蔵したサトウキビを原料として試作した黒糖の表面の様子

達観による色調変化と同様の傾向が認められた(表2)。

表2 収穫後の貯蔵時間の異なるサトウキビから試作した黒糖の品質

収穫後の貯蔵時間(時間)	黒糖の品質						
	水分(%)	水分活性(AW)	C*値(彩度)	L*値	a*値	b*値	
NiF8	0	4.70	0.606	10.3	27.6	8.5	5.7
	24	5.33	0.632	13.1	29.0	10.4	8.0
	48	5.53	0.583	6.8	25.5	6.2	2.7
	72	5.67	0.603	9.7	27.2	8.5	4.7
	96	7.50	0.644	10.5	27.5	9.0	5.4
Ni27	0	6.65	0.709	12.9	29.7	9.4	8.9
	24	4.15	0.648	17.5	32.5	11.3	13.3
	48	4.89	0.691	15.5	31.1	10.7	11.2
	72	6.21	0.684	22.3	35.5	12.8	18.2
	96	6.15	0.674	22.2	35.4	12.8	18.0

注) Ni27の収穫後48,72,96時間は試作2回の平均値。その他は試作1回の値。

曇天時における原料ヤード保管中の HV 収穫茎の品質変化

1) 積み上げた HV 収穫茎の山の内部温度の推移

曇天時の原料ヤードにおける気温および HV 収穫茎を積み上げた山 (図 3) の内部温度の推移を図 4-a, b に示す。HV 収穫茎を積み上げた山の内部温度について、いずれの区も外気温より低い値を示したが、非遮光区と比較して遮光区は内部温度が低い傾向を示し、最大で約 4°C 低い値を示した。

2) 積み上げた HV 収穫茎の蔗汁品質



図 3 HV 収穫茎を積み上げた状況 (曇天時)
写真の手前 (屋根付きストックヤードの外) と
奥 (屋根付きストックヤード内) に HV 収穫茎を積み上げた。

積み上げた HV 収穫茎の蔗汁分析結果を図 5 に示す。曇天が続いた期間に原料ヤードに保管された HV 収穫茎について、腐敗や異臭は確認できなかったが、貯蔵 43 時間後の遮光区の pH で貯蔵 0 時間後と比較して有意な低下が認められた。Brix の増減は認められなかった。純糖率については、貯蔵 0 時間後と比較して遮光区の貯蔵 24 時間後、非遮光区の貯蔵 43 時間後でそれぞれ有意な低値を示し、貯蔵 0 時間後と比較して約 2% 減少した。一方、還元糖率は増加傾向を示した。収穫後のサトウキビは、乳酸菌など微生物の繁殖に伴い蔗汁 pH が減少するだけでなく、サトウキビ自身の呼吸作用によりショ糖が加水分解されて還元糖が増加するため、可溶性固形分に占めるショ糖の割合を示す純糖率も低下する (Misra *et al.*, 2022, 渡邊, 2017)。本研究の結果では、曇天時においても HV 収穫茎は緩やかに劣化している可能性が示唆された。遮光の有無による劣化程度の差異は確認できなかった。

