

滋賀県農業技術振興センター

研 究 報 告

第 59 号
令和 8 年（2026 年）3 月

目 次

報 文

水管理と含鉄資材を活用した「コシヒカリ」の玄米中無機ヒ素濃度の低減 1
楠田理恵・武久邦彦・野雄大・猪田有美・河村紀衣・蓮川博之

葉面濡れセンサー等を用いたチャ炭疽病の発生予測の検討 17
松本敏幸

滋賀県の秋植タマネギでのネギアザミウマ防除による内部りん片の細菌性腐敗病害の
発病抑制 22
北野大輔・増田倫士郎・近藤 篤・小久保信義・小幡善也

タマネギ直播栽培におけるシアナジン水和剤の春期土壌処理の除草効果および葉害の
評価 31
井田陽介・松田真一郎

滋賀県農業技術振興センター
(滋賀県近江八幡市安土町)

水管理と含鉄資材を活用した「コシヒカリ」の玄米中無機ヒ素濃度の低減

楠田理恵*1・武久邦彦・野雄大・猪田有美*2・河村紀衣*3・蓮川博之

Reduction of brown rice (*Oryza sativa* L. cv. Koshihikari) inorganic arsenic concentration by water-saving management and iron amendments

Rie KUSUDA, Kunihiko TAKEHISA, Takehiro NO, Yumi INODA*, Kie KAWAMURA, Hiroyuki HASUKAWA

キーワード：玄米中カドミウム濃度, 酸化的水管理, ゼロ価鉄, トレードオフ

水稲の出穂前後各3週間における酸化的な水管理の省力化技術による玄米中無機ヒ素および玄米中カドミウム濃度の同時低減効果を評価検証した。さらに、入水前の含鉄資材施用と湛水管理を組み合わせた、ヒ素およびカドミウムの同時低減効果について評価検証した。

水稲の出穂前後各3週間に異なる酸化的な水管理、すなわち間断灌漑(3日間湛水4日間落水を繰り返す)、落水3回(出穂前後各3週間の中で出穂期を除く期間において4日間の落水を3回実施)、落水2回(同左、落水を2回実施)、落水1回(出穂前や出穂後に4日間の落水を1回実施)を実施した結果、湛水管理に対する異なる酸化的な水管理による玄米中無機ヒ素濃度の低減率は44~48%となり、落水回数の省力化が可能であることを明らかにした。また、玄米中カドミウム濃度は、本試験では水管理に関わらず低い値であり、同時低減が可能であった。なお、水稲の収量および品質は、落水管理を実施しても、湛水管理と大差なかった。

さらに、水田入水前に3種類の含鉄資材(FM:転炉さい、FB:非結晶性水酸化鉄、F₀:ゼロ価鉄)を各々の試験区に1回、多量施用(1,000~2,000 g m⁻²)し、出穂前後各3週間に湛水管理を実施した結果、含鉄資材施用から3年目まで玄米中無機ヒ素濃度の無施用区に対する低減率はいずれの含鉄資材でも約30~50%となり、特にF₀では低減率が大きかった。玄米中カドミウム濃度は、すべての試験区において定量下限値未満であり、同時低減が可能であった。

含鉄資材施用後の玄米中無機ヒ素低減率については、年次経過に伴い低下する傾向が認められたが、F₀では施用後10年目においても低減率は約10%を維持し、持続的な低減効果が認められた。なお、水稲の収量に年次間差は認められたものの、含鉄資材施用の低減技術を導入しても、無施用と有意差はなく、同水準を確保することが可能であり、品質についても同様の傾向にあった。

1. 緒言

水稲は土壌に微量に含まれる無機ヒ素やカドミウムを生育過程で吸収し、一部が玄米に移行する^{1), 2)}。無機ヒ素については、人体への発がん性等があることが指摘されており³⁾、コメ中無機ヒ素濃度の国際基準値(精米:0.2 mg kg⁻¹(2014年7月)、玄米:0.35 mg kg⁻¹(2016年6月))がコーデックス委員会により定められている⁴⁾。一方、カドミウムについては、暴露量が増加するにつれて、非特異的疾患やカドミウム腎症を引き起こすことが指摘されており^{2), 5)}、コメ中カド

ミウムの国際基準値(精米0.4 mg kg⁻¹(2006年7月))および食品衛生法による国内基準値(精米および玄米0.4 mg kg⁻¹(2011年2月))が、コーデックス委員会および厚生労働省により、それぞれ定められている^{4), 5)}。

ヒ素とカドミウムの土壌中の動態および玄米中への蓄積は、水稲栽培中の水管理に伴う酸化還元状態の変化によって変動する。土壌中のヒ素は酸化的な水管理下では溶出しにくい形態で存在し、水稲への吸収が抑制されるが、湛水による還元進行に伴い溶出しやすくなり、水稲へ吸収され蓄積する⁵⁾。一方、土壌中のカドミウムは酸化的な水管理下では溶出しや

*1Corresponding author, *2 東近江農業農村振興事務所 - 1 -

*3 湖東農業農村振興事務所

2025年3月24日受付, 2025年6月25日受理

すい形態に変化し、水稻に吸収されやすくなるが、還元状態では不溶化し、水稻に吸収されにくい。このように水稻によるヒ素とカドミウムの吸収には、水管理による土壌の酸化と還元との間でトレードオフの関係がある^{2), 5)}。

滋賀県の生産現場においては、白未熟粒等の発生を軽減し、玄米中カドミウム濃度の上昇を抑えるために、出穂前後各3週間の常時湛水管理が行われている⁶⁾。しかし、このような湛水管理方法では、5価のヒ酸(As(V))として土壌に吸着していたヒ素が、微生物作用によって3価の亜ヒ酸(As(III))に還元されて土壌溶液中に溶出し^{7), 8)}、水稻の根から吸収されやすくなるため、玄米中無機ヒ素濃度が上昇することが懸念される。このため、玄米中無機ヒ素濃度上昇とカドミウム濃度上昇の同時低減を可能とするには、水稻が無機ヒ素を吸収しやすい出穂前後各3週間の湛水管理期間中に一時的に土壌を酸化的に保つ水管理技術の開発が求められている⁹⁾。

酸化的になる期間を可能な限り短くし、玄米中カドミウム濃度の大幅な上昇を避けながら、玄米中無機ヒ素濃度を低減する技術として、中村ら¹⁰⁾は、出穂期の前3週間から後3週間の計6週間の間に3日間の湛水と4日間の落水を6回繰り返す間断灌漑3湛4落(以下、「間断灌漑」)による同時低減効果を報告している。しかし、この間断灌漑による方法は、水管理に労力を要することが課題とされている。

その一方で、玄米中カドミウム濃度が基準値を超過する可能性のある地域においては、出穂前後各3週間、湛水管理を実施しながら玄米中無機ヒ素濃度を低減する必要がある。これまで、湛水条件下における土壌中のヒ素を低減する技術として、含鉄資材の活用が研究されてきた。培養試験において土壌中ヒ素の溶出低減効果が認められた含鉄資材を用い、出穂前後各3週間に湛水管理下で圃場試験を行った結果、土壌中ヒ素の不溶化による水稻のヒ素吸収低減効果が認められたことが複数報告されている(Makino *et al.*, 2016; Honma *et al.*, 2016)。

そこで、本研究では、滋賀県農業技術振興センター内に供試圃場を設置し、水稻の出穂前後各3週間における間断灌漑の水管理によるヒ素とカドミウムの同時低減効果を確認した上で、酸化的な水管理の省力化技術による同時低減効果を評

価検証した。また、入水前の含鉄資材施用と湛水管理を組み合わせた、玄米中無機ヒ素および玄米中カドミウム濃度の同時低減効果を評価検証した。

2. 材料および方法

2.1 供試圃場, 土壌理化学性, 施肥設計, 生育概要

本研究は、滋賀県近江八幡市の滋賀県農業技術振興センター(35° 18' N, 136° 1' E)内の隣接する水田2圃場、A圃場およびB圃場(各800 m²)で実施した。供試圃場の土壌は、包括的農耕地土壌分類第1次試案¹³⁾では中粒質斑鉄型グライ低地土に分類される。作土の粒径組成はピペット法¹⁴⁾で測定した。

水稻栽培開始前に圃場の作土を対角線採土法(5点法)により採取して混合した後に風乾し、目開き2.0 mmの篩で調製後分析に供した¹⁴⁾。pHは土壌に対する蒸留水の比を1:2.5として調整した懸濁液を測定し、可給態リン酸はトルオグ法、遊離酸化鉄はジチオナイトークエン酸塩還元溶解法、非晶質鉄は酸性シュウ酸塩溶解法、可給態ケイ酸含量は湛水保温静置法により分析した^{14), 15)}。交換性Mnは中性1 M酢酸アンモニウム液抽出法を用い、得られた抽出液を原子吸光法で測定した¹⁴⁾。

供試作物は、2013年(前作:水稻)から水稻「コシヒカリ」を滋賀県稲作技術指導指針⁶⁾に基づき栽培した。耕種概要を表1に示した。基肥施用、耕起および代かきは5月上旬、移植は5月中旬、出穂期は7月下旬~8月初め、成熟期は8月末~9月上旬であった。

2.2 水管理試験(試験1)

2.2.1 試験区構成(水管理概要)

各年次の水管理を表2に示した。一筆の圃場内に水管理の異なる試験区を設けるため、試験区の境界に畦波(厚さ約0.5 mm, 高さ300 mm)および畦波板(厚さ約4.5 mm, 高さ300~600 mm)を設置した。2015年~2017年までの試験区および2022年の落水2回はB圃場で実施した。

試験で実施した各水管理の方法を図1に示した。試験区は

表1 供試圃場の耕種概要

| 年次 | 圃場 | 基肥 | 追肥 | 穂肥I | 穂肥II | P ₂ O ₅ -K ₂ O総計 (g m ⁻²) | 移植日 | 出穂期 (月/日) | 成熟期 |
|------|----|----|----|-----|------|---|------|--------------|------|
| | | | | | | | | | |
| 2013 | A | 2 | 1 | 2 | 2 | 3-8 | 5/10 | 7/26 | 8/30 |
| 2014 | A | 6 | - | - | - | 6-6 | 5/14 | 7/28 | 9/3 |
| 2015 | A | 7 | - | - | - | 7-7 | 5/15 | 7/31 | 9/3 |
| 2016 | A | 7 | - | - | - | 7-7 | 5/19 | 8/1 | 9/2 |
| 2017 | A | 7 | - | - | - | 7-7 | 5/16 | 7/29 | 9/4 |
| 2018 | B | 5 | - | - | - | 5-5 | 5/16 | 7/30 | 8/30 |
| 2019 | A | 6 | - | - | - | 6-6 | 5/16 | 7/31 | 9/4 |
| 2019 | B | 5 | - | - | - | 5-5 | 5/16 | 7/31 | 9/4 |
| 2020 | B | 4 | - | - | - | 4-4 | 5/20 | 8/1 | 9/1 |
| 2021 | B | 3 | - | - | - | 3-3 | 5/17 | 7/29 | 9/1 |
| 2022 | A | 4 | - | - | - | 4-4 | 5/16 | 7/29 | 8/29 |
| 2022 | B | 3 | - | - | - | 3-3 | 5/16 | 7/29 | 8/29 |

注) B圃場の施肥量は、土壌分析値に基づきA圃場より減肥した。

表2 水管理試験の概要

| 年次 | 圃場 | 試験区 | 中干し | | 水管理方法および水管理期間 | | | 反復数 | | |
|------|----|-------|-------|------|---------------|---------------|---------------|------------------------|-----|-------|
| | | | 開始 | 終了 | 出穂前3週間 | 出穂期 | 出穂後3週間 | 水管理区 | 慣行区 | |
| | | | (月/日) | (日) | | | | | | (月/日) |
| 2015 | A | 間断灌漑区 | 6/17 | 6/24 | 7 | 3日間湛水4日間落水 | 湛水 | 3日間湛水4日間落水 | 3 | 3 |
| 2016 | A | 間断灌漑区 | 6/17 | 7/3 | 16 | 3日間湛水4日間落水 | 湛水 | 3日間湛水4日間落水 | 4 | 3 |
| 2017 | A | 間断灌漑区 | 6/20 | 7/3 | 13 | 3日間湛水4日間落水 | 湛水 | 3日間湛水4日間落水 | 4 | 3 |
| 2018 | B | 落水3回区 | 6/14 | 6/26 | 12 | 落(7/16-7/20) | 湛水 | 落水(8/4-8/8, 8/13-8/17) | 4 | 4 |
| 2019 | B | 落水3回区 | 6/17 | 6/27 | 10 | 落水(7/5-7/10) | 湛水 | 落水(8/1-8/6, 8/9-8/14) | 4 | 4 |
| 2020 | B | 落水2回区 | 6/17 | 7/6 | 19 | 落水(7/16-7/21) | 湛水 | 落水(8/11-8/16) | 4 | 4 |
| 2021 | B | 落水2回区 | 6/14 | 6/28 | 14 | 落水(7/12-7/18) | 湛水 | 落水(8/6-8/11) | 4 | 4 |
| 2021 | B | 落水1回区 | 6/14 | 6/28 | 14 | 湛水 | 落水(7/27-8/1) | 湛水 | 2 | 2 |
| 2022 | B | 落水2回区 | 6/13 | 6/28 | 15 | 落水(7/6-7/26) | 湛水 | 落水(8/8-8/12) | 4 | 4 |
| 2022 | A | 落水1回区 | 6/13 | 6/28 | 15 | 湛水 | 落水(7/23-7/27) | 湛水 | 3 | 3 |

注) 各年次の試験区には、慣行区を設置した。慣行区の中干しは、各年次の試験区と同期間実施し、水管理方法は、出穂前後各3週間、常時湛水とした。

常時湛水管理（以下：慣行区）を対照とし、一定期間酸化的な水管理を組み入れた試験区を2~4反復で設置した。具体的な水管理として、2015年~2017年は中干し後の出穂前後各3週間の期間に3日間湛水と4日間落水を交互に繰り返す間断灌漑区を設置し、計6回の落水を実施した。2018年~2019年は間断灌漑区からの水管理の省力化を図るため、落水の回数を減らし、降雨のない時を見計らって、同期間に4日間の落水を3回実施する落水3回区を設置した。年次ごとに落水スケジュールの省力化を図り、2020年~2022年は同期間に4日間の落水を2回実施する落水2回区を設置し、2021

年~2022年は、出穂期直前または直後に4日間の落水を1回実施する落水1回区を2~3反復で設置した。落水1回区以外は、出穂期の約1週間落水を行わず、湛水期間とした。

2019年~2022年の試験では、落水期間中の降雨に対応するための基準を下記の通り年次ごとに3区分設定した。

2019年の落水3回区における落水期間中の降雨に対応するための基準は、降雨により再湛水した場合、4日間の落水を再度行った。降雨により再湛水には至らなかった場合、落水4日間の累積降雨量に応じて次式に従い落水期間を延長した。

$$\text{延長日数 (d)} = \text{落水4日間の累積降雨量 (mm)} /$$

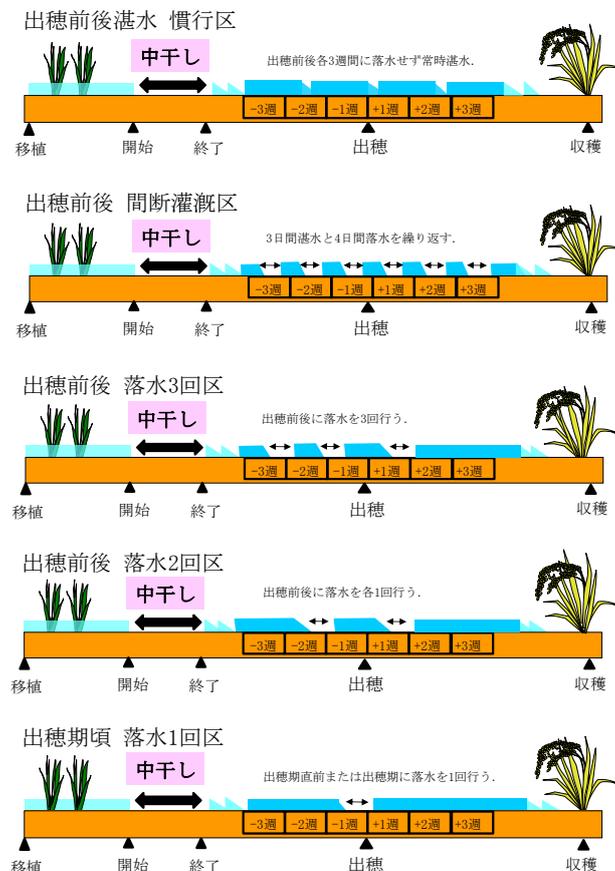


図1 各試験区における水管理の方法

日蒸発散量 (mm/d)

2020年の落水2回区における基準は、降雨が観測された場合、落水開始日からの経過日数により落水をやり直す期間を定めた。落水開始後2日(48時間)経過前の降雨により再湛水した場合、落水をやり直し、4日間(96時間)連続して土壌を乾かした後、入水した。落水開始後2日(48時間)経過後の降雨により再湛水した場合、落水をやり直し、3日間(72時間)連続して土壌を乾かした後、入水した。

2021年、2022年の落水2回区および落水1回区における基準は、落水開始後3日(72時間)経過前の降雨により再湛水した場合、落水をやり直し、4日間(96時間)連続して土壌を乾かした後、入水した。落水開始後3日(72時間)経過後に再湛水した場合は、落水をやり直し、3日間(72時間)連続して土壌を乾かした後、入水した。

2. 2. 2 調査方法

2. 2. 2. 1 玄米中無機ヒ素の分析

玄米は粉碎機(シェイクマスターオート, バイオメディカルサイエンス, JP)を用いて、ポリプロピレン製50 mL遠沈管に玄米粒とステンレスビーズを入れ、振動させ粉碎した。粉碎した玄米粉末に0.28 mol L⁻¹硝酸を加えて無機ヒ素を110°C、2時間加熱抽出し、希釈およびろ過後、HPLC-ICP-MS(高速液体クロマトグラフ, HPLC: Flexar, PerkinElmer, MA; ICP-MS: NexION300xx, PerkinElmer, MA)誘導結合プラズマ質量分析法によりヒ素の化学形態別分析を行った(Baba *et al.*, 2014)。玄米粉末の水分率を送風定温恒温器にて135°C、3時間乾燥により求め、その水分率から玄米水分率15%として換算した玄米中無機ヒ素濃度を算出した。分析精度の確認には白米認証標準物質であるNMIJ CRM 7503-a, 7503-bを用いた。

2. 2. 2. 2 玄米中カドミウムの分析

玄米粉末中におけるカドミウムの分析は、フローインジェクション(FI)-誘導結合プラズマ質量分析計(ICP-MS)によるBabaら¹⁰⁾の報告を一部修正し、実施した。

玄米粉末0.5 gを50 mLデジチューブ(SCP Science)に入れ、60~70%硝酸を5 mL加えて一晩以上置き玄米粉末の予備分解を行った後、デジプレッ加熱分解システム(SCP Science)またはアルミブロック恒温槽(タイテック)とアルミブロック(AL-3009, タイテック)を用いて110°Cで2時間加熱した。放冷後、30%過酸化水素水1 mLを添加し、110°Cで1時間加熱した。放冷後、超純水を加え50 mLに希釈し、内容物を振り混ぜた後、ポリプロピレン製シリンジとポリエーテルスルホンメンブレンのシリンジフィルター(エコノフィルタ, アジレントテクノロジーズ)を用いてろ過した。内部標準元素としてインジウムをろ液に添加後、カドミウムを

FI-ICP-MS(FI: Flexar, PerkinElmer, MA; ICP-MS: NexION300xx, PerkinElmer, MA)により定量した。分析精度の確認には、玄米あるいは白米の認証標準物質であるNMIJ CRM 7532-a, 7533-a, 7502-a, 7503-a, 7503-b, NIST SRM 1568bの中から複数を用いた。

2. 2. 2. 3 土壌溶液の採取および土壌溶液中の溶存ヒ素濃度の測定

土壌溶液を採取する機材を中干し開始の2週間以上前に、供試圃場の各試験区へ各々1か所設置した。0.15 μm孔径の樹脂製土壌溶液サンプラー(Rhizon mom 19. 21. 21, Rhizosphere Research Products, NL)に、50 cm延長チューブ(X1-L50, 株トップ)を接続した後、サンプラーと反対側の延長チューブに、ルアーコネクター(19. 21. 08F, Rhizosphere Research Products, NL)を接続した。サンプラーは土壌面に対して平行に深さ10 cmに設置し、サンプラーと土壌が密着するように土壌の構造を十分に乱しながら埋め戻した後、土壌面を平らにした。土壌に挿した支持棒に延長チューブを固定し、土壌面から高さ約30 cmにルアーコネクターを設置した。