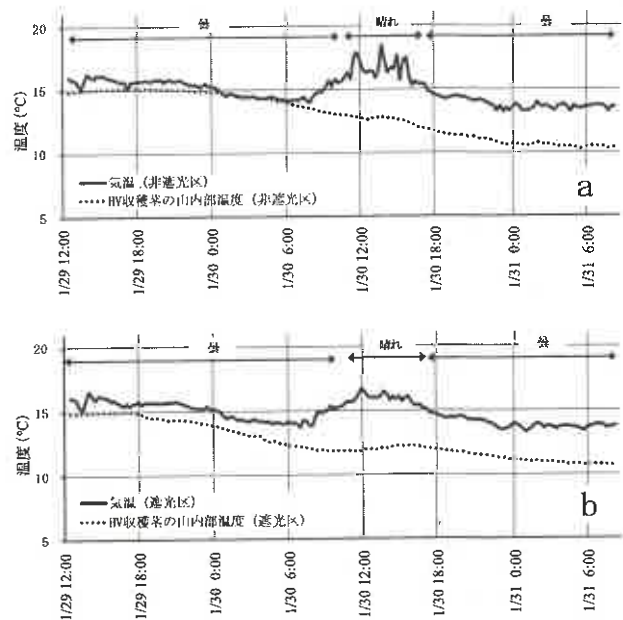


図 4 曇天時の原料ヤードにおける気温および HV 収穫茎を積み上げた山の内部温度の推移
a: 非遮光区, b: 遮光区

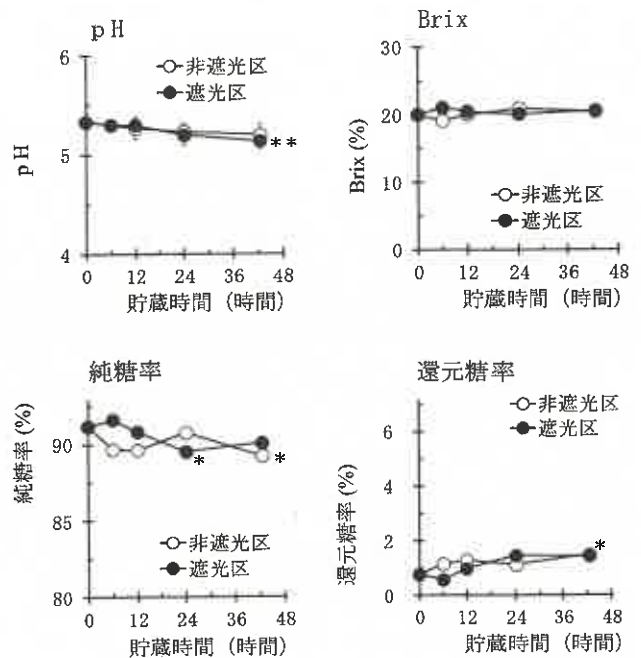


図 5 曇天時に積み上げた HV 収穫茎由来の蔗汁品質の推移
○: 非遮光区 (山内部), ●: 遮光区 (山内部).
*: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$, $n=3$ (貯蔵後 0 時間を対照とする Dunnet 法)

晴天時における原料ヤード保管中の HV 収穫茎の品質変化

1) 積み上げた HV 収穫茎の山の内部温度の推移

晴天時に積み上げた HV 収穫茎の山 (図 6) の内部および山の表面の温度と気温の推移を図 7 に示す。HV 収穫茎の山の表面温度は、いずれの試験区も外気温と同様に夜間と比較して日中が高くなった。直射日光に曝された非遮光区について、日中は HV 収穫茎の山表面温度が外気温よりも高い温度を示す一方、山内部温度は収穫直後からほぼ一定しており、日中の気温が 25°C を超えても 20°C 前後で推移した。遮光区について、山表面温度は外気温とほぼ同等の値で推移し、山内部温度は非遮光区と同様に日中でも外気温より低い値で推移した。



図6 HV収穫茎を積み上げた状況(晴天時)
沖縄県農業研究センター作物班堆肥場(写真左)と沖縄県農業研究センター作物班大型機械倉庫北側(写真右)をそれぞれ黒糖工場の原料ヤードと屋根付きストックヤードに見立てて、HV収穫茎を積み上げた。

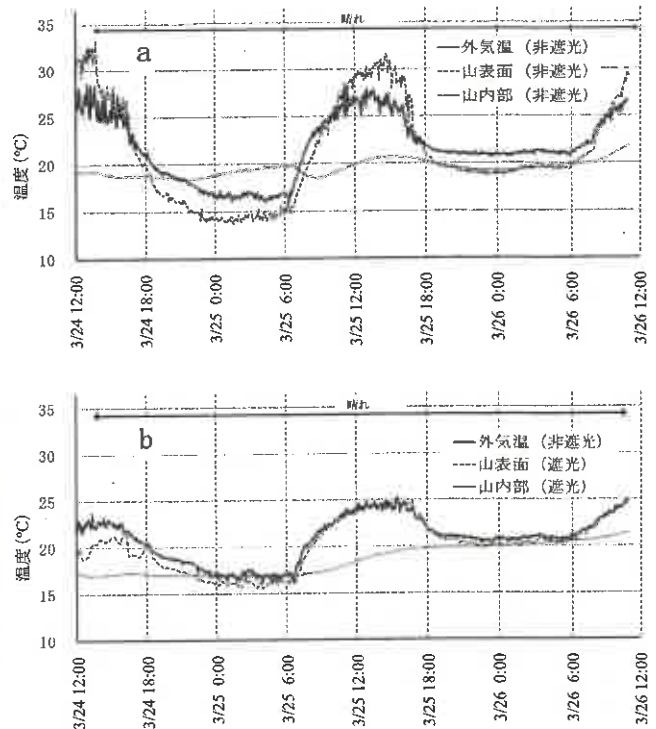


図7 晴天時のサトウキビ保管場所における気温およびHV収穫茎を積み上げた山の表面・内部温度の推移
a: 非遮光区, b: 遮光区

2) 積み上げた HV 収穫茎の蔗汁品質

晴天時に積み上げた HV 収穫茎の蔗汁分析結果を図 8 に示す。調査期間中は晴天が続いたが、保管された HV 収穫茎に腐敗や異臭は確認できなかった。貯蔵 48 時間後の非遮光区の山内部に pH の有意な低下が認められた。Brix の増減は認められなかった。純糖率は、貯蔵 0 時間後と比較して非遮光区の山表面の貯蔵 24, 48 時間後と非遮光区の山表面の貯蔵 48 時間後で、それぞれ有意に低下した。

本研究において、蔗汁の品質劣化に伴って黒糖の品質も変化することが確認された。チョッピング茎を用いた試験の結果、NiF8 は、Ni27 と比較して蔗汁品質の劣化が速く、収穫後貯蔵 48 時間を過ぎると純糖率や還元糖率の顕著な上昇が認められた。一方、全茎での品質劣化性について、Ni27 は NiF8 と比較して品質劣化が速い、という報告(寺内ら, 2014)もある。本研究の結果は調苗機(押切)で 30 cm に切断したチョッピング茎を用いた試験結果であり、寺内らの報告と直接比較することはできないが、今後は品質劣化性の品種間差について詳細に調査する必要があると考えられる。また、実際の HV 収穫茎は茎の損傷程度が激しいことから、蔗茎と黒糖への影響はチョッピング茎より大きいと予想されるが、本研究の結果では、チョッピング茎で行ったモデル試験の方が、晴天下で HV 収穫茎を用いて行った試験と比較して純糖率の低下や還元糖の増加が顕著であった。チョッピング茎の試験に用いたサトウキビは 11 月下旬、HV 収穫茎の試

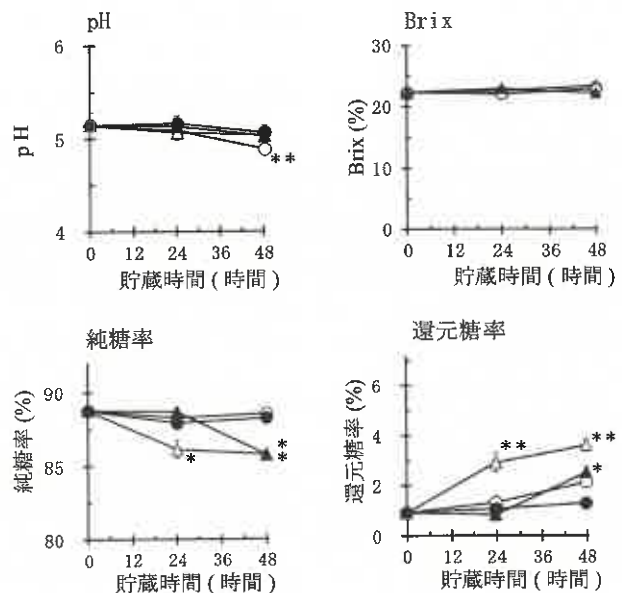


図8 晴天時に積み上げた HV 収穫茎由来の蔗汁品質の推移
○: 非遮光区(山内部), △: 非遮光区(山表面), ●: 遮光区(山内部), ▲: 遮光区(山表面).
*: P<0.05, **: P<0.01, n=3(貯蔵後0時間を対照とするDunnett法)