土壌溶液を採取する前に、ルアーコネクターに採血針ホルダー付ルアー(33-151, ニプロ株式会社)を接続後、真空採血管(採血量7 mL, ベノジェクトII VP-P070K30, テルモ株式会社)をセットし、土壌溶液の初流を採取した。約7 mL採取した初流は分析には使用せず廃棄した。次に、9~10%の硝酸を予め少量添加しておいた別の真空試験管に分析用の土壌溶液を採取した。硝酸添加量は真空採血管の規定量(7 mL)を採取すると約1%硝酸となる液量とした。土壌溶液の採取時期は中干し開始前、出穂10日前、出穂5日後および出穂15日後を基準とした。土壌溶液中の総ヒ素濃度は、内部標準元素としてインジウムを添加後、FI-ICP-MS(2. 2. 2. 2と同様)により定量した。分析精度の確認には、地下水認証標準物質ERM-CA615および河川水認証標準物質NMIJ CRM 7202-cを用いた。

2. 2. 2. 4 酸化還元電位の測定

土壌の酸化還元電位(土壌Eh)は、1試験区あたり白金電極(EP201-5-1. 0, 株式会社藤原製作所)2本を土壌面と水平になるように、2015年は深さ5 cm, 2019年および2022年は深さ10 cmに設置し、土壌Eh測定器(PRN-41, 比較電極4400型, 株式会社藤原製作所)を用いて測定した。2015年はデータロガー(CR1000, Campbell Scientific, Inc.)およびマルチプレクサー(AM16/32B, Campbell Scientific, Inc.)に白金電極(EP201-5-1. 0, 株式会社藤原製作所)および比較電極(4400型, 株式会社藤原製作所)を接続し、Ehを1時間毎に連続測定した。2019年、2022年は、中干し開始時、中干し

終了時、出穂期前後の落水期に測定した。白金電極は、水稻の移植から約1週間後に各試験区に設置し、中干し前までに測定値が安定していることを確認した。

2. 2. 2. 5 作物体調査項目

1 試験区あたり 30 株を抽出して採取し、収量（精玄米重）および品質（整粒粒比）を測定した。外観品質は、1.80 mm で選別した試料を用い、穀粒判別器 (RGQI10B, 株式会社サタケ) により測定し、粒数比で算出した。精玄米重は、1.80 mm 以上で水分 15% 換算値として算出した。

2. 2. 3 データ解析

本試験では実施した水管理が年次ごとに異なり、全ての水管理を同一年では実施していない。

玄米中無機ヒ素濃度は、対照となる慣行区でも毎年変動するため、異なる水管理間の濃度の年次間の比較では玄米中無機ヒ素の低減効果を正しく評価できない。そのため、水管理間の玄米中無機ヒ素濃度の比較は、慣行区からの低減率を用いた。なお、玄米中無機ヒ素の低減率は以下の式で求め、実施年の異なる水管理間で比較するため、統計解析を行わなかった。

$$\text{玄米中無機ヒ素濃度低減率 (\%)} = (1 - \text{各水管理区の玄米中無機ヒ素濃度} / \text{慣行区の玄米中無機ヒ素濃度}) \times 100$$

各水管理の玄米中無機ヒ素濃度は、年次ごとに計算された玄米中無機ヒ素低減率を平均して値を算出した。

また、慣行区の玄米中カドミウム濃度が、全ての年次において定量下限値未満であったため、玄米中カドミウム濃度の統計解析を行わなかった。

精玄米重および整粒粒比は、年次の異なる値を平均し比較しているため、水管理処理による統計解析を行わなかった。

2. 3 含鉄資材施用試験 (試験 2)

2. 3. 1 試験区構成

ヒ素溶出低減資材として、3 種類の含鉄資材を 2013 年の入水前に A 圃場に施用した。試験区および含鉄資材の概要を表 3 に記す。試験区は、転炉さい区 (以下: 「FM 区」, FM ゴールド, 鉄含有量 19%, 施用量 2,000 g m⁻², 内鉄 380 g m⁻²), 非結晶性水酸化鉄資材区 (以下: 「FB 区」, フィックスオール, 鉄含有量 56%, 施用量 1,000 g m⁻², 内鉄 560 g m⁻²), ゼロ価鉄区 (以下: 「F₀区」, エコメル, 鉄含有量 99%, 施用量 1,000 g m⁻², 内鉄 990 g m⁻²), とし、対照区として「無施用区」を設置した。中干し後の水管理は、いずれの区においても出穂前後各 3 週間、常時灌水とした。

2. 3. 2 調査方法

表3 含鉄資材施用試験の試験区構成

| 試験区 | 含鉄資材 | 鉄含量 (%) | 施用量 (g m ⁻²) |
|------------------|----------|---------|--------------------------|
| | 資材名 | | |
| FM区 | FMゴールド | 19 | 2,000 |
| FB区 | フィックスオール | 56 | 1,000 |
| F ₀ 区 | ゼロ価鉄 | 99 | 1,000 |
| 無施用区 | - | - | - |

注) 施用日: 2013年4月26日。

供試圃場の土壌化学性、施肥設計、生育概要は 2. 1 に準じた。土壌は、表層部を薄く剥いだ後の土壌面から深さ約 15 cm までの作土層を採取した¹⁴⁾。土壌採取は、2013 年の含鉄資材施用前および 2014 年、2016 年、2017 年、2019 年、2022 年の水稻栽培前に行い、土壌 pH、遊離酸化鉄、可給態ケイ酸について 2. 1 の方法に準じて分析した。

なお、玄米中無機ヒ素およびカドミウム濃度、精玄米重、整粒粒比は、2. 2 の水管理試験に準じて調査した。

2. 3. 3 データ解析

玄米中無機ヒ素濃度は、対照となる無施用区でも毎年変動するため、異なる年次間の比較では玄米中無機ヒ素濃度の低減効果を正しく評価できない。そのため、各含鉄資材施用区間の玄米中無機ヒ素濃度の比較は、無施用区からの低減率を用いて行った。なお、玄米中無機ヒ素濃度の低減率は以下の式で求め、無施用区に対する各含鉄資材施用区の低減率で年次ごとに比較するため、統計解析を行わなかった。

$$\text{玄米中無機ヒ素濃度低減率 (\%)} = (1 - \text{各含鉄資材施用区の玄米中無機ヒ素濃度} / \text{無施用区の玄米中無機ヒ素濃度}) \times 100$$

玄米中カドミウム濃度は、定量下限値未満もしくは濃度が低く、無施用区と比較して値の上昇は認められなかったことから、統計解析を行わなかった。年次ごとの精玄米重および整粒粒比は、一元配置分散分析を行った後、Tukey HSD による多重比較を行った (BellCurve[®]エクセル統計, 2022)。

3. 結果

3. 1 水管理試験 (試験 1)

3. 1. 1 供試圃場の土壌

供試圃場の土壌粒径組成および土性を表 4 に示す。作土の土性区分は砂壤土 (SL) であり、土性区分の細分は FSL (細砂 40% 以上、かつ粗砂 45% 以下の SL) に分類された¹⁴⁾。

供試圃場の土壌化学性を表 5 に示す。A 圃場の pH は、改良目標値 (5.5~6.5) の下限値以下、B 圃場の pH は、改良目標値の範囲内であった。A および B 圃場の可給態リン酸含有量は、滋賀県の改良目標値 (P₂O₅ として 100 mg~200 mg 乾土 1

表4 供試圃場の土壌粒径組成および土性

| 圃場 | 砂 (%) | | | シルト (%) | 粘土 (%) | 土性 (%) |
|----|-------|------|------|---------|--------|----------|
| | 粗砂 | 細砂 | 計 | | | |
| A | 20.2 | 48.7 | 68.8 | 17.4 | 13.8 | 砂壤土 (SL) |
| B | 20.9 | 49.7 | 70.7 | 16.4 | 13.0 | 砂壤土 (SL) |

注1) 粗砂 (2.0 mm未満-0.2 mm), 細砂 (0.2 mm-0.02 mm), シルト (0.02 mm-0.002 mm), 粘土 (0.002 mm未満).
 注2) A圃場は12試験区, B圃場は10試験区の平均値を示す.

表5 供試圃場の土壌化学性

| 圃場 | pH | 炭素 | 窒素 | CEC | 可給態リン酸 | 鉄 | | 交換性Mn | 可給態Si | ヒ素 | | カドミウム | |
|----|-----|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|--|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|--|
| | | 含量 | 含量 | | | 遊離酸化鉄 | 非晶質鉄 | | | 1M HCl | 0.1M HCl | | |
| | | (g kg ⁻¹) | (g kg ⁻¹) | (cmol _c kg ⁻¹) | (mg P ₂ O ₅ kg ⁻¹) | (g Fe kg ⁻¹) | (g Fe kg ⁻¹) | (mg Mn kg ⁻¹) | (mg Si kg ⁻¹) | (mg As kg ⁻¹) | (mg Cd kg ⁻¹) | | |
| A | 5.4 | 20.7 | 1.65 | 13.2 | 131 | 9.0 | 5.5 | 28.7 | 54.0 | 1.69 | 0.14 | | |
| B | 5.7 | 21.6 | 1.72 | 12.6 | 143 | 8.1 | 6.3 | 41.9 | 61.2 | 1.65 | 0.20 | | |

注) 土壌採取時期: A圃場は2013年4月, B圃場は2018年4月.

kg⁻¹)の範囲内であった¹⁷⁾. AおよびB圃場の遊離酸化鉄含有量は、滋賀県の改良目標値 (8 g~20 g 乾土 1 kg⁻¹)の範囲内であった¹⁷⁾. 1 M塩酸抽出性ヒ素濃度はA圃場 1.69 mg kg⁻¹, B圃場 1.65 mg kg⁻¹であり、農用地土壌汚染防止法に基づく農用地土壌汚染対策地域の指定要件 (水田: 15 mg kg⁻¹以上 (1 M塩酸抽出))と比べて顕著に低かった¹⁸⁾. 0.1 M塩酸抽出性カドミウム濃度は、A圃場 0.14 mg kg⁻¹, B圃場 0.20 mg kg⁻¹であった.

3. 1. 2 水管理による土壌Ehの推移

2015年の慣行区と間断灌漑区における水稲栽培期間中の土壌Ehの推移を図2に示す. 2015年の中干し期間中における慣行区および間断灌漑区の土壌Ehの値は、+584 mVおよび+420 mVまで各々上昇した. 間断灌漑区では、中干し後から8月21日までの期間に落水を6回実施した. この内、土壌Ehの上昇が+100 mVに達しなかったのは1回、中干し終了時の土壌Ehと同程度まで上昇した回数は3回 (落水3回目~5回目, +557 mV~613 mV)であった. 土壌が十分に酸化した状態であっても、湛水開始後、土壌Ehは速やかにマイナス値に低

下した.

2019年の慣行区と落水3回区における水稲栽培期間中の土壌Ehの推移を図3に示す. 中干し前の湛水終了時に-176 mVであった土壌Ehは、中干し終了時に慣行区+571 mV, 落水3回区+602 mVまで上昇した. 落水3回区における4日間の落水期間終了直前の土壌Ehは、落水1回目-19 mV, 2回目+486 mV, 3回目+478 mVであった.

2022年の慣行区、落水2回区および落水1回区の土壌Ehの推移を図4に示す. 中干し前の湛水終了時に-150 mV前後であった土壌Ehは、中干し終了時には落水2回区の対照区であるB圃場の慣行区+571 mV, 落水1回区の対照となるA圃場の慣行区+661 mV, 落水2回区+596 mV, 落水1回区+643 mVであった. 落水2回区の落水期間終了直前の土壌Ehは、落水1回目+707 mV, 2回目+697 mVまで上昇した. 落水1回区の落水1回目終了直前の土壌Ehは、+650 mVまで上昇した.

3. 1. 3 土壌溶液中の溶存ヒ素濃度

2022年の落水1回区および落水2回区について、深さ10 cmから採取した土壌溶液中の溶存ヒ素濃度を図5に示す.

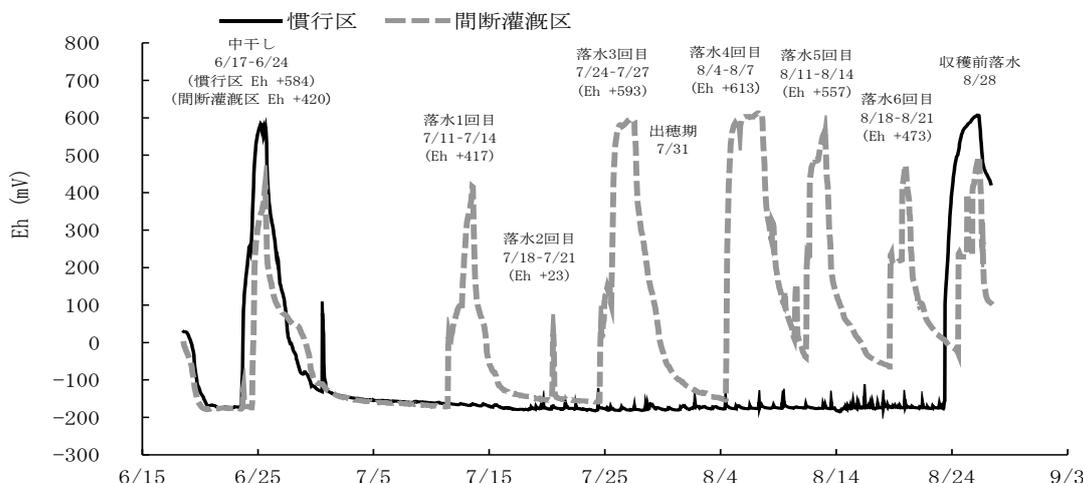


図2 間断灌漑区における土壌Ehの推移 (2015年)

注) ()内の数字は、中干しおよび落水期間中における土壌Ehの最高値を示す.

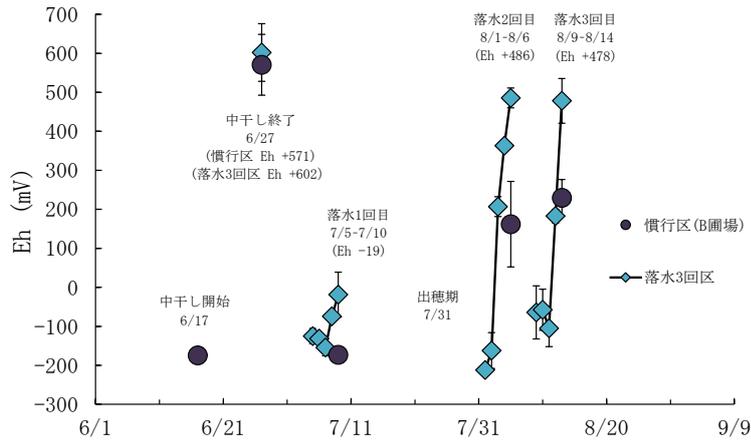


図3 落水3回区における土壌Ehの推移(2019年)

注1) ()内の数字は、中干しおよび落水期間中における土壌Ehの最高値を示す。
 注2) エラーバーは、標準偏差を示す。

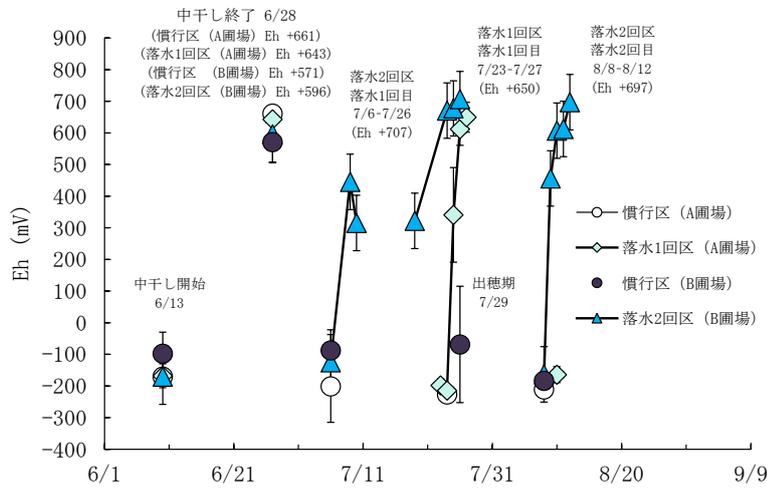


図4 落水2回区および落水1回区における土壌Ehの推移(2022年)

注1) ()内の数字は、落水期間中における土壌Ehの最高値を示す。
 注2) 落水2回区 落水1回目において、7/11~7/18にかけて断続的な降雨により再湛水したため、この期間の土壌Ehは測定していない。
 注3) エラーバーは、標準偏差を示す。

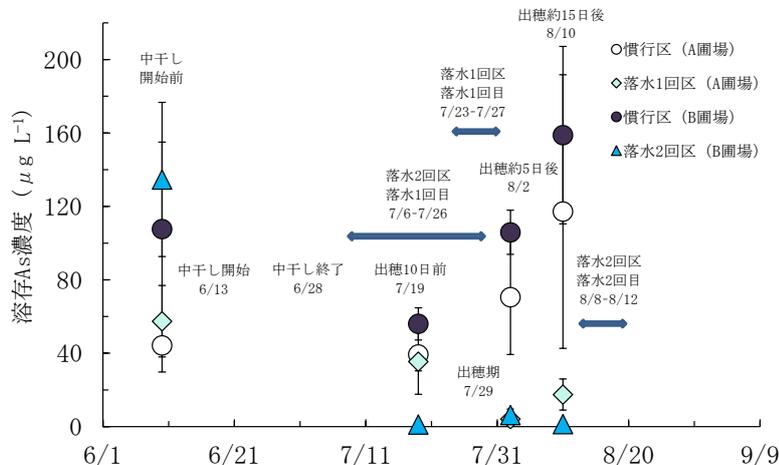


図5 落水1回区および落水2回区における溶存ヒ素濃度の推移(2022年)

注) エラーバーは、標準偏差を示す。

土壌溶液中の溶存ヒ素濃度は、中干し開始前に慣行区(B圃場)および落水2回区では高い値を示し、出穂10日前に一旦低下した。その後、慣行区(A, B圃場)では、出穂約15日後に著しく上昇した。その一方、落水2回区では、落水1回目の期間中(7月6日~7月26日)の7月19日に土壌溶液を採取したところ、溶存ヒ素濃度が $0 \mu\text{g L}^{-1}$ 付近まで低下し、その後湛水時の溶存ヒ素濃度の上昇も抑制され、慣行区および落水1回区よりも低い濃度で推移した。

落水1回区では、7月19日に土壌溶液を採取したところ、溶存ヒ素濃度が $35.4 \mu\text{g L}^{-1}$ であり、慣行区(A圃場, $39.3 \mu\text{g L}^{-1}$)と同程度であったが、落水1回目(7月23日~7月27日)後の8月2日に溶存ヒ素濃度は $4.1 \mu\text{g L}^{-1}$ まで低下するとともに、慣行区(A圃場, $70.5 \mu\text{g L}^{-1}$)と比較しても顕著に低い値であった。落水1回区の溶存ヒ素濃度の上昇は、8月10日においても緩やかであった。

3. 1. 4 玄米中無機ヒ素濃度および玄米中カドミウム濃度

出穂前後各3週間の水管理を行った試験区について、慣行区に対する玄米中無機ヒ素濃度の低減率を図6に示す。

出穂前後各3週間に、3日間の湛水と4日間の落水を6回繰り返す間断灌漑区の水管理において、玄米中無機ヒ素濃度の慣行区に対する低減率は48%であった。

間断灌漑区から省力化を図る酸化的な水管理である落水3回区の玄米中無機ヒ素濃度の慣行区に対する低減率は47%となり、間断灌漑区と同様の低減効果が認められた。また、落水2回区の玄米中無機ヒ素濃度の慣行区に対する低減率は46%、落水1回区は44%となり、間断灌漑区と同水準の低減効果が認められた。