験に用いたサトウキビは3月下旬にそれぞれ収穫しており、収穫時期の違いが両試験の結果に反映した可能性もあり、サトウキビにおける収穫後の品質劣化と成熟度の関係については今後の課題である。

生産現場では、HV 収穫茎を積み上げた山の内部は発酵熱で温度が上がり、HV 収穫茎の劣化が促進されると考えられているが、本研究の試験結果では、直射日光が遮られる HV 収穫茎を積み上げた山の内部は外気温よりも常に低い温度で推移していた。積み上げた山の内部の HV 収穫茎は、積み上げ後 24 時間経過しても黒糖原料として十分な値の蔗汁純糖率を維持していることも明らかになった。一方、直射日光に曝される山の表面温度は外気温と同様に推移し、山の表面部分の HV 収穫茎の蔗汁純糖率は、積み上げ後 24 時間以内に有意な低下を示すことが明らかになった。以上の結果は、サトウキビ HV 収穫茎の品質劣化は直射日光を遮ることで遅らせる可能性があることを示しており、黒糖工場の原料ヤードにおいて屋根の必要性が高いことを示唆した。

謝 辞

本研究は、沖縄黒糖安定供給支援事業（令和元年～3年度、沖縄県黒砂糖協同組合）において実施した。本研究の遂行にあたり、多大なご支援、ご協力を賜りました沖縄県黒砂糖協同組合と株式会社宮古製糖多良間工場の皆様に心より感謝いたします。黒糖試作や分析・調査でご協力いただいた沖縄県農業研究センター作物班および農業システム開発班、沖縄県農業研究センター石垣支所の皆様には心より感謝いたします。

引用文献

- 上野正美, 泉裕巳 (1992) 機械化による新たな生産システムの構築とその課題. 沖縄甘蔗糖年報 (日本分蜜糖工業会), 第 27 号, pp.39 ~ 42.
- 沖縄県農林水産部 (2022) 令和 3/4 年産さとうきび及び甘しゅ糖生産実績. p.77.
- 佐藤寿和 (2006) 2. 砂糖の生産 2.1 甘蔗, 砂糖の科学. (橋本仁, 高田明和編, 朝倉書店, 東京), 12 ~ 16.
- 垣花郁夫, 宮城英文, 前盛勝市, 伊禮信, 比屋根真一 (2015a) 13. さとうきび原料の品質. 沖縄黒糖製造ハンドブック (沖縄県黒砂糖協同組合, 那覇) 111 ~ 112.
- 垣花郁夫, 宮城英文, 前盛勝市, 伊禮信, 比屋根真一 (2015b) 16. 沖縄黒糖製造工程別解説. 沖縄黒糖製造ハンドブック (沖縄県黒砂糖協同組合, 那覇) 294.
- 寺内方克, 松岡誠, 寺島義文, 境垣内岳雄, 杉本明, 伊禮信, 氏原邦博, 下田聡, 平良正彦, 前田剛希, 下地格, 宮城克浩 (2014) サトウキビ多収品種「Ni27」の育成とその特性. 九州沖縄農業研究センター報告, 62, 11 ~ 24.
- 広瀬直人, 小野裕嗣, 前田剛希, 和田浩二 (2018) ポータ

- ブル屈折旋光計による純糖率測定に適したサトウキビ搾汁液の簡易澄清化法の検討. 南方資源利用技術研究会誌 33 (1) : 43 ~ 49.
- 広瀬直人, 小野裕嗣, 前田剛希, 和田浩二 (2019) 卓上型黒糖試験製造装置の開発と冷却攪拌工程中の品温上昇日本食品科学工学会誌 66 (1), 27 ~ 31.
- 前田剛希, 下地格, 手登根正, 下地浩之, 上地克美, 伊志嶺弘勝, 砂川正幸, 知念潤, 出花幸之介, 宮城克浩, 荻貴之 (2015) 黒糖の周年製造に向けたサトウキビ収穫時期と蔗汁品質からみた黒糖固化条件の検討. 沖縄県農業研究センター研究報告, 9, 26 ~ 33.
- 渡邊健太 (2017) さとうきびの品質劣化に関する報告. 砂糖類・でん粉情報, 47 ~ 55.
- Ma S., Karkee M., Scharf P. A., Zhang Q (2014) Sugarcane Harvester Technology: A Critical Overview, *Applied Engineering in Agriculture*. 30 (5), 727 ~ 739.
- Misra V., Mall AK., Solomon S., Ansari M. I. (2022) Post-harvest biology and recent advances of storage technologies in sugarcane. *Biotechnology Reports*, 33, <https://doi.org/10.1016/j.btre.2022.e00705>.
- WOOD R.A. (1976) Cane deterioration as affected by billet size, delay in milling and other factors. *Proc. S. Afr. Sug. Technol. Ass.*, 12 ~ 17.

Changes in Cane Juice Quality when Cane Stalks Harvested using a Cane Harvester is Piled

MAEDA Goki¹, HIROSE Naoto^{2,3}, ONDA Satoshi¹

1 Okinawa Prefectural Agricultural Research Center Nago Branch, 4605-3, Aza Nago, Nago city, Okinawa, 905-0012

2 Okinawa Prefectural Agricultural Research Center, 820 Makabe, Itoman city, Okinawa, 901-0336

3 present address : Faculty of Agriculture, Graduate School of Kyushu University,
744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka city, Fukuoka, 819-0395

Abstract

1. Brown sugar was produced from sugarcane cut into approximately 30-cm lengths and stored, and the effect of sugarcane storage duration on brown sugar quality was examined. Results showed that brown sugar production time increased as cane juice quality declined, with brown sugar attributes, including color and texture, also varying.
2. Sugarcane storage tests indicated that the quality of harvested (HV) stalks from the harvester deteriorated gradually even under cloudy conditions. Similar experiments conducted under sunny conditions revealed that the temperature inside the HV stalk pile remained lower than the ambient temperature, whereas the pile surface temperature was comparable to the ambient temperature. Additionally, the net sugar content of HV stalks decreased rapidly within 24 h after piling when exposed to direct sunlight without shading.

Key words:cane yards, shading

学位論文

沖縄県の施設マンゴー栽培における炭疽病の発生生態
および防除に関する研究

澤岬 哲也

沖縄県農業研究センター名護支所

要約

本研究は、沖縄県における施設栽培マンゴーの炭疽病に関する発生生態と防除技術に関する総合的な調査と考察を行ったものである。本病は沖縄産マンゴーの品質低下や経済的損失の主要因であり、特に市場出荷後の果実における被害が顕著である。そこで、本病の病原菌である *Colletotrichum gloeosporioides* および *C. acutatum* の潜在感染時期、有効薬剤の体系散布技術の確立、病原性検定法の開発、抵抗性品種の選抜並びに沖縄産マンゴー炭疽病菌の種構成と特性について調査を行った。

まず、東京市場に出荷された果実における炭疽病の発病推移を調査した結果、出荷後の果実熟度の進行に伴い発病が増加することが確認された。特に包装形態の違いによる高湿度と結露が発病を促進する要因になることが示唆された。また圃場での病原菌の潜在感染が発病の主要因であり、完熟果では未熟果の果皮に含まれるレゾルシノールが減少することで抗菌性が低下し、発病が増加すると推察された。さらに、本県全域の罹病果実から分離された炭疽病菌のうち、88.6%が *C. gloeosporioides*, 11.4%が *C. acutatum* (何れも種複合体構成種) であり、前者が優占種であることが確認された。

次に、施設における炭疽病菌の潜在感染時期の特定を試みたところ、マンゴーの頂芽、花芽、花序および幼果の健全部位で病原菌の潜在感染が成立していることが明らかになった。特に5月の梅雨期に潜在感染率が最も高まることから、防除対策は出蕾前の前年12月から予防的に行うことが重要と考えられた。またエタノール浸漬簡易検定法が本菌の検出に有効であることが示され、マンゴー生産現場での発生予察や無病苗検定に適用できることを明らかにした。