水管理試験における玄米中カドミウム濃度は、慣行区ではいずれの年次においても、定量下限値未満であった。また、

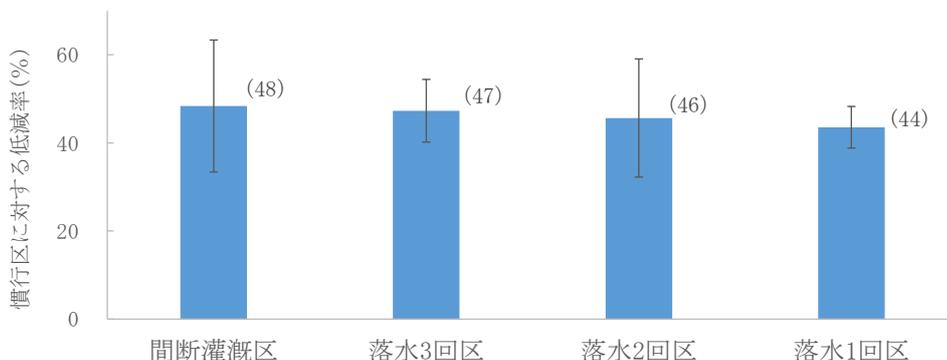


図6 水管理試験における玄米中無機ヒ素濃度の慣行区に対する低減率

- 注1) 玄米中無機ヒ素低減率 (%) = $(1 - \text{各水管理区}の玄米中無機ヒ素濃度 / \text{慣行区}の玄米中無機ヒ素濃度) \times 100$
 注2) 間断灌漑区：2015年-2017年の平均値，落水3回区：2018年-2019年の平均値，落水2回区：2020年-2022年の平均値，落水1回区：2021年-2022年の平均値。
 注3) エラーバーは、標準偏差を示す。

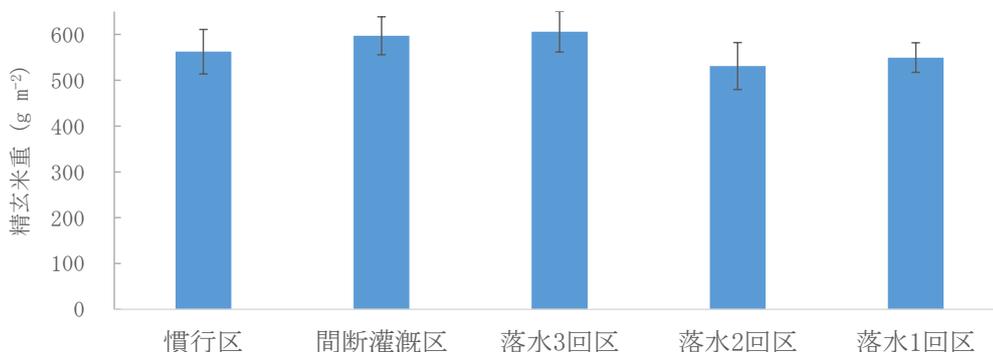
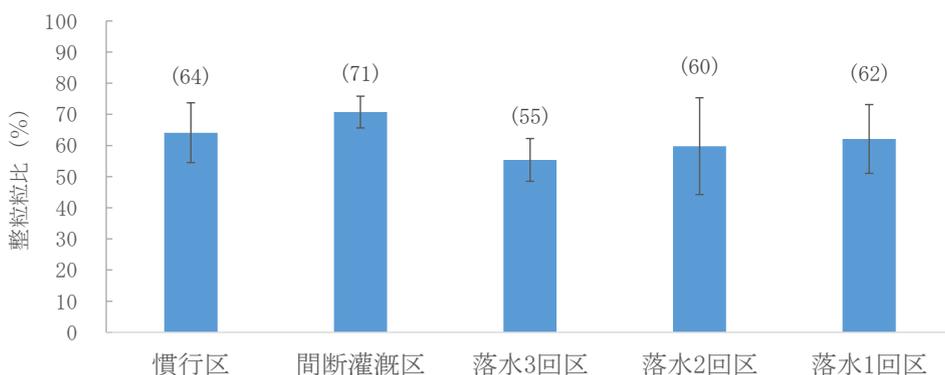


図7 水管理試験における精玄米重

- 注1) 慣行区：2015年~2017年の平均値 (562g m^{-2})，間断灌漑区：2015年~2017年の平均値 (597g m^{-2})，落水3回区：2018年~2019年の平均値 (595g m^{-2})，落水2回区：2020年~2022年の平均値 (534g m^{-2})，落水1回区：2021年~2022年の平均値 (549g m^{-2})。
 注2) エラーバーは、標準偏差を示す。



注1) 間断灌漑区：2015年～2017年の平均値，落水3回区：2018年～2019年の平均値，落水2回区：2020年～2022年の平均値，落水1回区：2021年～2022年の平均値。
注2) エラーバーは，標準偏差を示す。

2021年の落水2回区および落水1回区，2022年の落水1回区においても，定量下限値未満であった。間断灌漑区，落水3回区，2020年および2022年の落水2回区では，低濃度であるものの，玄米中カドミウムが検出された（データ略）。

3. 1. 5 水稻の収量および品質

水稻の収量（精玄米重）および品質（整粒粒比）をそれぞれ図7，8に示す。慣行区ならびに出穂前後各3週間に水管理を行った各試験区における精玄米重および整粒粒比について，落水管理を実施しても，慣行区と大差なかった。

3. 2 含鉄資材施用試験（試験2）

3. 2. 1 供試圃場の土壌，土壌pH，遊離酸化鉄，可給態ケイ酸

供試圃場の土壌粒径組成および土性区分，土壌化学性を3.1.1に記す。

図9-1に含鉄資材施用2年目（2014年）から10年目（2022年）までの土壌pHの推移を示す。FM区の土壌pHは，施用後初めて測定した施用2年目（2014年）に最も高く，その後低下傾向であったものの，施用5年目（2017年）にかけて他試験区より高く推移し，施用7年目（2019年）に他試験区と同

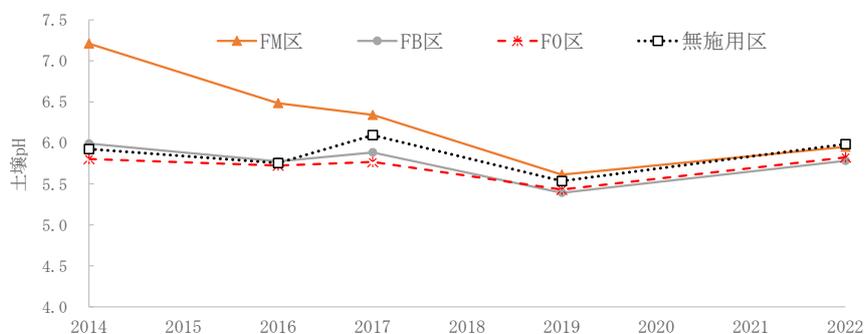


図9-1 含鉄資材施用試験における土壌pHの推移

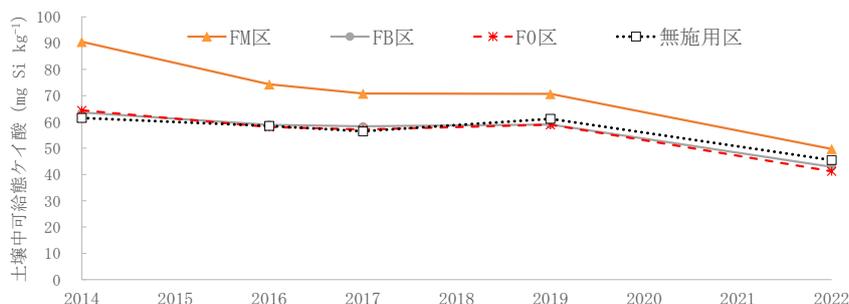


図9-2 含鉄資材施用試験における土壌中可給態ケイ酸(Si)の推移

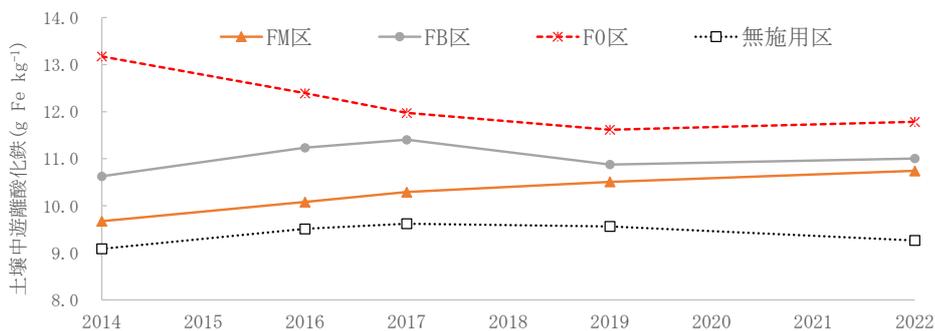


図9-3 含鉄資材施用試験における土壤中遊離酸化鉄(Fe)の推移

水準となった。FB区およびF₀区の土壌pHは6前後で推移し、無施用区と同水準であった。

図9-2に土壌中の可給態ケイ酸の推移を示す。FM区の土壌中の可給態ケイ酸は、施用後初めて測定した施用2年目(2014年)に最も高くなり、その後徐々に低下傾向で、施用10年目(2022年)に他試験区と同水準となった。施用2年目(2014年)から施用10年目(2022年)にかけて、F₀区、FB区の可給態ケイ酸は、無施用区と同水準であった。

図9-3に土壌中の遊離酸化鉄の推移を示す。F₀区の土壌中の遊離酸化鉄は、施用後初めて測定した施用2年目(2014年)に最も高く、いずれの各鉄資材施用区でも施用10年目(2022年)まで無施用区と比較して高い値で推移した。

3. 2. 2 玄米中無機ヒ素濃度および玄米中カドミウム濃度

玄米中無機ヒ素濃度の無施用区に対する低減率の年次推移

について図10に示す。

鉄資材を1回、多量施用(1,000~2,000 g m⁻²)すると、出穂前後各3週間に湛水管理を行った場合でも、施用開始から3年目(2015年)まで無施用区に対する玄米中無機ヒ素濃度の低減率を約30~50%にすることが可能であり、特にF₀区では低減率が大きかった。各含鉄資材施用区における施用後4年目(2016年)の玄米中無機ヒ素低減率は、無施用区の約20~30%となり、以降年次経過に伴い低減効果は小さくなる傾向が認められた。施用後7年目(2019年)の玄米中無機ヒ素濃度の低減率は、無施用区の8~16%であった。

施用後10年目(2022年)においてもF₀区の玄米中無機ヒ素濃度の低減率は、無施用区の約10%であり、F₀区の低減効果は他の含鉄資材施用区と比較して10年間持続した。

玄米中カドミウム濃度は、全ての試験区において、定量下限値未満であった(データ略)。

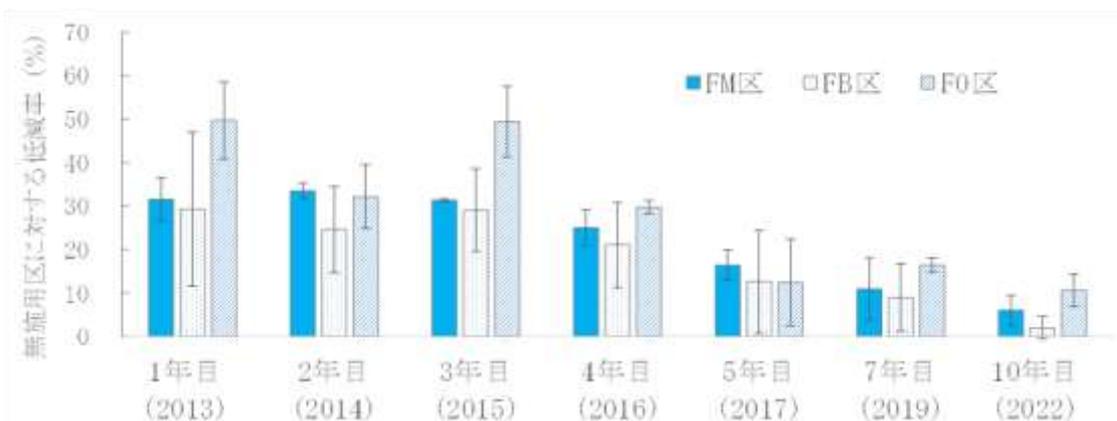


図10 含鉄資材施用試験区における玄米中無機ヒ素濃度の無施用区に対する低減率

注1) 玄米中無機ヒ素低減率(%)=(1 - 各含鉄資材施用区の玄米中無機ヒ素濃度 / 無施用区の玄米中無機ヒ素濃度) × 100

注2) エラーバーは、標準偏差を示す。

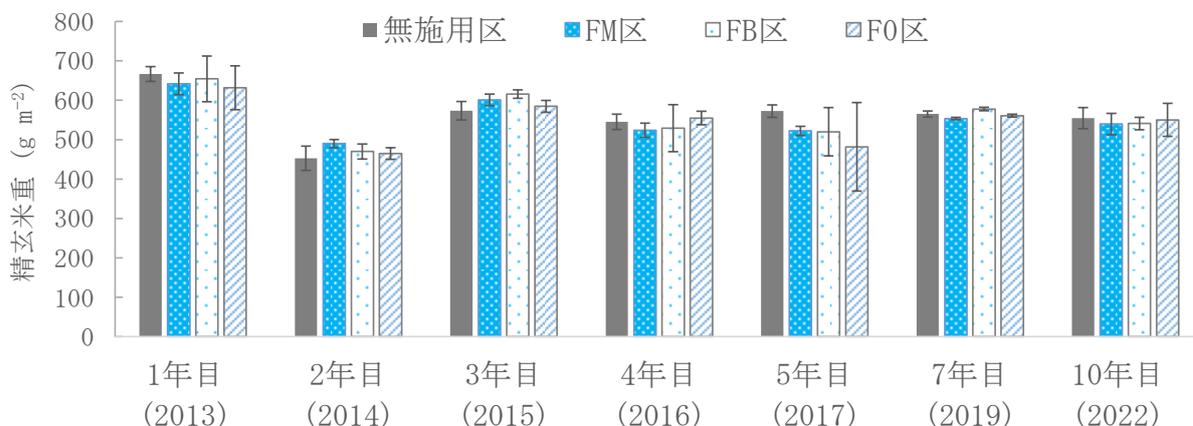


図11 含鉄資材施用試験区における精玄米重

注1) 各年次とも5%水準の有意差は認められなかった (Tukeyによる多重比較検定.)
 注2) エラーバーは、標準偏差を示す。

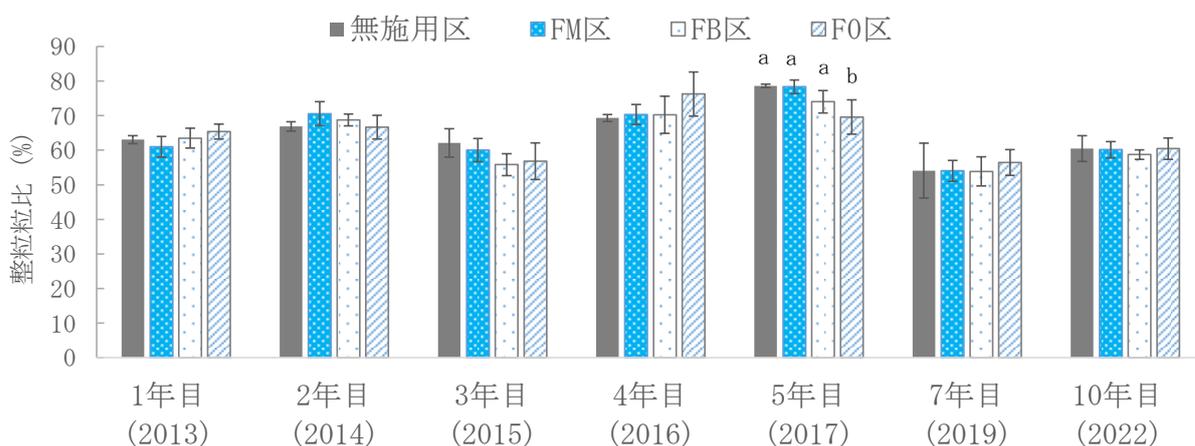


図12 含鉄資材施用試験区における整粒粒比

注1) 異符号間に5%水準で有意差あり (Tukeyによる多重比較検定.)
 注2) エラーバーは、標準偏差を示す。

3. 2. 3 水稻の収量および品質

水稻の収量 (精玄米重) および品質 (整粒粒比) の年次推移を図11, 12に示す。精玄米重について年次間差は認められたものの、含鉄資材施用の低減技術を導入しても、無施用区と有意差はなく、同水準を確保することが可能であった。整粒粒比について、FM区およびFB区では無施用区との有意差は認められなかった。F₀区の施用5年目 (2017年) では他試験区と比較し有意に低下したが、他の年度では無施用区との有意差は認められなかった。

4. 考察

4. 1 水管理試験 (試験1)

本研究における出穂前後各3週間の間断灌漑の水管理により、湛水管理に対する玄米中無機ヒ素濃度の低減率は最大50% (2016年) となり、中村ら¹⁰⁾の報告 (慣行区に対する低減率: 最大55%) と同様の効果が認められた。

2015年の間断灌漑区における栽培期間中の土壌Ehの推移 (5cm深) から、落水期間中の降雨の影響により、土壌Ehの上昇が緩慢になる場合がみられた (図2 落水1回目, 落水2回目, 落水6回目)。このため、4日間の落水期間中に無降雨日を確保し、中干しと同程度に土壌を酸化状態に管理することができたのは、落水6回の内3回であった。この結果から、供試圃場では落水を3回実施する期間に無降雨日を確保し、

土壌を乾かすことができれば、慣行区の50%程度の玄米中無機ヒ素低減効果が期待できると考えられた。また、中村ら¹⁹⁾によると、落水3回の水管理は、間断灌漑と同程度の玄米中無機ヒ素濃度の低減に有効であると報告されていた。そこで、2018年～2019年に落水3回区を設置したところ、慣行区に対する玄米中無機ヒ素濃度の低減率は47%となり、これを裏付ける結果となった(図6)。

水管理を行う際、夏季に入排水を繰り返すための排水口の開閉作業は、労力負担も大きく、病害虫防除および穂肥時期との作業重複も懸念される。そこで、中村ら²⁰⁾は、段階的に水管理の回数を削減し、出穂前後各3週間の期間に圃場を4日間連続して2回乾かす落水2回の水管理試験を行ったところ、水稻のヒ素吸収を抑制し、玄米中無機ヒ素濃度を低減する効果が認められたことを報告している。本研究においても2020年～2021年に、落水2回区を設置し、中村ら²⁰⁾が考案した水管理期間中の降雨に対応するための基準をもとに出穂前後各3週間の期間の土壌を十分に酸化状態にしたところ、玄米中無機ヒ素濃度の慣行区に対する低減率は46%となり、落水3回区と同様の低減効果が認められた(図6)。また、水稻の収量(図7)および品質(図8)も慣行区と同水準であったことから、落水2回はヒ素低減対策に有効であり、水稻の収量および品質についても問題はないと考えられた。

さらに水管理の省力化を図るため、2021年～2022年に落水1回区を設置し、水稻地上部のヒ素蓄積量が急激に高まるとされている出穂期^{21), 22)}に酸化的な水管理を行ったところ、玄米中無機ヒ素濃度の慣行区に対する低減率は44%となり、落水2回と同様の低減効果が認められた。一方で、中村ら²³⁾によると、全国の複数圃場試験における、落水1回管理による玄米中無機ヒ素濃度の低減率は平均で19%にとどまり、中村ら^{10), 20)}の以前の試験で得られた間断灌漑や落水2回管理の低減率(38%)と比較し、低減効果は小さかったと報告している。しかしながら、玄米中無機ヒ素濃度の低減効果が最も高いとされているのは出穂期頃の水管理であり²¹⁾、中村ら²³⁾によると、落水1回による玄米中無機ヒ素濃度低減効果について十分な効果が得られなかった圃場では、出穂10日前に土壌が最も乾燥しており、出穂期より近い時期に土壌を乾かすことができれば、高い低減効果が期待できると考察している。今回の調査では、出穂期もしくは出穂期直前に適切な落水1回管理を行ったことが高い低減効果に繋がったと推察された。今後は、水稻の収量・品質を維持しながら、玄米中無機ヒ素濃度と玄米中カドミウム濃度を同時低減可能な落水1回について継続した調査を進める必要があると考えられた。

松島²⁴⁾によると、減数分裂期や開花期等の最も水を必要とする時期でも、田面が黒色をしていれば水不足による減収はほとんどみられないとしており、本研究においても減収は認

められなかった。その一方で、Tsujiimotoら²⁵⁾は、水不足と高温の両方のリスクをもつ熱帯(ガーナ北部)の水田において、現地の代表的な水稻品種を用いて乾季の出穂期間中に非湛水管理を行ったところ、常時湛水に比べて日没前後3時間の群落内気温差の平均値が0.7～0.9℃高くなり、収量が有意に低下した要因の一つであると報告している。これらのことから、出穂期頃の落水1回による収量および品質への影響については、近年の夏季高温条件下において、今後確認を進める必要があると考えられた。