薬剤感受性試験では、キャプタン水和剤、マンゼブ水和剤、アゾキシストロピンフロアブルおよびクレンキシムメチルドライフロアブルの4薬剤に対して炭疽病菌が高い感受性を示し、これら薬剤を用いた出蕾前から袋かけ前までの体系散布 (ver. 1) による防除効果を検証した結果、炭疽病の発病果率を76~96%抑制することが可能であった。さらに軸腐病との同時防除とQoI剤耐性菌の発生を考慮した体系散布 (ver. 2) を開発し、炭疽病と軸腐病の両重要病害に対して高い防除効果を示すことを明らかにした。また本病の抵抗性品種を選抜するために未硬化薬を用いた簡易病原性検定法の開発を行ったところ、病原菌に対するマンゴー品種 (遺伝資源) の感受性検定が可能となった。特に「ゴールデンナゲット」が強い抵抗性を有することが明らかとなり、今後の育種素材として有望であることが判明した。

最後に、沖縄産マンゴー炭疽病菌の種構成を解明するために分子系統解析を行った結果、*C. gloeosporioides* 種複合体9種、*C. acutatum* 種複合体4種の計13種で構成されることが確認された。本県では *C. fructicola* が優占種であるが、その病原性は比較的弱いことが示された。またこれら菌種間で病原性や登録薬剤の感受性に差異が認められたことから、防除戦略を立てる上で重要な情報となることが考えられた。

キーワード：病原性, *Colletotrichum*, ゴールデンナゲット, 簡易病原性検定, 潜在感染, 種複合体, 薬剤体系散布

学位授与大学名：鹿児島大学大学院連合農学研究科

オープンアクセス：鹿児島大学リポジトリ

<https://jr.kagoshima-u.ac.jp/records/2001798>

Studies on the ecology and control of mango anthracnose in greenhouse cultivation in Okinawa Prefecture

Tetsuya Takushi

Okinawa Prefectural Agricultural Research Center Nago Branch

Abstract

This study investigated the ecology and control of anthracnose in mangoes grown in rain-out shelters in Okinawa Prefecture. Anthracnose causes significant quality degradation and economic losses in mangoes cultivated in Okinawa, particularly after shipment to market. To address this issue, we investigated the latent infection period of the causal pathogens (*Colletotrichum gloeosporioides* and *C. acutatum*), established systematic application methods for effective fungicides, developed an assay to evaluate pathogenicity, selected disease-resistant varieties, and clarified the species composition and characteristics of isolates associated with mango anthracnose in Okinawa Prefecture.

First, we investigated the development of anthracnose in fruit shipped to Tokyo. Disease incidence increased as fruit ripened during shipment. In particular, high humidity and condensation due to differences in packaging conditions were considered to promote disease development. The disease appears to result from latent field infection, with post-harvest symptoms linked to decreased content resorcinol in the skin of unripe fruit. Furthermore, the most prevalent anthracnose fungus isolated from diseased fruit in Okinawa belonged to the *C. gloeosporioides* (88.6%), followed by the *C. acutatum* (11.4%).

Next, we attempted to determine the timing of latent anthracnose infection in rain-out shelters. Latent infection was already established in healthy-looking areas of apical buds, flower buds, inflorescences, and fruitlets. The finding that latent infection rates peak during the rainy season in May suggests that it is important to implement preventative measures from December of the previous year, before apical bud emergence. In addition, we demonstrated the efficacy of a simple diagnostic method using ethanol immersion treatment for detecting anthracnose fungi and showed that the method can be used for disease occurrence forecasting and disease-free seedling diagnosis in mango production sites.