玄米中カドミウム濃度については、慣行区や落水1回区、落水2回区を中心に、定量下限値(0.006～0.04 mg kg⁻¹)未満の値が多くみられ、落水3回区や間断灌漑区においても低い値となった。Nakamuraら²⁶⁾の報告によると、落水管理後の水田土壌中におけるカドミウムの可溶化およびヒ素の不溶化は、同時に起こる現象ではなく、ヒ素の不溶化が完了した時点においてもカドミウムの溶出は継続している。すなわち、落水管理に対する土壌中のカドミウムの可溶化速度は、ヒ素の不溶化速度と比較して遅いことが明らかとなっている。また、Honmaら¹²⁾の報告によると、落水後の入水開始から1週間以内に溶存カドミウム濃度は急激に低下する。これらの報告から、玄米中カドミウムおよびヒ素についてトレードオフの関係が認められるものの、落水1回では他の水管理と比較し、出穂前後各3週間の落水回数が少ないうえに、土壌が酸化的状態となる期間も短いため、玄米中カドミウム濃度の上昇リスクを緩和できる可能性があるのではないかと考えられた。

次に、落水1回管理の開始については、水稻の出穂約10日前から天気予報を確認し、無降雨日が継続する気象条件で、出穂期に可能な限り近い時期に、水管理を行う。滋賀県的水稻栽培面積の6割を占める(滋賀県, 2024)「コシヒカリ」、 「みずかがみ」、および「キヌヒカリ」の出穂期前後の期間(7/20～8/5)における滋賀県近江八幡市の過去5年間(2018年～2022年)の気象データを確認したところ、いずれの年においても連続した4日間(96時間)の無降雨期間を確保することが可能であった。また、土壌の酸化状態の目安としての土壌Eh最大値は、+500 mV以上が望ましいと考えられた(2021年+530 mV, 2022年+650 mV)。

今回の試験において、出穂前後各3週間に水管理を実施することにより、水稻の収量および品質は慣行と同水準を確保しつつ、玄米中無機ヒ素濃度の低減が可能であった。水管理回数の頻度による玄米中無機ヒ素の低減率は、間断灌漑、落水3回区、落水2回区および落水1回区において、同程度であり、現時点で最も実用的な水管理は、落水1回であると示唆された。玄米中カドミウム濃度については、全ての試験区において低い値で、特に慣行区は全て定量下限値未満、落水1回区では定量下限値未満の値が多くみられた。このことから

ら、落水1回は玄米中カドミウムのリスクをある程度抑えつつ、玄米中無機ヒ素濃度の同時低減が可能であると考えられた。今後は落水1回管理による低減効果のデータを蓄積し、収量および品質への影響調査と併せて、玄米中カドミウム濃度が上昇しやすい水田において評価する必要があると考えられた。

4.2 含鉄資材施用試験 (試験2)

今回の試験結果では、水稻の出穂前後各3週間に湛水管理を行った場合においても、含鉄資材施用により、玄米中無機ヒ素濃度が低下した(図10)。Sudaら²⁸⁾によると、含鉄資材中の鉄に還元状態の土壌から溶出する亜ヒ酸を吸着する性質が認められると報告している。また、Yamaguchiら²⁹⁾のポット試験によると、含鉄資材施用により土壌中の遊離酸化鉄が増加し、鉄に無機ヒ素が吸着される。その結果、土壌溶液中の無機ヒ素濃度が含鉄資材無施用の場合と比較して低下することで、水稻根からの無機ヒ素の吸収が抑制されると報告している。今回の調査においても、含鉄資材施用により土壌中の遊離酸化鉄が増加し(図9-3)、土壌溶液中のヒ素濃度が低下したことを確認しており(データ略)、これら既存の報告と同様の結果が認められた。

次に、牧野³⁰⁾によると、F₀、FB、FM施用後初年目に、玄米中無機ヒ素濃度は、無施用区と比較して20~50%低減したと報告している。今回の調査においても、含鉄資材施用区の玄米中無機ヒ素濃度は、無施用区と比較して約30~50%低減し、牧野³⁰⁾の報告と同様の低減効果が認められた。また、玄米中無機ヒ素濃度の低減率は、F₀区>FB区>FM区の順であり、資材として施用した鉄の量が多いほど高くなる傾向にあった。山口³¹⁾によると、玄米中無機ヒ素濃度が高くなる圃場ほど、含鉄資材施用による低減率が高くなる傾向であったことから、玄米中無機ヒ素濃度が十分に低い圃場では、鉄資材施用による同様の低減効果が得られるとは限らないことを留意する必要があると報告している。

含鉄資材施用区における玄米中無機ヒ素濃度の低減効果の持続については、施用4年目(2016年)においても、無施用区と比較して約20~30%低減することが確認された(図10)。含鉄資材別にみると、F₀区の玄米中無機ヒ素濃度については、施用7年目(2019年)および10年目(2022年)においても、無施用区と比較して10%以上の低減効果の持続性を認めることができた(図10)。

FM区の土壌pHについては、無施用区、F₀区およびFB区と比較して施用4年目(2016年)まで有意に高く推移した。土壌pHの上昇については、FMに含まれるアルカリ成分(FM2tで900g m⁻²含有)および可給態ケイ酸(FM2tで300~400g m⁻²含有)の影響によるものと考えられた。F₀やFBについては、アルカリ成分を含まず、可給態ケイ酸を少量含む含鉄

資材(SiO₂1tで0.5~4g m⁻²含有)であり、無施用区と比較して土壌pHの上昇効果は認められなかった。

土壌中の遊離酸化鉄含有量については、2014年~2017年までFB区の方がFM区と比較して約1%高かった(図9-3)、玄米中無機ヒ素濃度の低減率については、FM区の方がやや高い傾向であった(図10)。Seyfferthら³²⁾によると、水稻のヒ素吸収については、ケイ酸供給量が多いほど減少すると報告されている。一方、山口³¹⁾によると、FM区の土壌の可給態ケイ素については、無施用区、FB区、F₀区と比較して増加したが、FMに含まれていたケイ酸成分が玄米中無機ヒ素濃度の低減に直接関与したかは不明であると報告している。今回の試験結果についても、FMに含まれるアルカリ成分および可給態ケイ酸と玄米中無機ヒ素濃度の関連性は、判然としなかった。

玄米中カドミウム濃度については、出穂前後各3週間に湛水管理を行った本調査では無施用区を含む全ての区において非常に低く、定量下限値未満で推移した(データ略)。Makinoら¹¹⁾によると、出穂前後各3週間の湛水管理を実施することにより、硫酸の還元にともない生成する硫化物イオンがカドミウムイオンと反応し、極めて難溶性の硫化カドミウムが生成されることで、水稻へのカドミウム吸収が抑制されると報告している。

玄米収量および品質については、山口³¹⁾の試験結果から無施用区と含鉄資材施用区では同程度と報告されており、本調査においても精玄米重は同程度で、整粒粒比は施用5年目(2017年)のF₀区でやや減少したものの、大きな低下は認められず、同様の傾向が認められた。

これらのことから、玄米中カドミウム濃度が懸念される地域で、出穂前後各3週間の湛水管理と含鉄資材施用の組み合わせにより、水稻の収量および品質について同水準を確保しつつ、玄米中無機ヒ素濃および玄米中カドミウム濃度の同時低減が可能であると考えられた。特に、鉄含有率99%のF₀を水稻栽培前に1,000g m⁻²施用すると、無施用区に対する玄米中無機ヒ素濃度の低減率が施用4年目(2016年)まで約30%認められ、施用10年目(2022年)においても低減率が約10%と持続的な低減効果が認められた。今後は、滋賀県内で流通する含鉄資材の活用、施用時期、施用量、水管理試験との併用による、玄米中無機ヒ素および玄米中カドミウム濃度の低減効果について、費用対効果も考慮し、総合的に検証していく必要があると考えられた。

5. 謝辞

本研究は農林水産省委託プロジェクト研究の「水稻におけるヒ素のリスクを低減する栽培管理技術の開発」(2013~2017年度)、「省力的かつ現場で使い易いコメの無機ヒ素低減技術の開発」(2018~2022年度)により実施したものである。ま

た、とりまとめにあたり、国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境研究部門の板橋直博士、山口紀子博士、中村乾博士、高度分析研究センターの馬場浩司博士には、本稿のご校閲と有益なご助言を頂いた。滋賀県農業技術振興センター環境研究部の諸氏には、多方面からご協力いただいた。ここに記して、感謝の意を表します。

6. 引用文献

- 1) Takahashi, Y., Minamikawa, R., Hattori, KH., Kurishima, K., Kihou., and Yuita, K. 2004. Arsenic behavior in paddy fields during the cycle of flooded and non-flooded periods. *Environ Sci Technol*, **38**, 1038-1044.
- 2) 浅見輝男 2001. データで示す-日本土壌の有害金属汚染, 株式会社アグネ技術センター, 東京: 114-115, 121-129, 138-145, 222-226.
- 3) IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans 2012. Arsenic, metals, fibers, and dusts. Volume 100C. International Agency for Research on Cancer, Lyon. 46-53.
- 4) Codex 2023 一部改変. Codex Alimentarius International Food Standards : 55-56
https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXS%2B193-1995%252FCXS_193e.pdf
- 5) 農林水産省 2024. コメ中のカドミウム及びヒ素低減のための実施指針 : 3-7
https://www.maff.go.jp/j/syuan/nouan/kome/k_cd/attach/pdf/sisin1.pdf
- 6) 滋賀県 2010. 稲作技術指導指針 : 19, 61, 82-84, 174-175.
- 7) Yamaguchi, N., Nakamura, T., Dong, D., Takahashi, Y., Amachi, S., and Makino, T. 2011. Arsenic release from flooded paddy soils is influenced by speciation, Eh, pH, and iron dissolution. *Chemosphere*, **83**, 925-932.
- 8) Ohtsuka, T., Yamaguchi, N., Makino, T., Sakurai, K., Kimura, K., Kudo K., Homma, E., Dong, DT., and Amachi, S. 2013. Arsenic dissolution from Japanese paddy soil by a dissimilatory arsenate-reducing bacterium *Geobacter sp.* OR-1. *Environ Sci Technol*, **47**, 6263-6271.
- 9) 中村 乾 2016. 第33回土・水研究会, 水稻におけるヒ素吸収抑制技術, 4. 水稻のヒ素吸収抑制 (1) 水管理, 国立研究開発法人農業環境技術研究所 : 17-20.
- 10) 中村 乾, 加藤英孝, 牧野知之, 伊藤正志, 本間利光, 鉢巢恒平, 太田黒駿, 西 英輝, 野 雄大, 佐野修司, 原田夏子, 白尾謙典, 松本真悟, 春日純子, 西村誠一, 戸上和樹, 江波戸宗大, 平内央紀, 松森堅治, 長田健二, 望月秀俊, 森 伸介, 原 嘉隆, 藤井はるか, 藤澤春樹, 葉上恒寿, 杉沼千恵子, 関谷尚紀, 中田 均 2018. 出穂期前後の間断灌漑3湛4落による溶存および玄米ヒ素・カドミウム濃度の同時抑制 (1) 間断灌漑が玄米ヒ素・カドミウム濃度および収量・品質に与える影響. 土肥誌講演要旨 **64** : 2
- 11) Tomoyuki, Makino., Ken, Nakamura., Hidetaka, Katou., Satoru Ishikawa., Masashi, Ito., Toshimitsu, Honma., Naruo, Miyazaki., Kunihiko, Takehisa., Shuji, Sano., Shingo, Matsumoto., Aomi, Suda., Koji, Baba., Akira, Kawasaki., Noriko, Yamaguchi., Ikuko, Akahane., Miki, Tomizawa., and Tomohito, Arao. 2016. Simultaneous decrease of arsenic and cadmium in rice (*Oryza sativa L.*) plants cultivated under submerged field conditions by the application of iron-bearing materials, *Soil Science and Plant Nutrition*, **62**, 340-348.
- 12) Toshimitsu, Honma., Hiroto, Ohba., Ayako, Kaneko., Ken, Nakamura., Tomoyuki, Makino., and Hidetaka, Katou. 2016. Effects of soil amendments on arsenic and cadmium uptake by rice plants (*Oryza sativa L. cv. Koshihikari*) under different water management practices. *Soil Science and Plant Nutrition*, **62**, 349-356.
- 13) 農業独立行政法人農業環境技術研究所 2011年3月. 農業環境技術研究所報告第29号, 研究資料, 包括的土壌分類第1次試案 : 50-51.
- 14) 財団法人日本土壌協会 2015. 土壌機能モニタリング調査のための土壌, 水質及び植物体分析法, 大雄社, 東京 : 3-5, 10-17, 9-84, 86-91, 136-139.
- 15) 滋賀県 2003年3月. 土壌, 作物体および水質分析の手引き : 46-47, 72-75.
- 16) Baba, K., Arao, T., Yamaguchi, N., Watanabe, E., Eun, Heesoo., and Ishizuka, M., 2014. Chromatographic separation of arsenic species with pentafluorophenyl column and application to rice. *J. Chromatogr. A*, **1354**, 109-116.
- 17) 滋賀県 2002年3月. 土づくり技術対策指針 : 57.
- 18) 農林水産省 2010年6月16日施行, 農用地の土壌の汚染防止等に関する法律施行令,
<https://laws.e-gov.go.jp/law/346C00000000204>
- 19) 中村 乾, 加藤英孝, 山口紀子, 馬場浩司, 永田 修, 平内央紀, 松森堅治, 長田健二, 望月秀俊, 森 伸介, 葉上恒寿, 諸 人誌, 安藤 薫, 黒野綾子, 日置 雅之, 遠山孝通, 藤井琢馬, 伊藤正志, 太田黒駿, 西川英輝, 本間利光, 中田 均, 野 雄大, 佐野修司, 原田夏子, 松本慎悟, 春日純

- 子 2019. 出穂期前後に 4 日間落水を 3 回行うことによる玄米中ヒ素濃度の抑制. 土肥誌講演要旨 **65** : 2
- 20) 中村 乾, 加藤英孝, 山口紀子, 馬場浩司, 鈴木克拓, 徳田進一, 小林英和, 望月秀俊, 森 伸介, 清水裕太, 白木正俊, 島上卓也, 安藤 薫, 小田紫帆里, 遠山孝通, 藤井琢馬, 伊藤正志, 太田黒駿, 西川英輝, 本間利光, 中田 均, 楠田理恵, 荒川竜太, 藤村澄恵, 松本慎悟, 春日純子 2021. 出穂期前後の圃場を 4 日間連続して乾かす落水処理 2 回による玄米中無機ヒ素低減効果. 土肥誌講演要旨 **67** : 1.
- 21) 農林水産省 2024. コメ中のカドミウム及びヒ素低減のための実施指針 (別添) コメ中のカドミウム及びヒ素低減のための実施指針 (参考情報) : 8, 42
https://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/kome/k_cd/attach/pdf/sisin-2.pdf
- 22) 農林水産省 2019, 2022 改定. コメ中ヒ素の低減対策の確立に向けた手引き : 17.
https://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/kome/k_as/As_tebiki.pdf
- 23) 中村 乾, 加藤英孝, 山口紀子, 馬場浩司, 鈴木克拓, 白木正俊, 佐々木俊祐, 島上卓也, 曾根原寛和, 安藤 薫, 日置雅之, 田中雄一, 遠山孝通, 薄井雄太, 松下みどり, 西川英輝, 土田 駿, 本間利光, 中田 均, 楠田理恵 2024. 出穂期前後に 4 日間連続して圃場を乾かす落水を 1 回行うことによる玄米中無機ヒ素低減効果. 土肥誌 講演要旨 **70** : 3
- 24) 松島省三 1971. イナ作診断と増収技術, 社団法人 農山漁村文化協会, 東京 : 190.
- 25) Yasuhiro, Tsujimoto., Abraham, Fuseini., Baba, I. Y., Inusah., Wilson Dogbe., Mayumi, Yoshimoto., and Minehiko, Fukuoka. 2021. Different effects of water-saving management on canopy microclimate, spikelet sterility, and rice yield in the dry and wet seasons of the sub-humid tropics in northern Ghana, *Field crops research*, **260**, 107978.
- 26) Ken, Nakamura., Hidetaka, Katou., Katsuhiko, Suzuki., and Toshimitsu Honma. 2018. Air-filled porosity as a key to reducing dissolved arsenic and cadmium concentrations in paddy soils, *Journal of Environmental Quality*, **47**, 496-503.
- 27) 滋賀県 2024, しがの農林水産業 : 3.
- 28) Aomi, Suda., Noriko, Yamaguchi., Hayato, Taniguchi., and Tomoyuki, Makino. 2018. Arsenic immobilization in anaerobic soils by the application of by-product iron materials obtained from the casting industry, *Soil Science and Plant Nutrition*, **64**, 210-217.
- 29) Noriko, Yamaguchi., Toshiaki, Ohkura., Atsuko, Hikono., Hiroshi, Yamaguchi., Yohey, Hashimoto., and Tomoyuki, Makino. 2017. Effects of iron amendments on the speciation of arsenic in the rice rhizosphere after drainage, *Soils* 2017, 1, 6; doi:10.3390/soils1010006.
- 30) 牧野知之 2016, 第 33 回土・水研究会, 水稻のヒ素吸収抑制 (2) 吸収抑制資材の利用, 国立研究開発法人農業環境技術研究所 : 21-24.
- 31) 山口紀子 2023. 第 39 回土・水研究会, コメ中無機ヒ素低減対策技術の進展, 2) 資材利用, 資材施用によるヒ素低減への取り組み, 農研機構農業環境研究部門 : 21-27.
- 32) Angelia L., Seyfferth., Matt A. Limmer., and Gretchen E. Dykes. 2018. On the use of silicon as an agronomic mitigation strategy to decrease arsenic uptake by rice, *Advances in Agronomy*, **149** ISSN 0065-2113 49-80.

7. Summary

We evaluated and verified that water-saving management under oxidizing conditions for three weeks each before and after paddy rice heading simultaneously decreased inorganic arsenic and cadmium concentrations in brown rice. Also evaluated was the simultaneous decrease of arsenic and cadmium by combined application of iron-containing materials and subsequent flooding management. Water management of different types practiced under oxidizing conditions was conducted before and after heading of paddy rice as follows: alternate wetting and drying (a cycle of three-day flooding and four-day drainage was repeated); three times drying (four-day drainage was conducted three times during three weeks each before and after heading excluding the heading period); two times drying (as above with two times drying); and one time drying (four-day drainage was conducted once before or during the heading period). Results show that the inorganic arsenic concentration in brown rice decreased by 44-48% when using the different types of water management under oxidizing conditions compared to flooding management, demonstrating that the drainage frequency can be reduced. Furthermore, the cadmium concentration in brown

rice was low irrespective of water management. It was decreased simultaneously. Little difference between the drainage groups and the conventional group was found in either yield or quality of paddy rice. Moreover, iron-containing materials of three types (converter furnace slag (FM), amorphous iron hydroxide (FB) and zerovalent iron (F_0)) were applied once in large quantities ($1,000\text{--}2,000\text{ g m}^{-2}$) to test groups before flooding the paddy field. Then flooding management was conducted for three weeks each before and after heading. Results showed a 30--50% decrease in the inorganic arsenic concentration found in brown rice from the application of iron-containing materials to the third year compared to the untreated group. The decrease ratio was more significant in F_0 . The cadmium concentration in brown rice was below the quantitation limit in all treatment groups, and was decreased simultaneously. The ratio of decrease in the inorganic arsenic concentration in brown rice after application of iron-containing materials tended to decrease over several years. However, it remained at approximately 10% in the tenth year after application of F_0 , exhibiting a continuous decreasing effect. Additionally, despite interannual differences in paddy rice yields, introduction of the iron-containing material application as an ameliorating technology led to no other marked difference from the untreated group, ensuring comparable yield, with a similar trend of quality.