The anthracnose fungi we isolated exhibited high sensitivity to four fungicides: captan wettable powder, mancozeb wettable powder, azoxystrobin flowable, and kresoxim-methyl dry flowable. Systematic application of these fungicides from before apical bud emergence to just before bagging (ver. 1) effectively controlled the disease, with suppression of anthracnose in fruit ranging from 76% to 96%. We developed a second fungicide regime (ver. 2) for simultaneously controlling stem-end rot of mango and QoI-resistant strains. This second regime was also highly effective against both anthracnose and stem-end rot, two important diseases. Furthermore, we developed a simple method for testing virulence using uncured leaves to select disease-resistant varieties, enabling assessment of the susceptibility of mango varieties (genetic resources) to the pathogen. 'Golden Nugget' was found to be particularly resistant to the disease and shows promise as future breeding material.

Finally, we conducted multi-gene phylogenetic analysis to elucidate the species composition of isolates associated with mango anthracnose in Okinawa Prefecture. A total of 13 species were identified, including nine species belonging to the *C. gloeosporioides* species complex and four species belonging to the *C. acutatum* species complex. Although *C. fructicola* is the dominant species in Okinawa, it exhibited relatively weak pathogenicity. Observed interspecies differences in pathogenicity and sensitivity to registered fungicides indicate that such information considered important for the development of control strategies.

Keywords: *Colletotrichum*, Golden Nugget, latent infection, pathogenicity, simple method for testing virulence, species complex, systematic application of fungicides

Name of doctoral degree granting university : The United Graduate School of Agricultural Sciences Kagoshima University

Open Access: Kagoshima University Repository

<https://ir.kagoshima-u.ac.jp/records/2001798>

Field survey of Fusarium stem rot of lisianthus (*Eustoma grandiflorum*) cultivated in Okinawa, Japan

Takashi Hanagasaki, Atsushi Ajitomi, Emi Miwa, Tomohiko Kiyuna

Lisianthus (*Eustoma grandiflorum*) has become a major flowering plant in Okinawa, the southernmost prefecture of Japan. Its cultivation area has increased steadily with each passing year for two decades. Simultaneously, many types of lisianthus diseases related to damping-off symptoms have also increased dramatically. To create a strategy for preventing the disease, disease symptoms and pathogenic organisms of primary problematic disease with seasonal variation in the emergence were investigated. The symptoms were diagnosed as Fusarium stem rot (Kukigusare-byo) and the pathogen of the disease was identified as *Fusarium avenaceum* based on multigene sequences analyses. Indeed, the PCR result of the isolated strain in this study was the same as that isolated from lisianthus plants with Fusarium stem rot in Hokkaido Prefecture. Furthermore, the pathogen is clustered separately from the other *F. avenaceum* strains isolated from lisianthus in the USA. Diseased lisianthus plants spread throughout greenhouses even though several fungicides were applied. Additionally, they appeared from November to January and increased to 0.3% of the total number. Fusarium stem rot was found in 43.8% of the total number of farms from 2020–2021 in Okinawa Main Island.

出典：Journal of Plant Protection Research 63(2) (2023)

Maximizing marketable yield of green asparagus (*Asparagus officinalis* L.) cultivated in Miyako Island, Okinawa, Japan: Strategies for a typhoon-prone subtropical region

T. Hanagasaki, H. Nakasone

Introduction - The cultivation area for green asparagus has been increasing in Miyako Island, Okinawa, the southernmost part of Japan. In a tropical region, green asparagus exhibits year-round growth without dormancy with an economic cultivation period of two or three years. However, it is essential to cut off all mother stalks of green asparagus whenever typhoons occur on the island, which is about four times a year. *Objective and method* - The marketable yield of green asparagus was investigated based on the number of times all mother stalks were cut off in a year (three or four times). The yield, grade and marketable yield of green asparagus spears each year were investigated in a greenhouse where asparagus had been cultivated for 6 y (2017-2022) on Miyako Island. *Results and discussion* - The total marketable yield achieved by cutting off mother stalks three times a year was significantly higher compared to four times. Additionally, the rank and grade of green asparagus spears declined progressively each year over 6 y. The marketable yield also declined over several years because green asparagus does not experience dormancy and all its mother stalks are cut off during each typhoon occurrence in subtropical climates. *Conclusion* - The marketable yield of green asparagus increases when typhoons are delayed and occur fewer times. Moreover, green asparagus spears declined in rank and grade with each passing year, while their marketable yield decreased over several years.