葉面濡れセンサー等を用いたチャ炭疽病の発生予測の検討

松本敏幸*

Investigation of Forecasting of *Discula theae-sinensis* Using the Leaf Wetness Sensor

Toshiyuki MATSUMOTO

キーワード：炭疽病，チャ，発生予測，葉面濡れセンサー

本研究では、葉面濡れセンサーを用いてチャの葉面湿潤時間を推定する手法を検討した。葉面濡れセンサー値が 5.3~6.5 %の時に茶園の葉面湿潤状態が終了することから、葉面濡れセンサー値 6.5 %を基準値とし、それを超える時間をチャの葉面湿潤時間とすることが妥当と考えられた。

また、相対湿度から葉面湿潤時間を算出する方法についても検討したところ、葉面濡れセンサー値から推定した葉面湿潤時間 (h/day) と相対湿度が 82.4 %以上の時間 (h/day) に高い相関がみられ、相対湿度から葉面湿潤時間を推定する回帰式が得られた。

葉面濡れセンサーと湿度センサーから求めた葉面湿潤時間とチャ炭疽病発生の関係について調査したところ、葉面濡れセンサーから求めた葉面湿潤時間と炭疽病発病率の決定係数は高かったが、湿度センサーを用いた場合は決定係数が低く、チャ炭疽病の発生予測には葉面濡れセンサーを利用することが妥当と考えられた。

1. 緒言

チャ炭疽病 (病原菌: *Discula theae-sinensis*) は本県の茶栽培における最も重要な病害の一つである。本病は二番茶期にあたる梅雨期以降に多く発生し、新葉に大型壊死病斑を形成し、罹病葉の落葉による収量低下や収穫物への混入による製茶品質の低下を招く¹⁾。本病の防除は、殺菌剤散布に大きく依存しているが、作業時間やコストの面でも経営を圧迫しているため、発生予測に基づいた効率的な防除が不可欠である。

炭疽病菌の胞子は、茶葉の毛茸上に付着し、適度な水分と温度の条件下で発芽し、進入菌糸を出すことで細胞壁内に侵入し、チャの新芽に感染する²⁾。このように、炭疽病菌の感染には、胞子の存在と適温、植物の表面が濡れている状態が必要であることから、気温と葉面湿潤時間 (植物の表面が濡れている時間) を測定することは、炭疽病の発生予測を行う上で重要と考えられる。また、炭疽病の発生は降雨の有無に大きく左右され、チャの新芽生育期に降雨がなければほとんど発生しないこと³⁾が知られている。過去の研究では、平均気温および葉面湿潤時間のデータを気象観測装置と結露計から取得し、炭疽病の発生予測に活用できることが報告されている^{4), 5)}。この結露計では、葉面が結露する条件では装置内のろ紙も結露して重くなるとみなし、ろ紙の重量の変化で濡れを評価している⁶⁾。しかし、結露計は販売が中止されており、入手可能であったとしてもろ紙の定期的な交換が必要で、

メンテナンスに労力がかかり、継続的な利用が難しい。

近年開発された静電容量型葉面濡れセンサー (Onset 社製 S-LWA-M003) (図 1) は、センサー表面に水滴が付着している面積の割合を計測できる⁷⁾。葉面濡れセンサーはコストが比較的安価で、メンテナンスが容易といった特徴があり、イネいもち病、マンゴー炭疽病等の発生予測への利用が試みられている^{8), 9)}。また、湿度センサーを用いて相対湿度が 90 %を超える時間を測定して、これを植物の葉面湿潤時間として推定する方法が報告されている¹⁰⁾ため、相対湿度から推定した葉面湿潤時間を用いてチャ炭疽病の発生を予測できる可能性がある。

本研究では、葉面濡れセンサーと湿度センサーを用いてチャの葉面湿潤時間を推定する手法を検討した。また、炭疽病の発生予測に資するため、葉面濡れセンサーと湿度センサーから求めた葉面湿潤時間と炭疽病の発生量との関係について検討した。



図 1 葉面濡れセンサー (Onset 社製「S-LWA-M003」)

2. 材料および方法

2.1 葉面濡れセンサーを用いた葉面湿潤時間の測定方法の検討

葉面濡れセンサーを用いて葉面が濡れている状態（葉面湿潤状態）から乾いた状態への変遷点を把握するためには、植物種ごとにセンサーの閾値を設定する必要があるとされている⁷⁾。ここでは、茶園における目視で観察した葉面湿潤状態と葉面濡れセンサー値を比較し、葉面湿潤状態を判断するための葉面濡れセンサー値の閾値について検討した。

試験は、滋賀県農業技術振興センター茶業指導所（滋賀県甲賀市水口町水口 6750）において、2020年の時点に26年生の‘やぶきた’を調査対象樹として実施した。試験で使用した葉面濡れセンサー（Onset社製 S-LWA-M003）は、水平から15°～45°の角度で設置することが推奨されている⁷⁾。また、チャは品種によって受光態勢、すなわち葉身傾斜角度が異なり、本試験に供試した‘やぶきた’の葉身傾斜角度は42.5°であると報告されていることから¹¹⁾、葉面濡れセンサーを葉身傾斜角度とほぼ同じ角度の水平から45°の角度で茶株面の2 cm上に設置した。なお、気温・湿度センサー（Onset社製 S-THB-M002）を自然通風シェルター（Onset社製 RS3-B）内に格納して茶園横に設置し、気温と相対湿度を計測した。これらセンサーは、データロガー（Onset社製 RX3003-00-01）を連結して使用した。葉面濡れセンサー値と気温、相対湿度は10分間隔で計測した。また、比較対象として結露計（北東衝機社製）による葉面湿潤時間も計測した。

茶園における葉面湿潤状態の目視による調査は、2020年の秋芽生育期の9月11日、9月18日、9月23日、10月1日、10月2日、10月7日、10月14日の朝（7時半ごろから開始）に行った。約3.6 m²の樹冠面上の濡れている秋芽20芽について目印を付け、乾いていく状態を継続的に目視で調査することで濡れ芽率（葉に水滴が付着している芽の割合）を求めた。

2.2 湿度センサーを用いた葉面湿潤時間の測定方法の検討

2021年の5月31日～9月30日に試験2.1と同じほ場、同じ方法にて、葉面濡れセンサー値と相対湿度を測定した。葉面濡れセンサーから求めた葉面湿潤時間（h/day）と閾値以上の相対湿度保持時間（h/day）の相関関係を調査し、最も相関係数が高くなる閾値を求め、相対湿度から葉面湿潤時間を推定する回帰式を作成した。なお、相関関係の解析は、センサー計測の1日の範囲を午前12:00～翌日の午前12:00とし、Microsoft Windows用のExcel2021日本語版（以下、Excel）のVBAマクロプログラムを作成し行った。

2.3 各センサーから推定した葉面湿潤時間と炭疽病発病の関係性

2022年4月に、土とピートモスを体積比1:1で充填した鉢に‘やぶきた’苗を定植した1年生鉢植え茶樹を用い、三番茶芽生育期（8月上旬～9月上旬）に次に示す方法で接種試験を実施した。なお、鉢植え茶樹は20鉢を用いた。

供試菌株はCT001株（静岡県島田市分離株）を用いた。供試菌株を200 mLフラスコ内の茶葉培地（茶葉5 gに蒸留水25 mlを加え、滅菌したもの）上で25℃、4週間培養した。培養後に、フラスコに蒸留水を注ぎ、接種に用いる孢子懸濁液1.0×10⁶個/mLを作成し、噴霧接種に用いた。

接種は8月4日、8月5日、8月8日、8月12日、8月18日、8月25日、8月26日、9月5日、9月8日、9月9日に実施した。各接種日に鉢植え茶樹2鉢を供試し、夕方に鉢植え茶樹に孢子懸濁液を噴霧接種し、センサー類を設置している茶園横に静置した。翌日に葉面が乾いたことを確認後、ハウス内に移動した。

接種日の葉面湿潤時間の計測は午前12:00～翌日の午前12:00とし、葉面湿潤状態が翌日午前12:00以降も継続している場合は、葉面湿潤時間に加味した。葉面濡れセンサーを用いた葉面湿潤時間は、3.1の結果をもとに菌接種以後の葉面濡れセンサー値が6.5%を継続して超える最長の期間とした。湿度センサーを用いた葉面湿潤時間（ y ）は、相対湿度が82.4%を継続して超えている最長の期間（ x ）から、次式により求めた。

$$y = 0.861x + 1.69$$

発病の調査は接種後約1か月間実施した。炭疽病は展開もない若い葉にのみ感染可能とされている²⁾ため、鉢植え茶樹の調査する葉は接種時点で新芽上位2葉までとした。1鉢につき20葉調査し、接種日毎に供試した2鉢の平均値から発病葉率を求めた。葉面湿潤時間と炭疽病の発病葉率の関係は、Excelの2次近似曲線を用いた回帰分析を行った。

3. 結果および考察

3.1 葉面濡れセンサーを用いた葉面湿潤時間の測定方法の検討

図2に降雨があった日を含む10月2日から10月5日までの葉面濡れセンサー値と相対湿度の推移を示した。葉面濡れセンサーを設置した秋芽生育期（9月～10月）に、葉面濡れセンサー値は降雨のない日でも1日周期で変動し、昼間には3.5～5.9%の範囲で推移し、夕方から相対湿度が70%程度に上昇するに伴い上昇し、毎夜21時頃から翌朝6時頃には結露により100%程度まで上昇した。また、葉面濡れセンサー値は、降雨に伴い100%近くまで上昇することが確認されたが、雨が止むと相対湿度は高くても急速に低下した。

朝の目視による葉面湿潤状態の調査結果を図3に示した。葉面濡れセンサー値は日出後に急速に低下し、数時間の間

5.3~6.5 %の範囲で上下する。その間に目視によっても葉面が乾いたことが認められ、その時点で葉面湿潤状態の終了とした。7日の調査の内、葉面湿潤状態が終了した時点で葉面濡れセンサーの値が最も高かった6.5%を閾値とし、それを超過する場合を葉面湿潤時間とすることが適当と考えられた。

また、結露計の値は降雨がない場合は変動せず、茶園上に明らかに水滴が付着していても葉面湿潤状態の判定が出ないことが多かった(データ略)。このため、葉面湿潤時間の精度においても結露計を用いることは適切でないと考えられた。

3.2 湿度センサーを用いた葉面湿潤時間の測定方法の検討

2021年の5月31日~9月30日の閾値以上の相対湿度保持時間(h/day)と葉面濡れセンサーから求めた葉面湿潤時間(h/day)の値から直線回帰式を作成し、相対湿度の閾値が0~100の範囲で決定係数(R^2)を求めたところ、閾値が82.4%の時に最も高くなり、この場合の直線回帰式は $y = 0.861x + 1.69$ ($R^2 = 0.851$)であった(図4)。このことから、相対湿度から葉面湿潤時間を推定する場合、相対湿度が82.4%以上の時間(h/day)の値をこの回帰式に当てはめ、算出することが適当と考えられた。

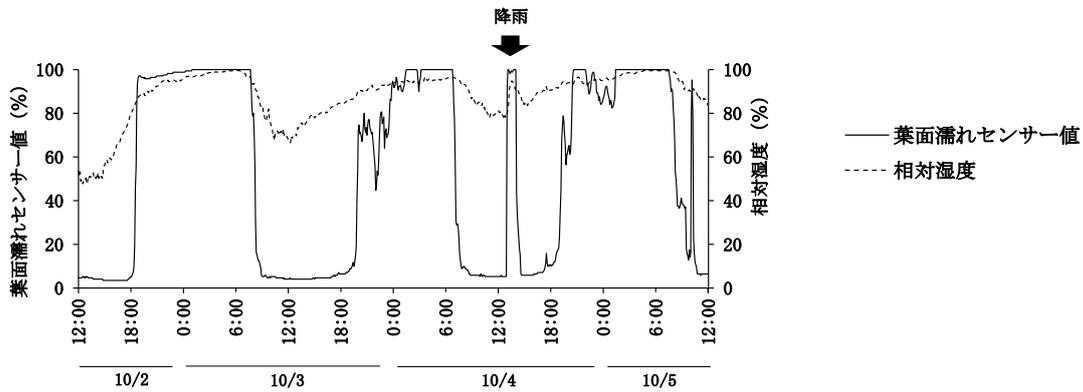


図2 無降雨期間の葉面濡れセンサー値と相対湿度の推移 (2020年10月2日~10月5日)

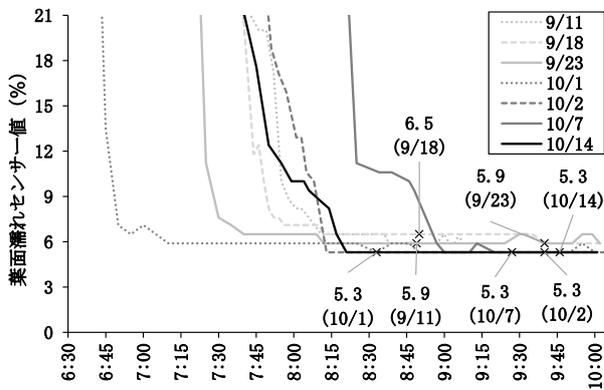


図3 早朝の葉面濡れセンサー値の推移 (2020年)

注) ×は観察調査による葉面湿潤状態の終了タイミングを示す。複数回の観察調査の中で、葉面湿潤状態が終了した時点の葉面濡れセンサー値が最も高い6.5%を、葉面濡れセンサーの閾値とした。

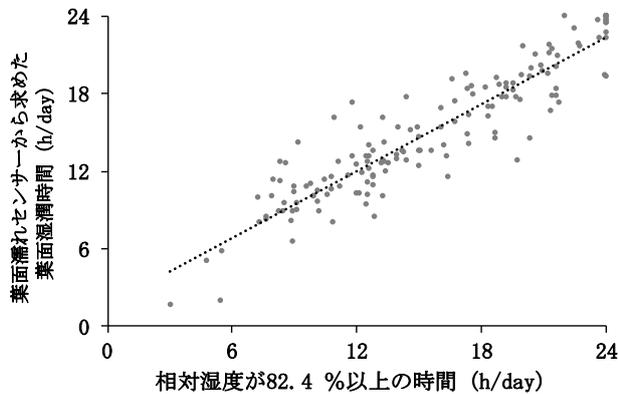


図4 相対湿度が82.4%以上の時間と葉面濡れセンサー値から求めた葉面湿潤時間の関係 (2021年)

注) 葉面濡れセンサーで求めた葉面湿潤時間は葉面濡れセンサー値>6.5%の時間。
2021年5月31日~9月30日の期間のデータから直線回帰式を作成した。
 $y = 0.861x + 1.69$ ($R^2 = 0.851$). $n=153$.

3.3 各センサーから推定した葉面湿潤時間と炭疽病発病の関係性

葉面濡れセンサーと湿度センサーから推定した接種日の葉面湿潤時間と、接種21日後の発病株率を比較した結果を図5に示した。葉面濡れセンサーを用いた場合には、葉面湿潤時間が長くなると発病率が増加する傾向がみられた。

葉面濡れセンサーから求めた葉面湿潤時間の最小値は13.8時間、最大値は18.1時間であり、葉面湿潤時間と発病率の決定係数 (R^2) は0.527であった。また、葉面濡れセンサーの閾値を10.0、15.0、20.0に変えた場合、葉面湿潤時間と発病率の決定係数 (R^2) はそれぞれ0.226、0.165、0.154となり、閾値が高くなるほど決定係数が低くなる傾向がみられた。このことから、葉面濡れセンサーを用いる場合は、ほ場で茶園の状態を観察し、葉面湿潤状態の閾値を可能な限り厳密な値で設定することが重要と考えられた。

一方で、湿度センサーから求めた葉面湿潤時間の最小値は12.2時間、最大値は20.1時間であった。葉面湿潤時間と発病率の決定係数 (R^2) は0.290であり、葉面濡れセンサーを用いた場合と比較して決定係数が低かった。イネいもち病においても、湿度センサーと比較して葉面濡れセンサーを用

いた方が、葉面湿潤時間と葉いもち病斑数の決定係数が高いことが報告されており⁶⁾、今回も同様の傾向が認められた。

以上のことから、葉面濡れセンサー値から求めた葉面湿潤時間と炭疽病発病率の決定係数は高く、葉面濡れセンサーはチャ炭疽病の発生予測に活用可能と考えられた。一方で、湿度センサーを用いた場合は決定係数が低く、チャ炭疽病の発生予測に活用する際には葉面濡れセンサーの利用が適当と考えられた。筆者はこれまでに、炭疽病菌を気温22℃以上で接種すると発病することを確認しているが^{1,2)}、本試験の接種日の平均気温は23.1~28.0℃であったため、感染に好適な範囲での試験であったと推測される。本試験における解析には接種時の葉面湿潤時間以外は考慮に入れておらず、単年度の試験であるため、さらなるデータの蓄積が必要である。

本試験では‘やぶきた’の葉身傾斜角度に合わせた葉面濡れセンサーの設置角度にしているが、チャは品種によって受光態勢が異なるため¹¹⁾、葉面濡れセンサーの設置方法は品種を考慮する必要がある可能性がある。また、今回の試験は鉢植え茶樹で実施しており、実際の茶園と異なる条件下での試験であるため、栽培現場における適合性の検討は今後の課題である。

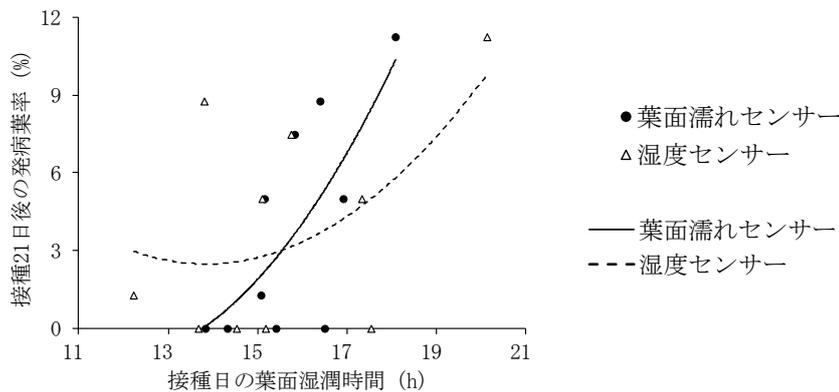


図5 葉面湿潤時間と炭疽病発病率の関係 (2022年)

注) 発病率には接種21日後に調査した。n=10。

葉面濡れセンサーの近似曲線は $y = 0.280x^2 - 6.50x + 36.5$ ($R^2 = 0.527$)。

湿度センサーの近似曲線は $y = 0.186x^2 - 5.15x + 38.1$ ($R^2 = 0.290$)。

4. 謝辞

本試験の遂行にあたり、供試菌株を分譲頂いた国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構植物防疫研究部門の山田憲吾博士に厚く御礼申し上げる。滋賀県農業技術振興センター茶業指導所の当時の所長であった西野英治氏・志和将一博士をはじめ、同指導所の各位にはほ場管理、調査に多大なるご協力と貴重な助言をいただいた。また、伴和美氏には調査および分析の補助をいただいた。ここに記して深謝の意を表する。

5. 引用文献

- 1) 山田憲吾(2020)：チャ病害の発生生態と防除。植物防疫, 74, 44-48.
- 2) 岩浅潔(1994)：茶の栽培と利用加工, 272.
- 3) 吉田克志・山田憲吾・園田亮一(2011)：チャにおける炭疽病・輪斑病複合抵抗性品種‘さえあかり’を基幹とした病害防除。植物防疫, 65, 202-205.
- 4) 静岡県経済産業部(2010)：パソコンで利用できるチャ炭疽病防除支援システムの開発。あたらしい農業技術, 542,

- 1-8.
- 5) 和田義彦(1999)：チャの炭疽病の発生予測と防除方法. 滋賀県農林水産試験研究主要成果.
- 6) 橋本 晃 (1976)：イネいもち病菌の感染と水滴. 植物防疫. 30, 264-268.
- 7) Onset Computer Corporation (2011)：Leaf Wetness Smart Sensor (S-LWA-M003) Manual. 1-2
- 8) 菅原直人・小林 隆・長谷 修 (2021)：葉面濡れセンサーを用いた葉いもちの発生予察. 生物と気象, 21, 74-80.
- 9) 澤岨哲也 (2013)：施設マンゴーにおける炭疽病菌 *Colletotrichum gloeosporioides* の感染に及ぼす付着器形成と葉濡れ時間との関係. 沖縄農研セ研報, 8, 25-29.
- 10) Sentelhas P, Marta A, Orlandini S, Santos E, Gillespie T, Gleason M (2008)：Suitability of relative humidity as an estimator of leaf wetness duration. Agricultural and Forest Meteorology, 148, 392-400.
- 11) 田中淳一 (2011)：チャ品種・系統における葉身傾斜角度と収量性との関係. 育種学研究, 13, 89-98.
- 12) 松本敏幸(2023)：葉面濡れセンサーを利用したチャ炭疽病感染好適日の推定とその防除方法. 滋賀県農林水産試験研究主要成果.
<http://www.pref.shiga.lg.jp/file/attachment/5396047.pdf>

6. Summary

In this study, a method for estimating the leaf wetness period of tea plants using a leaf wetness sensor was evaluated. The leaf wetness state in the tea fields ended when the leaf wetness sensor value was between 5.3% and 6.5%. Therefore, using a leaf wetness sensor value of 6.5% as the threshold was considered appropriate and the time exceeding this threshold was defined as the leaf wetness period.

Additionally, a method for estimating the leaf wetness period in tea plants using a relative humidity sensor was evaluated. A high correlation was found between the leaf wetness period estimated from the leaf wetness sensor values (h/day) and the time when the relative humidity was 82.4% or higher (h/day), resulting in a regression equation for estimating the leaf wetness period using relative humidity.

The relationship between the leaf wetness period calculated using leaf wetness sensors, humidity sensors, and anthracnose occurrence was examined. The coefficient of determination between the leaf wetness period calculated using the leaf wetness sensors and the anthracnose incidence rate was high; however, the coefficient of determination was low when using humidity sensors. Therefore, the use leaf wetness sensors is considered appropriate to predict the occurrence of anthracnose in tea plants.

滋賀県の秋植タマネギでのネギアザミウマ防除による 内部りん片の細菌性腐敗病害の発病抑制

北野大輔*・増田倫士郎**・近藤 篤・小久保信義・小幡善也***

Reduction in bacterial rot of internal scales of autumn-planted onions
by controlling onion thrips *Thrips tabaci* in Shiga Prefecture

Daisuque KITANO, Rinshiro MASUDA, Atsushi KONDO, Nobuyoshi KOKUBO and Yoshiya OBATA

キーワード : *Burkholderia cepacia*, オオムギ間作, 総合的病害虫管理, 土着天敵, バクテリア, 発消長

滋賀県の秋植タマネギでは, *Burkholderia* 属細菌が主な原因である細菌性腐敗病害が発生している. 本研究では, タマネギの重要害虫であるネギアザミウマの防除適期を示すとともに, その防除によって, 外観からの判別が困難なりん茎内部のりん片に発生する腐敗症状を抑制できるか検討した. 2021~2023年に実施した秋植タマネギ圃場でのトラップ調査では, 4月下旬から5月上旬の間にネギアザミウマの誘殺数が増加したことから, ネギアザミウマの防除適期は4月20日頃と考えられた. 殺虫剤の散布によりネギアザミウマの個体数が無防除区の6~15%に抑制された結果, 内部のりん片に腐敗症状は発生しなかった. また, オオムギを間作し土着天敵を利用した生物的防除を実施した結果, ネギアザミウマの個体数と内部のりん片の腐敗率はそれぞれ, 無防除区の50%と25%に抑制されたが, ネギアザミウマを抑制した主要な天敵は明らかにならなかった. いずれの試験区でも, 最外部のりん片の腐敗率に明確な差はみられなかったことから, ネギアザミウマの防除は内部のりん片に発生する腐敗症状の抑制効果が高いと考えられた. アザミウマを防除した区でタマネギ球重が低くなることがあったが, 球重の低下による減収は腐敗率の抑制によって補償された. 病害虫の防除に加え, 発病を抑える剪葉作業や低温での貯蔵を組み合わせた総合的な防除体系を構築することで, より効果的に発病を抑制できる可能性がある.

1. 緒言

植食性昆虫類, 特に, 害虫類に分類される種は, 吸汁・摂食によって作物の減収や品質低下といった影響をもたらすだけでなく, 植物の病原となる微生物の伝搬にも関係する場合がある. 例えば, ウイルスの伝搬においては節足動物が最も寄与していると指摘されており¹⁾, ウイルスを獲得し体内に保毒している媒介者の加害により植物にウイルスが伝搬する. 体内に保毒した病原の直接的な伝搬だけでなく, 間接的な伝搬に関与する場合もあり, 害虫類の加害部が侵入口となり病原に感染する伝搬経路^{2, 3)}も報告されている. 病原の伝搬に害虫類が関与する場合, 害虫類の防除の実施により発病を抑制できることがある^{4, 5)}ため, 病害だけでなく害虫の防除を

組み合わせた防除体系が効果的になりうる.

滋賀県の農地における水田率は93%であり⁶⁾, 土地利用型作物である水稲, 麦および大豆を中心とした水田農業が展開されている一方で, 近年は高収益作物としての水田野菜の栽培が拡大している. 水田野菜の重点品目の一つとしてタマネギの栽培が推進されており, 作付面積は2012年の40 haから2022年には97 haに増加している⁷⁾. 本県におけるタマネギ栽培は, 9月に播種した苗を11月に定植し, 翌年6月頃に収穫する秋植えの作型が主体である.

滋賀県内のタマネギ栽培において, りん茎での細菌性腐敗病害の発生が問題となっており, 廃棄や出荷先からのクレームにつながっている. 本県で発生する細菌性腐敗病害の主な原因は, *Burkholderia cepacia* (Palleroni and Holmes) を

*Corresponding author・農政水産部農政課, **農政水産部みらいの農業振興課, ***湖北農業農村振興事務所
2025年3月28日受付, 8月28日受理

主体とする3種の *Burkholderia* 属細菌による腐敗病もしくはりん片腐敗病である⁸⁾。腐敗症状は収穫後の貯蔵中に発病するだけでなく、圃場で既に発病している場合もあるが、りん茎内部のりん片の腐敗症状は外観から判別できず、収穫から出荷までの間に選別することが困難である。そのため、外観での判別が困難である内部のりん片に発生する腐敗症状は、その抑制の必要性が特に高いと考えられる。

腐敗症状の抑制のためには、効果的な殺菌剤の施用と収穫後の貯蔵における適切な温度管理が重要と考えられる。一方で、タマネギ葉上に発生するネギアザミウマ *Thrips tabaci* Lindeman が腐敗症状の発生に関係しているという報告が多数ある。例えば、東北地方の春植え作型のタマネギにおける腐敗症状の発病割合とネギアザミウマの発生量には正の相関が認められており⁵⁾、殺虫剤を散布することによって発病が抑制される^{5, 9)}。また、*Burkholderia* 属細菌と同様に腐敗症状の原因となる *Pantoea* 属細菌はネギアザミウマが体内に保菌しており¹⁰⁾、ネギアザミウマの食害痕からタマネギの組織内に侵入すると考えられている³⁾。しかし、これらの報告では、ネギアザミウマの発生とりん茎内での腐敗症状の発病場所との関係は明らかでない。ネギアザミウマが主に加害する部位は柔らかい新芽や新葉などであり¹¹⁾、タマネギでは葉身部中央の新葉に多く寄生している。タマネギ圃場において、内部のりん片につながる葉身の腐敗がしばしば観察されることから、ネギアザミウマが新葉を加害することで、主に内部のりん片における腐敗症状の発病を助長している可能性がある。

そこで本研究では、ネギアザミウマの防除がタマネギ内部のりん片に発生する腐敗症状の発病抑制に効果的であると仮説を立て、両者の関係を調査するための試験を実施した。まず、殺虫剤散布によるネギアザミウマの散布適期を知るため、トラップ調査によってタマネギ圃場におけるネギアザミウマの発消長を明らかにした。次に、化学的もしくは生物的防除によってネギアザミウマを防除し、タマネギの内部りん片で発病する腐敗症状の抑制および球重への影響を検討した。

2. 材料および方法

2. 1 調査圃場の耕種概要

Table 1 Calendar of onion cultivation

| Study year | Paddy No. | Planting area (a) | Sowing | Planting | Harvest |
|------------|-----------|-------------------|---------------|---------------|---------------|
| 2021 | 145 | 2.3 | Sep. 15, 2020 | Dec. 1, 2020 | Jun. 9, 2021 |
| 2022 | 145 | 2.3 | Sep. 16, 2021 | Nov. 18, 2021 | Jun. 7, 2022 |
| 2023 | 130 | 4.0 | Sep. 14, 2022 | Nov. 15, 2022 | Jun. 13, 2023 |
| | 431 | 2.5 | Sep. 14, 2022 | Nov. 22, 2022 | Jun. 13, 2023 |

調査圃場は、当センター（滋賀県近江八幡市安土町大中：35°10' 28"N, 136°07' 42"E）の130号田、145号田および431号田であった。130号田と145号田は農道を挟んで隣接しているが、431号田は他の2圃場からおよそ300 m北側に位置している。定植前日までに基肥を10-20-10 kg / 10 a (N-P₂O₅-K₂O) 施用し、耕耘および畝幅150 cmの畝立てを行った。定植後、2月中旬と3月中旬に追肥を行った。計13-8-11 kg / 10 a (N-P₂O₅-K₂O) の施用となるように、それぞれの追肥時に半量ずつ施用した。

各調査圃場の播種、定植および収穫日をTable 1に示す。供試したタマネギの品種は‘もみじ3号’であり、種子を448穴の育苗トレイに播種した後、野外網室内の底面給水装置を用いておよそ2か月間育苗した。定植は11月中旬から12月上旬の間に行い、栽植密度は株間10 cm、条間20 cmの4条植であった。栽培期間中に除草剤を適宜散布したが、同一圃場内の全区に一律に散布したため、後述する調査の結果には影響しないと考えられた。定植した翌年の6月にタマネギを収穫した。

2. 2 トラップによるネギアザミウマの発消長調査

殺虫剤散布によるネギアザミウマの防除適期を決定するために、トラップを用いてタマネギ圃場におけるネギアザミウマの発消長を調査した。タマネギ圃場内に設置した園芸用ポールに青色粘着トラップ（ホリバーブルー、アリスタ ライフサイエンス株式会社、東京）を固定した。トラップの高さは、上端が地上60 cmの位置になるように調整した。

2021年と2022年は145号田に3基、2023年は431号田に2基のトラップを設置した。各年の4月1日から6月1日の間、3~7日間隔でトラップを交換し、誘殺されたアザミウマ類の個体数を計数した。また、2023年は、誘殺されたアザミウマ類におけるネギアザミウマの出現割合を調査するため、トラップあたり最大40個体のアザミウマ類をランダムに抽出し、実体顕微鏡下で観察して種を同定した。種の同定は日本植物防疫協会¹²⁾に従った。

2. 3 ネギアザミウマ防除が細菌性腐敗病害の発生と球重に与える影響

ネギアザミウマの防除がタマネギの腐敗症状の発生と球重に与える影響を検証するために、化学的防除（殺虫剤の散布）

もしくは生物的防除(オオムギの間作による土着天敵の保護・強化)によってネギアザミウマを防除した。

2. 3. 1 ネギアザミウマの防除

2. 3. 1. 1 化学的防除

化学的防除では、2022 年に 145 号田で 120 株を 1 反復として計 3 反復、2023 年に 130 号田で 80 株を 1 反復として計 4 反復の防除区を設けた。それぞれに同じ反復数の無防除区を設け、圃場内に各反復をランダムに配置した。タマネギにおけるネギアザミウマの発生量を調査した先行研究では、早い場合には 4 月下旬から発生量が増加する¹³⁾との報告があること、また、後述する結果のとおり、本県においてもネギアザミウマの発生量は 4 月下旬以降に増加したことから、本虫の防除は 4 月 20 日頃から実施することが望ましいと考えられた。さらに、タマネギ栽培でのネギアザミウマ防除のための適切な殺虫剤散布間隔は 10~15 日間隔とされる¹⁴⁾。よって、2022 年は 4 月 18 日にシアントラニリプロール 10.3%水和剤、5 月 7 日にアセフェート 50.0%水和剤および 5 月 24 日にフルキサメタミド 10.0%乳剤を散布した。2023 年は 4 月 14 日と 5 月 16 日にプロチオホス 45.0%乳剤、5 月 6 日にフロメトキン 10.0%乳剤および 5 月 24 日にスピネトラム水和剤 12.0%を散布した。希釈濃度はタマネギのアザミウマ類もしくはネギアザミウマに登録のある常用濃度とし、展着剤として 27.0%ポリアルキレングリコールアルキルエーテルもしくは 22.5%ジオクチルスルホコハク酸ナトリウム・50.0%ポリオキシエチレンアルキルエーテルを 10,000 倍で加用した。2023 年の試験では軟腐病の発生を予防するため、オキシリニック酸 20.0%水和剤 (1,000 倍希釈) を 5 月 6 日に全区に散布した。なお、本試験の実施時、本剤では腐敗病もしくはりん片腐敗病のいずれも登録されていなかったが、2024 年 10 月にりん片腐敗病が登録された。

化学的防除の効果を確認するため、タマネギの中心 3 葉に発生していたネギアザミウマの個体数を記録した。調査日は直前の殺虫剤散布から 1 週間以上経過した日とし、2022 年は 5 月 13 日に計 40 株 / 区で、2023 年は 5 月 15 日に計 78~79

株 / 区で調査した。

2. 3. 1. 2 生物的防除

生物的防除として、オオムギの間作で保護・強化が見込まれる土着天敵によるネギアザミウマ密度抑制効果を調査した。キャベツやタマネギなど、野菜類の圃場にオオムギを間作することで、土着天敵が保護・強化され、アザミウマ類を含む害虫類の密度が抑制されることが知られている¹⁵⁾。オオムギの間作による防除は、2023 年に 431 号田で 240 株を 1 反復として計 2 反復実施した。同数の無防除区を設け、2 種類の区が交互になるように、区間を 2.5 m 離して配置した。間作に用いたオオムギの品種は‘てまいらず’であった。2023 年 3 月 17 日に、定植場所を囲むようにタマネギから 1 m の位置にオオムギを条播きした。播種幅を 10 cm とし、播種量が 10 kg / 10 a になるように計量し播種した。栽培期間を通して、殺虫剤は散布しなかった。

2023 年 5 月 9 日に、計 40 株 / 区のタマネギの中心 3 葉に発生していたネギアザミウマの個体数を記録した。また、オオムギに発生する天敵の量を把握するために、捕虫網(口径: 36 cm, 網目サイズ: 約 0.2 mm)を用いた払い落とし調査を行った。オオムギを棒で叩き、昆虫類を捕虫網内に落とすようにして採集した。調査は計 30 株 / 区のオオムギで実施した。目視で容易に観察でき、アザミウマ類の天敵として知られているヒメハナカメムシ類 *Orius* spp. を主な対象として計数した。

2. 3. 2 腐敗症状の有無と球重

収穫時、タマネギの葉鞘を 2 cm 残して切り取り、根も除いた。通風性のあるプラスチック製コンテナにりん茎を入れ室内に置き、送風機で 60 m³ / h の風を当てながら 3 日間乾燥させた。乾燥後、20℃と暗条件に設定した室内でおよそ 1 か月間保管した。

保管後、各区からランダムに選んだ 78~140 球のりん茎を垂直方向に切断し、腐敗症状の発病の有無を記録した。切断前に外観の観察もしくは触診で判別できないりん茎内側のり



Fig. 1 Bacterial rot in (a) internal or (b) external scale (arrows) of onion bulbs

ん片の発病を内部腐敗 (Fig. 1a), 最外部のりん片で発病した判別可能な腐敗症状を外部腐敗 (Fig. 1b) とした。最後に、球重 (g) を計測した。2023 年の化学的防除の試験では、腐敗症状の発病の有無を調査したりん茎全てを計測した。2022 年の試験では発病を調査した 100 球のうち 40 球を、2023 年の生物的防除の試験では 140 球のうち 130 球のりん茎をランダムに抽出して計測した。

2. 4. 3 統計解析

2023 年のトラップ調査におけるアザミウマ類の誘殺数とネギアザミウマ出現割合に相関関係がみられるかを、Spearman の順位相関係数を求めて評価した。防除区と無防除区のタマネギ圃場におけるネギアザミウマの発生量は、Mann-Whitney の *U* 検定で比較した。貯蔵後のタマネギ腐敗率は、Fisher の正確確率検定を用いて内部腐敗と外部腐敗それぞれで比較した。球重は、Welch の *t* 検定で比較した。以上の解析には、ソフトウェア R ver. 4.2.3¹⁶⁾ を使用した。

3. 結果

3. 1 ネギアザミウマの発生消長

各年の 4 月 1 日からタマネギ圃場に設置した青色粘着トラップには、いずれの調査年も 1 回目の回収時からアザミウマ類が誘殺された (Fig. 2)。2021 年は 5 月 10 日回収、2022 年は 4 月 28 日回収、2023 年は 5 月 1 日回収時から誘殺数が著しく増加し、10 個体 / 日 / トラップ以上が誘殺された。その後、誘殺数は高いまま推移した。

2023 年のトラップ調査で誘殺されたアザミウマ類の種を同定した結果、最も出現割合が高かったのはヒラズハナアザミウマ *Frankliniella intonsa* (Trybom) であり、次いでネギアザミウマの出現割合が高く (Table 2)、これら 2 種で誘殺数の 88.2~100% を占めた。ネギアザミウマの出現割合は 3.8~33.3% の範囲で変動したが、出現割合とアザミウマ類の誘殺数の間に有意な相関関係はみられなかった (Spearman の順位相関係数: $r = -0.14$, $p = 0.68$)。これら 2 種類以外に、キイロハナアザミウマ *Thrips flavus* (Schrank)、コスモスアザミウマ *Microcephalothrips abdominalis* (Crawford)、ミナミキイロアザミウマ *Thrips palmi* Karny ならびにイネアザミウマ *Stenchaetothrips biformis* (Bagnall) が誘殺された。

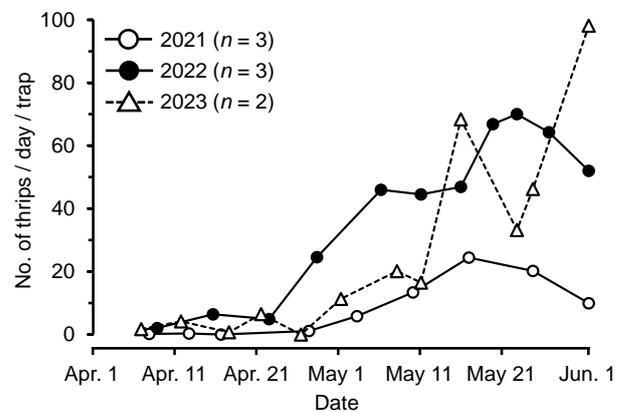


Fig. 2 Occurrence of thrips trapped on blue sticky traps in autumn-planted onion fields

Table 2 Species composition of thrips trapped on blue sticky traps in autumn-planted onion fields

| Date | n | No. of individuals | | | % of <i>T. tabaci</i> | | |
|-------|------|--------------------|-------------------|-------|-----------------------|------|------|
| | | <i>T. tabaci</i> | <i>F. intonsa</i> | Other | | | |
| April | 6 | 17 | 1 | 14 | 2 | 5.9 | |
| | 11 | 38 | 4 | 32 | 2 | 10.5 | |
| | 17 | 9 | 3 | 6 | 0 | 33.3 | |
| | 21 | 36 | 4 | 31 | 1 | 11.1 | |
| | 26 | 0 | — | — | — | — | |
| May | 1 | 40 | 4 | 33 | 3 | 10.0 | |
| | 8 | 40 | 6 | 30 | 4 | 15.0 | |
| | 11 | 40 | 6 | 34 | 0 | 15.0 | |
| | 16 | 80 | 3 | 75 | 2 | 3.8 | |
| | 23 | 80 | 7 | 69 | 4 | 8.8 | |
| | 25 | 79 | 8 | 66 | 5 | 10.1 | |
| | June | 1 | 80 | 15 | 58 | 7 | 18.8 |

3. 2 ネギアザミウマ防除が細菌性腐敗病害の発生と球重に与える影響

3. 2. 1 各防除方法によるネギアザミウマ発生量の抑制

3. 2. 1. 1 化学的防除

殺虫剤の散布により、タマネギ葉上のネギアザミウマの発生量が抑制された。2022 年の個体数は無防除区で 14.5 ± 8.6 個体 (平均値 \pm S. D.), 防除区で 0.9 ± 1.4 個体であった (Fig. 3a)。2023 年は無防除区で 23.9 ± 20.6 個体, 防除区で 3.5 ± 7.0 個体であり (Fig. 3b), 無防除区でのばらつきが大きく, 80 個体以上発生していた株があった。いずれの調査年も防除区では半数以上の株で発生がみられず, 個体数は防除区で有意に少なかった (Mann-Whitney の U 検定: 2022 年, $U = 1,583, p < 0.001$; 2023 年, $U = 5,544, p < 0.001$)。

3. 2. 1. 2 生物的防除

無防除区でのネギアザミウマ個体数は 24.4 ± 18.1 個体であったのに対して, オオムギを間作した防除区では 12.2 ± 9.0 個体に抑制された (Fig. 3c)。防除区での個体数の最

小値は 1 個体であり, 全ての株にネギアザミウマが発生していたが, 個体数は防除区で有意に少なかった (Mann-Whitney の U 検定, $U = 1,159, p < 0.001$)。

オオムギ計 30 株で払い落とし法によって天敵類の発生量を調査した結果, ヒメハナカメムシ類の成虫 2 個体と幼虫 2 個体を採集した。また, アザミウマ類を捕食するヒラタアブ類の幼虫¹⁷⁾ を払い落とし調査で採集したことに加えて, タマネギの葉上での発生も観察した。ヒラタアブ類幼虫の個体数は記録しなかったが, 払い落とし調査による採集個体とタマネギ葉上で観察した個体を合わせても 10 個体未満と少なかった。調査時のオオムギの草丈はおおよそ 25 cm であった。

3. 2. 2 腐敗率と球重

収穫 1 か月後の腐敗率を Table 3 に示す。殺虫剤の散布でネギアザミウマを防除した場合, 2022 年の内部腐敗の発生は無防除区で 1.0%のみ, 防除区で 0%であり, 同様に外部腐敗も発病が少なく (Table 3a), ネギアザミウマ防除の有無と腐敗率に明確な関係はみられなかった (Fisher の正確確率検定: 内部腐敗, $p = 1$; 外部腐敗, $p = 0.44$)。2023 年の内部腐敗

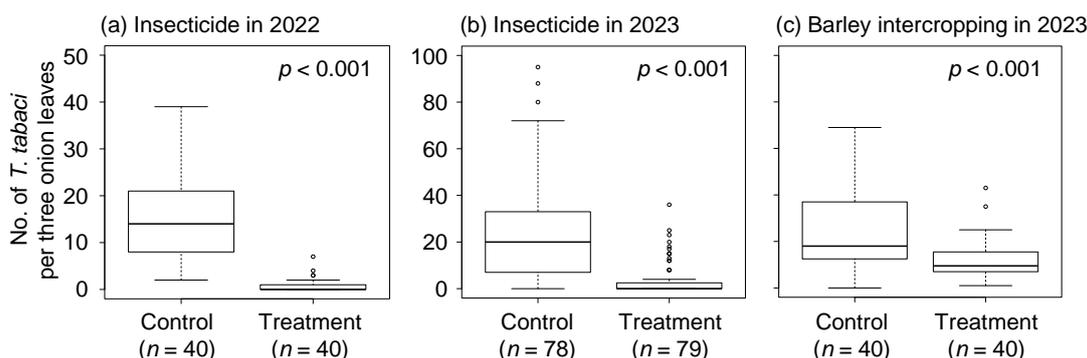


Fig. 3 Number of *Thrips tabaci* occurring per three onion leaves, cultivated using insecticides or barley intercropping control methods. Bars represent the maximum and minimum values within 1.5 times the width of the box from lower or upper quartile. The heavy line in the box represents the median. Round symbols denote outliers. The p -values indicate the results of Mann-Whitney's U -test.