出典：Fruits 78(4) (2023)

**Investigation of Fusarium root rot of lisianthus (*Eustoma grandiflorum*)
in Okinawa, Japan, caused by *Fusarium nirenbergiae***

T. Hanagasaki, A. Ajitomi, E. Miwa, T. Kiyuna

Introduction - Lisianthus (*Eustoma grandiflorum*) has become one of the major flowering plants in Okinawa, the southernmost prefecture of Japan. Simultaneously, many types of lisianthus diseases related to damping-off symptoms also increased dramatically. *Objective and method* - To create a strategy for preventing the disease, disease symptoms and pathogenic organisms of primary problematic disease with seasonal variation in the emergence were investigated. *Results and discussion* - The symptoms were diagnosed as Fusarium root rot (Tachigare-byo) and the pathogens were identified as *Fusarium nirenbergiae* based on multigene sequences analyses. Indeed, our isolates, R2-28 and R2-29, are clustered separately from the other *F. oxysporum* strains isolated from lisianthus in Italy but R2-29 and the other *F. nirenbergiae* strain (MAFF 712464) isolated in Japan formed a monophyletic lineage. The diseased plants spread over the greenhouse from November to March. Furthermore, they increased to 2.3% of the total number in the case that no fungicide was sprayed, but there was almost no diseased lisianthus plant in the case that reductive disinfection of soil was conducted using ethanol, and fungicides were sprayed periodically after planting. Furthermore, the ratio of farms where Fusarium root rot occurred against the total number of farms was 56.3% in Okinawa Main Island. *Conclusion* - The pathogens of Fusarium root rot were identified as *Fusarium nirenbergiae* based on multigene sequences analyses. Reductive disinfestation of soil and spraying fungicides periodically within every two weeks was effective in preventing diseases, such as Fusarium root rot but not doing them in another greenhouse caused several Fusarium root rot.

出典 : Fruits 78(4) (2023)

沖縄県農業研究センター研究報告
第19号

編集・発行

沖縄県農業研究センター

〒901-0336 沖縄県糸満市真壁 820 番地

電話 098-840-8500 (代表) Fax098-840-8510

ホームページ : [https://www.pref.okinawa.lg.jp/shigoto/kenkyu/
1010703/1018784/1010711.html](https://www.pref.okinawa.lg.jp/shigoto/kenkyu/1010703/1018784/1010711.html)

代表 E-mail : xx049400@pref.okinawa.lg.jp

印刷

印刷センターテル

〒901-0211 沖縄県豊見城市字饒波 500-1

電話 098-856-5512 Fax098-856-4330

**BULLETIN OF THE OKINAWA PREFECTURAL AGRICULTURAL
RESEARCH CENTER**

..... Number19 March, 2026

Contents

Original paper

- 01-04 Atsushi OOSHIRO¹, Taishi ARASAKI², Satoshi ONDA³, Atsushi AJITOMI¹,
Tetsuya TAKUSHI³, Takayuki SUZUKI⁴:**
Temperature conditions for planting seed tubers to mitigate diseased tubers
caused by bacterial wilt in potatoes in Okinawa Prefecture, Japan
- 05-10 Atsushi OOSHIRO¹, Keisuke KIJIMA¹, Tomoko GANAHA-KIKUMURA¹:**
Oxalis corymbosa DC acts as a weed reservoir for tomato yellow leaf
curl virus
- 11-28 Suguru OHNO¹, Keita UCHIMINE² and Nagisa IREI²:**
Prevention of lodging in the low-amylose rice cultivar 'Milky Summer,'
using paclobutrazol granules and the effects of nonuniform granule
dispersion on growth, grain yield, and other traits
- 29-36 Goki MAEDA¹, Naoto HIROSE^{2,3} and Satoshi ONDA¹:**
Changes in Cane Juice Quality when Cane Stalks Harvested using
a Cane Harvester is Piled

Thesis Paper

- 37-38 Tetsuya TAKUSHI:** Studies on the ecology and control of mango anthracnose
in greenhouse cultivation in Okinawa Prefecture