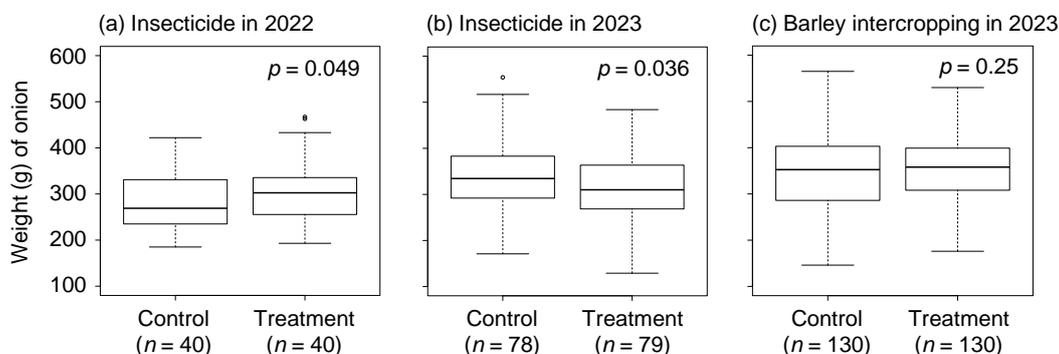


Fig. 4 Weight of onions cultivated using insecticides or barley intercropping control methods. The configuration of this figure is the same in Fig. 3. The p -values indicate the results of Welch's t -test.

Table 3 Numbers and proportions of bacterial rots on onions studied one month after harvest for (a) chemical control and (b) biological control

(a) Chemical control

| Study year | Treatment | <i>n</i> | No. of bacterial rots | | | % of rots ¹⁾ | |
|------------|-------------|----------|-----------------------|-------------|----------------|-------------------------|----------------|
| | | | Internal scale | Both scales | External scale | Internal scale | External scale |
| 2022 | Control | 100 | 1 | 0 | 5 | 1.0 | 5.0 |
| | Insecticide | 100 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2.0 |
| 2023 | Control | 78 | 6 | 1 | 11 | 9.0 | 14.1 |
| | Insecticide | 79 | 0 | 0 | 7 | 0** | 8.9 |

(b) Biological control

| Study year | Treatment | <i>n</i> | No. of bacterial rots | | | % of rots ¹⁾ | |
|------------|----------------------|----------|-----------------------|-------------|----------------|-------------------------|----------------|
| | | | Internal scale | Both scales | External scale | Internal scale | External scale |
| 2023 | Control | 140 | 14 | 4 | 4 | 12.9 | 5.7 |
| | Barley intercropping | 140 | 5 | 0 | 3 | 3.6** | 2.1 |

¹⁾ “ ** ” denotes that percentage of bacterial rots was significantly lower than in the controls (Fisher’ s exactly test; $p < 0.01$).

の発生は無防除区で9.0%、防除区で0%であり (Table 3a)、腐敗率は有意に低下した ($p = 0.006$)。一方で、外部腐敗の発生は無防除区で14.1%であり、防除区では8.9%と減少する傾向がみられたが、両者に有意差はなかった ($p = 0.33$)。オオムギの間作でネギアザミウマを防除した場合、内部腐敗の発生は無防除区で12.9%、防除区で3.6%であり (Table 3b)、腐敗率は有意に低下した ($p = 0.008$)。外部腐敗の発生は無防除区で5.7%、防除区では2.1%であり、防除区で低下する傾向がみられたが、有意差はなかった ($p = 0.22$)。

タマネギの球重は調査年や防除法によって傾向が異なった。殺虫剤の散布でネギアザミウマを防除した2022年の球重は無防除区で 276.9 ± 60.4 g (平均値 \pm S. D.)、防除区で 305.5 ± 67.7 g であり (Fig. 4a)、防除区で有意に重かった (Welch の t 検定, $t = 1.99$, $df = 77$, $p = 0.049$)。一方で、2023年は無防除区で 338.9 ± 78.3 g、防除区で 312.2 ± 78.9 g であり (Fig. 4b)、防除区の球重が有意に低かった ($t = -2.11$, $df = 155$, $p = 0.036$)。オオムギの間作でネギアザミウマを防除した試験での球重は、無防除区で 346.1 ± 85.8 g、防除区で 357.2 ± 69.6 g であり (Fig. 4c)、防除の有無で有意差はみられなかった ($t = 1.15$, $df = 248$, $p = 0.25$)。

4. 考察

4. 1 滋賀県の秋植タマネギにおけるネギアザミウマ防除

2023年のトラップ調査においてアザミウマ類の誘殺数とネギアザミウマの出現割合に明確な相関関係はみられなかった。そのため、2021～2023年のトラップ調査における誘殺数をネギアザミウマの発生消長とみなし、防除適期の判断に用いることができると考えられた。ネギアザミウマの誘殺数は早い年には4月下旬から増加したため、殺虫剤の散布による防除を実施する場合、誘殺数増加前の4月20日頃が1回目の防除適期と考えられた。実際に、この適期を参考にして2022～2023年に防除を実施した結果、防除区では半数以上の株でネギアザミウマが発生せず、高い防除効果が得られたと判断できる。

ネギアザミウマが増加し始める時期は地域によって異なる場合があり、香川県の秋植タマネギでは滋賀県と同様に4月下旬～5月上旬にかけて発生量が増加する¹³⁾が、より冷涼な宮城県では5月中下旬から増加する¹⁸⁾。また、本研究では11月15日以降にタマネギを定植したが、より早い時期に定植した場合、秋季の間に飛来したネギアザミウマがタマネギ上で越冬し、3月から幼虫が発生し個体数が増加することがある¹³⁾。気象条件や定植時期によっては増加時期が前後する可能性があるため、地域・栽培暦を考慮して防除適期を判断する必要がある。

生物的防除であるオオムギの間作による土着天敵の利用では、防除区でのネギアザミウマの個体数は無防除区のおよそ50%に抑制された。オオムギの間作では、オオムギが物理的な障壁となってネギアザミウマの侵入を防ぐ効果は小さく¹⁹⁾、オオムギの栽培により保護・強化された土着天敵がネギアザ

ミウマ個体数抑制の主要因と考えられる。しかし、本研究で観察したヒメハナカメムシ類やヒラタアブ類幼虫の個体数は少なく、これらがネギアザミウマ抑制の主要種となっているかは不明である。これら 2 種の他には、肉食性ゴミムシ類⁵⁾、キイカブリダニ *Gynaeseius liturivorus* (Ehara)²⁰⁾ やウヅキコモリグモ *Pardosa astrigera* L. Koch²¹⁾ などが、オオムギの間作の導入によって増加するネギアザミウマの天敵として報告されている。本県でネギアザミウマを抑制する主要な天敵を明らかにし、主要種を効果的に保護・強化することで、オオムギの間作による防除効果がより向上する可能性がある。ネギアザミウマはその生殖様式から産雌性もしくは産雌性単為生殖系統の 2 系統に大別されるが、産雌性単為生殖系統では殺虫剤の効果が低い傾向がみられる^{22~25)}。本系統は滋賀県内でも発生している²⁵⁾ ため、殺虫剤の散布回数を削減できる生物的防除は、殺虫剤抵抗性管理の観点からも有効な防除方法となりうる。

4. 2. ネギアザミウマ防除による細菌性腐敗病害の発病抑制

これまで、ネギアザミウマの防除によって腐敗症状の発病が抑制されることは知られていた^{5, 9)} が、本研究によって、主に内部のりん片での腐敗症状が抑制されるという仮説が支持された。外部のりん片での腐敗症状も抑制されたが、内部の場合ほど明確な傾向ではなく、ネギアザミウマがタマネギ内部のりん片での腐敗症状の発病を助長していることが示唆された。外観からの判別が困難な内部腐敗球が出荷されるリスクを軽減できることから、高品質なタマネギの生産にはネギアザミウマの防除が必要不可欠だろう。しかし、本県の主要な病原細菌である *Burkholderia* 属細菌⁸⁾ のタマネギへの感染経路は不明であり、その解明は今後の課題として残されている。周囲に存在する病原細菌がアザミウマの食害痕から侵入している場合、荒天や栽培管理作業など、別の要因で発生しうる傷の防止も、腐敗症状の発病抑制に効果的かもしれない。なお、2023 年の 130 号田の試験では、軟腐病の発生抑制のためにオキシソリニック酸水和剤を散布したが、前述した通り、試験実施後に本剤でりん片腐敗病が登録された。本県で発生する腐敗症状には *Burkholderia gladioli* (severini) などが病原であるりん片腐敗病も含まれている⁸⁾。本剤の散布によって腐敗症状の発生が抑制された可能性があるが、全区に散布しているため、ネギアザミウマ防除による発病抑制効果は十分に検討できたと考えられる。

ネギアザミウマ防除の有無と球重の関係は明確ではなく、生物的防除では防除の有無は球重に影響しなかった。一方で、化学的防除では 2022 年は防除区の球重が重かったが、2023 年は防除区の球重がおよそ 8%低かった。一般に、ネギアザミウマを防除するとタマネギの葉の食害が抑制され生育が良好

になるため、球重が重くなる⁹⁾。2023 年の化学的防除の試験では逆の傾向を示したが、この要因については明らかでない。球重の低下は収量に影響しうるが、防除区では腐敗率が 14%抑制されたことから、平均球重と健全球の割合との積から算出した場合の収量は防除区の方が高いと考えられ、防除区の球重の低下は腐敗症状の発病抑制によって補償されるだろう。

本研究から、ネギアザミウマを防除することでタマネギのりん茎、特に、外観での判別が困難な内部のりん片における腐敗症状の発病を抑制できることが示された。本研究では岩手県での先行研究⁹⁾に準じ、散布間隔を 15 日程度として計 3~4 回の防除を行った。防除コスト削減のため、ネギアザミウマの発生ならびに腐敗症状の発病抑制効果に影響しない散布回数・間隔を検討する必要がある。また、ネギアザミウマが発生しなくても腐敗症状は発生することがある⁵⁾ ため、殺菌剤の散布は必須だろう。本研究の 2023 年の 130 号田の試験では、りん片腐敗病に登録のあるオキシソリニック酸を全区に散布しており、ネギアザミウマを対象とした殺虫剤を散布した防除区では内部腐敗が発生しなかった。殺虫・殺菌剤を組み合わせた防除体系は東北地方の春植タマネギ作でも腐敗症状の発生抑制に効果的⁹⁾ であり、地域や作柄によらず共通した防除体系であると考えられる。また、本研究で実施した生物的防除のような、化学的防除以外のネギアザミウマ防除と殺菌剤の組み合わせによる腐敗症状の発生状況の調査も必要である。

腐敗症状が発生すると発病したりん茎の廃棄による減収だけでなく、出荷先からのクレームにつながる場合もある。すなわち、腐敗による減収以上の影響が生じる可能性があるため、外観からの判別が困難な内部腐敗を発生させないことが望ましい。そのためには、収穫作業および貯蔵時の条件も重要である。収穫時に葉鞘が 3 cm になるよう剪葉することで *Pantoea* 属や *Burkholderia* 属細菌による腐敗症状の発生が²⁶⁾、20℃以下の低温で貯蔵することで *Burkholderia* 属細菌による腐敗症状の発生が軽減される^{8, 27)}。病害虫の防除に加え、収穫作業や貯蔵を適切に行う総合的な防除体系を構築することで、細菌性腐敗病害の発生をより効果的に抑制することが可能となるだろう。

5. 謝辞

金子 誠氏には調査にご協力いただき、また本稿の執筆にあたり貴重なご意見を頂いた。長谷部匡昭氏、吉岡善明氏、前田武彦氏、皆黒澄子氏、村瀬範子氏、山本佐和子氏には、調査や圃場管理においてご尽力いただいた。蓮川博之博士には本稿のご校閲を賜った。ここに記して深く御礼申し上げる。

6. 引用文献

- 1) 飯田 格・宇井格生・都丸敬一・脇本 哲・山中 達・奥八郎 (1979) 植物病理学, 朝倉書店, 東京.
- 2) 三井 康 (1988) 土壌害虫および線虫が媒介する病害. 植物防疫, 42: 425-428.
- 3) Grode, A., S. Chen, E. D. Walker and Z. Szendrei (2017) Onion thrips (Thysanoptera: Thripidae) feeding promotes infection by *Pantoea ananatis* in onion. *Journal of Economic Entomology*, 110: 2301-2307.
- 4) 大村敏博 (2006) 虫媒ウイルス病について. 植物防疫, 60: 343-345.
- 5) 永坂 厚・横田 啓・上杉龍士・達 瑞枝・笠井友美・本庄 求・菅原茂幸 (2020) 東北地域の春まきタマネギにおけるネギアザミウマ防除がタマネギ腐敗病の発生に与える影響. 北日本病害虫研究報告, 71: 62-68.
- 6) 滋賀県農政水産部農政課 (2024) しがの農林水産業. 滋賀県農政水産部農政課, 大津市.
- 7) 滋賀県 (2024) 園芸品目の生産状況. <https://www.pref.shiga.lg.jp/ippan/shigotosangyou/nougou/ryutsuu/336986.html> (2025. 01. 14 参照).
- 8) 小幡善也・金子 誠・柴田隆豊 (2024) 滋賀県の秋植タマネギのりん茎腐敗の主要な病原細菌とその発病適温. 関西病虫害研究会報, 66: 1-10.
- 9) 横田 啓・熊谷初美・佐々木達史 (2020) 春まきタマネギ栽培における殺虫剤と殺菌防除剤の併用がりん茎の腐敗および収量に及ぼす影響. 北日本病害虫研究報告, 71: 69-73.
- 10) Dutta, B., A. K. Barman, R. Srinivasan, U. Avci, D. E. Ullman, D. B. Langston and R. D. Gitaitis (2014) Transmission of *Pantoea ananatis* and *P. agglomerans*, causal agents of center rot of onion (*Allium cepa*), by onion thrips (*Thrips tabaci*) through feces. *Phytopathology*, 104: 812-819.
- 11) 柴尾 学 (2016) アザミウマ防除ハンドブック. 農山漁村文化協会, 東京.
- 12) 日本植物防疫協会 (編) (2011) アザミウマ類の見分け方 (植物防疫 特別増刊号 (No. 14)), 日本植物防疫協会, 東京.
- 13) 相澤美里・渡邊丈夫 (2017) 冬季タマネギにおけるネギアザミウマ (アザミウマ目: アザミウマ科) の発生動態. 日本応用動物昆虫学会誌, 61: 9-16.
- 14) 横田 啓・熊谷初美・福田拓斗・萩内謙吾 (2019) 岩手県の春まきタマネギ栽培におけるネギアザミウマの適切な殺虫剤散布間隔. 北日本病害虫研究報告, 70: 152-157.
- 15) 関根崇行・大坂正明 (2020) オオムギ間作による害虫密度抑制効果と IPM への導入. 植物防疫, 74: 680-686.
- 16) R Development Core Team (2023) R: a language and environment for statistical computing. <https://cran.r-project.org/bin/windows/base/old/4.2.3/> (2025. 01. 14 参照).
- 17) Sekine, T., M. Osaka, T. Itabashi, N. Chiba, H. Yoshimura, R. Uesugi, K. Tabuchi and T. Shimoda (2022) Predation of syrphid larvae (Diptera: Syrphidae) on thrips in onion fields intercropped with barley. *Applied Entomology and Zoology*, 57: 305-311.
- 18) 菊池 修・宮崎昌久 (1993) 宮城県におけるネギアザミウマの発生消長と雄の発見. 北日本病害虫研究報告, 44: 159-160.
- 19) Sekine, T., T. Masuda and S. Iwashiro (2021) Suppression effect of intercropping with barley on *Thrips tabaci* (Thysanoptera: Thripidae) in onion fields. *Applied Entomology and Zoology*, 56: 59-68.
- 20) 土井 誠・土田祐大・増井伸一・中野亮平・石川隆輔 (2018) ネギ圃場の間作オオムギに発生するカブリダニ類によるネギのネギアザミウマに対する密度抑制効果. 関西病虫害研究会報, 60: 121-123.
- 21) 土井 誠 (2017) 静岡県内の根深ネギ圃場におけるネギアザミウマ防除のための土着天敵活用方法. 植物防疫, 71: 238-243.
- 22) Morishita, M. (2008) Pyrethroid-resistant onion thrips, *Thrips tabaci* Lindeman (Thysanoptera, Thripidae), infesting persimmon fruits. *Applied Entomology and Zoology*, 43: 25-31.
- 23) 十川和士・渡邊丈夫・伊藤政雄・武智和彦・三浦一芸 (2013) 四国におけるネギアザミウマ生殖系統の分布とその薬剤感受性. 植物防疫, 67: 666-671.
- 24) 徳丸晋虫 (2022) 京都府におけるネギアザミウマ (アザミウマ目: アザミウマ科) の生殖型に応じた殺虫剤の効果. 日本応用動物昆虫学会誌, 66: 45-52.
- 25) 北野大輔 (2024) 滋賀県のネギ属野菜で発生するネギアザミウマ 2 生殖系統の地理的分布とベイズモデルによる殺虫剤の効果の推定. 日本応用動物昆虫学会誌, 68: 39-49.
- 26) 守川俊幸・三室元気 (2016) タマネギ収穫調整法が細菌性の鱗茎腐敗症の発生に及ぼす影響. 植物防疫, 70: 582-588.
- 27) 守川俊幸・三室元気 (2018) タマネギの春まき作型確立のための各種病原菌の発病温度特性の把握. 富山県農林水産総合技術センター農業研究所研究報, 8: 21-25.

7. Summary

Bacterial rot of onions infected with *Burkholderia* spp. occurs in autumn-planted onions in Shiga Prefecture. A reduction of bacterial rot, especially internal scale rot, which is difficult to detect by appearance, is required for high-quality onion production. In this study, we investigated the time to start controlling for onion thrips *Thrips tabaci* on autumn-planted onion fields; the relationship between the control of *T. tabaci* on onion leaves and the reduction of internal scale rot was also tested. In autumn-planted onion fields, *T. tabaci* was trapped in blue sticky traps from 2021 to 2023 and their counts were found to increase between late April and early May. This suggests that the first control of *T. tabaci* with insecticides should occur approximately on April 20. When we used insecticides and *T. tabaci* population on onion leaves was suppressed to 6–15% of the control plot, onions had no internal scale rot up to one month after harvest. In fields where onion was intercropped with barley to protect against natural enemies, *T. tabaci* population was suppressed to 50% and internal scale rot was suppressed to 25% of the control plot. However, the natural enemies of *T. tabaci* could not be identified in this study. Moreover, the percentage of external scale rot was not significantly reduced in response to control of *T. tabaci*. These results suggest that controlling *T. tabaci* specifically reduces internal scale rot. Although onion weight in the insecticide-treated plot was occasionally lower than that in the control plot, this loss was compensated for by a reduction in bacterial rot. Overall, an integrated pest management system combining disease control, pest control, appropriate harvesting, and storage at low temperatures could effectively reduce bacterial rot in *Burkholderia* spp..

タマネギ直播栽培におけるシアナジン水和剤の春期土壌処理の 除草効果および薬害の評価

井田陽介*・松田眞一郎

Weeding Efficacy and Phytotoxicity of Spring Soil Treatment using Cyanazine Wettable Powder during the Harvest Period in Direct-sown Onion

Yosuke IDA, Shinichiro MATSUDA

キーワード：タマネギ, 直播栽培, シアナジン

タマネギ直播栽培においてシアナジン水和剤の春期土壌処理の収穫期における除草効果および薬害を評価するため試験を実施した。

1) 2023年10月13日に‘もみじ3号’を直播し、翌年4月1日または12日にシアナジン水和剤を10a当たり水量100Lに薬量を50g, 100g, 200gとして散布したところ、薬量が多いほどメヒシバが減少し、散布日が遅い4月12日の方がカヤツリグサが減少する傾向が見られた。また、いずれの散布日と薬量の組み合わせにおいても、可販収量に影響するほどの薬害は発生しなかった。

2) 2024年10月22日に‘もみじ3号’および‘ターザン’を直播し、翌年4月5日にシアナジン水和剤を10a当たり水量100Lに薬量を100gとして散布したところ、薬害の程度はごく軽微で、対照薬剤のプロスルホカルブ乳剤と同等以上の雑草抑制効果が認められた。特にタデとゴウシュウアリタソウに対して高い抑制効果が見られた。

3) 以上、タマネギ収穫期の雑草に対してシアナジン水和剤の春期土壌処理の効果は高く、薬害は発生しても可販収量には影響しないことから、収穫機での掘取りやピッカーによる拾い上げなどの機械収穫作業時の除草に要する労働負荷低減に有効と考えられた。

1. 緒言

滋賀県内においてタマネギ栽培は一般的に秋播き移植栽培が行われているが、近年、省力的な秋播き直播栽培が注目されている。本県は水田率が9割以上と高く、タマネギ栽培は水田輪作体系の中に組み込まれることが多い。水稻の移植、麦の収穫および大豆の播種と、タマネギの収穫作業の競合を避けるため、タマネギの品種は6月上旬収穫の中生品種か6月中下旬収穫の中晩生品種が主に作付されている。井田ら(2024)¹⁾は、滋賀県内の下層黒ボク灰色低地土において水稻作付後に中晩生品種のタマネギ直播栽培を行い、可販収量を概ね5t・10a¹確保したことを報告している。また、本報告の中で、タマネギ直播栽培を普及する上での課題の一つとして、春以降の広葉雑草対策を挙げている。農薬登録上、直播

栽培は移植栽培と比較して散布できる除草剤の数が少なく、特に春以降に散布できる広葉雑草用の茎葉処理剤がないため、収穫時期には雑草が繁茂し、機械収穫が困難となる場合がある。2025年8月時点で農林水産省の農薬登録情報提供システム(<https://pesticide.maff.go.jp/>)により本県で春以降に散布可能な広葉雑草に効果のある除草剤(収穫前日数45日以下の剤)を検索したところ、移植栽培では土壌処理剤としてIPC、プロスルホカルブ、ペンディメタリン、シアナジン、プロピザミド、茎葉処理剤としてベンタゾン、アイオキシニル等を成分とする多くの剤が使用できるが、直播栽培では主に土壌処理剤のIPC乳剤またはプロスルホカルブ乳剤の2剤で対応する必要がある。

タマネギ直播栽培の雑草防除体系について、横田ら(2022)²⁾は、福島県での秋播き直播栽培で、播種14日前

*Corresponding author

2025年10月21日受付, 2026年2月24日受理

まで使用可能であるダズメット粉粒剤または播種後出芽前に使用可能なシアナジン水和剤と中耕除草後に使用可能なプロスルホカルブ乳剤散布の併用が、生育と収量に影響することなく雑草の抑制が可能であることを報告している。一方で、杉戸（2020）³⁾は、北海道の春播き直播栽培では中耕除草後に残存したノボロギクにはプロスルホカルブ乳剤の除草効果が低いと報告していることから、生育が進んだ雑草が残存する圃場では十分な除草効果が得られない可能性があり、プロスルホカルブ乳剤の使用時期として防除効果の高い雑草発生始期までに処理を行うことが重要であるとしている。

以上のことから、本県でタマネギ直播栽培を普及するためには春以降の広葉雑草に対する除草手段の更なる充実が必要と考えられた。本試験では、現在、直播栽培では播種後出芽前の使用時期でしか農薬登録はないが、発生始期の雑草にも効果を持つ土壌処理剤であるシアナジン水和剤について、春期土壌処理の除草効果及び薬害の評価を行った。

2. 材料および方法

2. 1 耕種概要

2. 1. 1 シアナジン水和剤の薬量と散布時期がタマネギ及び雑草発生量に及ぼす影響（2023年播種）

滋賀県東近江市の普通灰色低地土の前作水稲ほ場において、タマネギ品種‘もみじ3号’のコート種子を畝幅150 cm、畝高20 cm、天面100 cm、条間中央25 cm左右20 cmで2023年10月13日に4条播種した。播種はアップカッターロータリー（RU160, ヤンマーアグリ株式会社）とトラクタ用クリーンシーダ（APH40C, アグリテクノサーチ株式会社）を用いて畝立て同時播種を行った。松尾ら（2020）⁴⁾を参考に、駆動輪で畝上に溝を作り、作条爪（TP-2-60, アグリテクノサーチ株式会社）で処理しながら播種し、溝の大きさに合わせた鎮圧輪で溝底を押し付けることにより、溝畝播種とした。播種深度は播種溝の底から2 cm、播種間隔10 cm、播種密度は26,666粒・10a⁻¹とした。基肥は9月16日にBMよりんおよび苦土石灰を、10月13日に化成444を施用し、成分量で窒素11.2kg・10a⁻¹、リン酸19.2kg・10a⁻¹、カリウム11.2kg・10a⁻¹とした。追肥は11月22日、翌年2月8日、3月8日、3月19日に化成444を施用し、合計で窒素16.2kg・10a⁻¹、リン酸16.2kg・10a⁻¹、カリウム16.2kg・10a⁻¹とした。11月22日、翌年2月8日、3月8日は追肥と同時に中耕を行った。収穫は6月12日に行った。

2. 1. 2 シアナジン水和剤と対照薬剤および無処理との効果比較（2024年播種）

滋賀県東近江市の下層黒ボク灰色低地土の前作水稲ほ場において、タマネギ品種‘もみじ3号’および‘ターザン’のコート種子を畝幅150 cm、畝高20 cm、天面100 cm、条間24

cmで2024年10月22日に4条播種した。播種はアップカッターロータリー（RU160, ヤンマーアグリ株式会社）とトラクタ用クリーンシーダ（APH40C, アグリテクノサーチ株式会社）を用いて畝立て同時播種を行った。また、2023年播種と同様に溝畝播種とした。播種深度は播種溝の底から2 cm、播種間隔10 cm、播種密度は26,666粒・10a⁻¹とした。基肥は9月7日にBMよりんおよび苦土石灰を、10月1日に化成444を施用し、成分量で窒素11.2kg・10a⁻¹、リン酸19.2kg・10a⁻¹、カリウム11.2kg・10a⁻¹とした。追肥は11月29日、翌年2月6日、3月7日に化成444の施用を中耕と同時にを行い、合計で窒素12.6kg・10a⁻¹、リン酸12.6kg・10a⁻¹、カリウム12.6kg・10a⁻¹とした。また、4月3日に中耕のみ実施した。‘ターザン’は6月9日に、‘もみじ3号’は6月20日に収穫を行った。

2. 2 除草剤の処理内容

2. 2. 1 シアナジン水和剤の薬量と散布時期がタマネギ及び雑草発生量に及ぼす影響（2023年播種）

播種後、2023年10月16日にペンディメタリン乳剤、12月1日にプロスルホカルブ乳剤、12月19日にクレトジム乳剤、翌年2月13日にIPC乳剤、3月19日にプロスルホカルブ乳剤を散布した。以降、4月1日または4月12日にシアナジン水和剤を10a当たり水量100Lに薬量をそれぞれ50g・100g・200gとして散布する区を設けた。各区の面積は7.5 m²（1.5m×5m）とし、反復は設けなかった（表1）。

表1 除草剤の処理内容（2023年播種）

| 品種 | 薬剤名 | 薬量 (g・10a ⁻¹) | 散布水量 (L・10a ⁻¹) | 散布時の | |
|-----------|--------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------|---------|
| | | | | 散布日 ²⁾ | タマネギの状態 |
| もみじ 3号 | シアナジン 水和剤 | 50 | 100 | 4月1日 | 2～3葉期 |
| | | | | 4月12日 | 3～4葉期 |
| | | 100 | | 4月1日 | 2～3葉期 |
| | | | | 4月12日 | 3～4葉期 |
| | | 200 | | 4月1日 | 2～3葉期 |
| | | | | 4月12日 | 3～4葉期 |

²⁾ 薬剤散布日から直近の中耕は3月8日に実施。プロスルホカルブ乳剤を3月19日に散布

2. 2. 2 シアナジン水和剤と対照薬剤および無処理との効果比較（2024年播種）

播種後、2024年11月7日にペンディメタリン乳剤、12月2日にプロスルホカルブ乳剤、翌年2月15日にIPC乳剤、3月10日にIPC乳剤を散布した。以降、4月5日にシアナジン水和剤を10a当たり水量100Lに薬量を100gとして散布する区、プロスルホカルブ乳剤を10a当たり水量100Lに薬量を500mlとして散布する対照区および土壌処理剤を散布しない無処理区を設けた。なお、圃場にイネ科雑草が散見されたため、4月5日の散布はクレトジム乳剤との混用散布を行った（無処理区はクレトジム乳剤のみ散布した）。各区の面積は4.5 m²（1.5m×3m）、各区3反復とした（表2）。

表 2 除草剤の処理内容 (2024 年播種)

| 品種 | 薬剤名 | 薬量 (gまたはml・10a ⁻¹) | 散布水量 (L・10a ⁻¹) | 薬剤 散布日 ^γ | 散布時の タマネギの状態 |
|-------|----------------|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------|-----------------|
| | — ^z | — | | | |
| もみじ3号 | プロスルホカルブ乳剤 | 500 | 100 | 4月5日 | 2葉期 |
| | シアナジン水和剤 | 100 | | | |
| | — | — | | | |
| ターザン | プロスルホカルブ乳剤 | 500 | 100 | 4月5日 | 2葉期 |
| | シアナジン水和剤 | 100 | | | |

^z — は土壌処理剤を散布しない無処理区を示す

^γ 薬剤散布日から直近の中耕は4月3日に実施

2. 3 各種調査の方法

2023 年播種および 2024 年播種ともに、統計解析には、統計分析ソフト EZR (Ver. 1.65) を使用した。

2. 3. 1 シアナジン水和剤の薬量と散布時期がタマネギ及び雑草発生量に及ぼす影響 (2023 年播種)

(1) 生育および収量調査

タマネギの草丈、葉鞘径、葉数は各区 7.5 m²内の任意の 20 株を計測した。計測は5月16日に実施した。収量は各区 7.5 m²内の全球について、総収量、総球数、可販 (球径 7 cm 以上) 収量、可販球数を計測した。また、可販球は M 球 (球径 7 cm 以上 8 cm 未満)、L 球 (球径 8 cm 以上 9.5 cm 未満)、2L 球 (球径 9.5 cm 以上) の規格別に計測を実施した。

(2) 葉害調査

タマネギの葉害株率は各区 7.5 m²内の全株を対象として、ねじれ、葉先枯、黄変、生育抑制、枯死、の症状を呈する株を葉害株とし、各区の全株について調査を行い、各症状株数 ÷ 全株数 × 100 (%) から葉害株率を算出した。調査はシアナジン水和剤を4月1日に散布した区は4月30日、4月12日に散布した区は5月10日に実施した。

(3) 雑草調査

雑草調査は、シアナジン水和剤散布前とタマネギ収穫前に実施した。シアナジン水和剤を4月1日に散布した区では3月25日に、4月12日に散布した区では4月10日に各区 7.5 m²内の全雑草の本数を計測した。タマネギ収穫前の6月10日には各区内の全雑草について新鮮重および本数を計測した。

2. 3. 2 シアナジン水和剤と対照薬剤および無処理との効果比較 (2024 年播種)

(1) 生育および収量調査

タマネギの草丈、葉鞘径、葉数は各区 4.5 m²内の任意の 20 株を計測した。計測は5月13日に実施した。収量は各区 4.5 m²内の全球について、総収量、総球数、可販 (球径 7 cm 以上) 収量、可販球数を計測した。また、可販球は M 球 (球径 7 cm 以上 8 cm 未満)、L 球 (球径 8 cm 以上 9.5 cm 未満)、2L 球 (球径 9.5 cm 以上) の規格別に計測を実施した。

(2) 葉害調査

タマネギの葉害株率は各区 4.5 m²内の全株を対象として、

ねじれ、葉先枯、黄変、生育抑制、枯死、の症状を呈する株を葉害株とし、各区の全株について調査を行い、各症状株数 ÷ 全株数 × 100 (%) から葉害株率を算出した。調査は5月7日に実施した。

(3) 雑草調査

シアナジン水和剤散布前の雑草調査は、各区 4.5 m²内の全雑草について、4月4日に本数を計測した。タマネギ収穫前の雑草調査は、各区 4.5 m²内の全雑草について、‘ターザン’を栽培した区は6月5、6、7日に、‘もみじ3号’を栽培した区は6月12、13、16日に新鮮重および本数を計測した。

3. 結果

3. 1 シアナジン水和剤の薬量と散布時期がタマネギおよび雑草発生量に及ぼす影響 (2023 年播種)

3. 1. 1 試験期間中の気象状況

2023 年 10 月から 2024 年 6 月までの月降水量および月平均気温のデータを図 1 に示した。タマネギ生育前半の 10 月～2 月にかけての降水量は平年並～やや少なく推移したが、鱗茎の肥大が始まる 3 月以降は十分な降水量があった。また、気温は生育期間を通じて平年並～高く推移し、タマネギの生育に好適な気象状況であった。



図 1 試験期間中の気象状況^z (2023 年播種)

^z 東近江のアメダスデータから引用。平年値は 1991-2020 年の 30 年間の観測値の平均をもとに算出

シアナジン水和剤散布前後の 3 月 25 日から 4 月 19 日までの日最高気温、日最低気温および日降水量を表 3 に示した。

散布日から7日後までの気象状況は、4月1日散布では、散布2日後に30 mm以上の降雨があり、散布6日後に日最高気温が25℃以上となった。4月12日散布では、散布1日後と2日後に日最高気温が25℃以上となった。

3. 1. 2 タマネギの生育および収量

生育調査の結果を表4に示した。草丈、葉鞘径、葉数のいずれにおいても薬量と散布日の違いによる有意差は認められなかった。

収量調査の結果を表5に示した。総収量および可販収量は薬量が多いほど高まり、規格別収量ではM玉および規格外球は散布日が遅いほど少ない傾向が見られた。

3. 1. 3 タマネギの薬害

薬害調査の結果を表6に示した。ねじれ症状の株率は薬量が多いほど高まる傾向が見られた。

3. 1. 4 雑草発生量

シアナジン水和剤散布前の雑草発生量調査の結果、全ての区において雑草の発生は認められなかった（データ略）。

タマネギ収穫前の雑草発生量調査の結果を表7に示した。薬量が多いほどメヒシバが減少し、散布日が遅い4月12日の方がカヤツリグサが減少する傾向が見られた。

表3 シアナジン水和剤散布前後の気象状況^z（2023年播種）

| 日付 ^y | 3/25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 4/1 ● | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| 日最高気温 (°C) | 12.2 | 12.5 | 13.8 | 15.3 | 19.8 | 20.5 | 24.2 | 18.5 | 21.1 | 13.0 | 16.7 | 17.4 | 21.8 |
| 日最低気温 (°C) | 8.2 | 5.8 | 2.9 | 1.1 | 8.2 | 6.9 | 9.7 | 5.4 | 2.4 | 9.2 | 9.0 | 7.4 | 7.7 |
| 日降水量 (mm) | 16.5 | 54.5 | 0.0 | 6.0 | 14.0 | 0.0 | 0.0 | 1.5 | 0.0 | 33.5 | 1.0 | 0.0 | 0.0 |
| 日付 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 ● | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| 日最高気温 (°C) | 25.0 | 20.9 | 15.4 | 18.6 | 18.7 | 23.2 | 25.7 | 26.9 | 22.7 | 22.1 | 22.5 | 19.7 | 20.7 |
| 日最低気温 (°C) | 9.2 | 13.0 | 6.8 | 3.9 | 6.7 | 7.7 | 7.2 | 8.2 | 9.3 | 14.0 | 12.4 | 10.1 | 8.4 |
| 日降水量 (mm) | 0.0 | 19.0 | 36.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.5 | 3.0 | 0.0 | 0.0 |

^z 東近江のアメダスデータから引用

^y ●は薬剤散布日を示す

表4 シアナジン水和剤の薬量と散布時期が生育に及ぼす影響（2023年播種）

| 薬量 (g・10a ⁻¹) | 薬剤 散布日 | 草丈 (cm) | 葉鞘径 (mm) | 葉数 (枚) |
|------------------------------|-----------|------------|-------------|-----------|
| 50 | 4月1日 | 67.8 | 18.0 | 8.1 |
| | 4月12日 | 64.5 | 17.6 | 7.8 |
| 100 | 4月1日 | 66.1 | 18.1 | 7.6 |
| | 4月12日 | 69.3 | 19.4 | 8.1 |
| 200 | 4月1日 | 69.0 | 18.6 | 8.0 |
| | 4月12日 | 67.2 | 18.7 | 7.8 |
| 分散分析 ^z | | | | |
| | 薬量 | ns | ns | ns |
| | 薬剤散布日 | ns | ns | ns |

^z nsは10%水準で有意差なし

表5 シアナジン水和剤の薬量と散布時期が収量に及ぼす影響（2023年播種）

| 薬量 (g・10a ⁻¹) | 薬剤散布日 | 総収量 | | 可販収量（球径7cm以上） | | 規格別収量 | | | |
|------------------------------|-------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| | | 球数 (個/m ²) | 反収 (kg・10a ⁻¹) | 球数 (個/m ²) | 反収 (kg・10a ⁻¹) | 2L (kg・10a ⁻¹) | L (kg・10a ⁻¹) | M (kg・10a ⁻¹) | 規格外 (kg・10a ⁻¹) |
| 50 | 4月1日 | 18.3 | 4589 | 15.1 | 4239 | 543 | 3121 | 575 | 350 |
| | 4月12日 | 17.6 | 4538 | 15.7 | 4359 | 828 | 3000 | 531 | 179 |
| 100 | 4月1日 | 19.5 | 4862 | 16.4 | 4535 | 1116 | 2777 | 641 | 327 |
| | 4月12日 | 17.1 | 4682 | 14.8 | 4414 | 1280 | 2619 | 515 | 268 |
| 200 | 4月1日 | 19.9 | 5017 | 16.7 | 4682 | 813 | 3129 | 739 | 335 |
| | 4月12日 | 19.1 | 4943 | 17.1 | 4747 | 653 | 3485 | 609 | 197 |
| 分散分析 ^z | | | | | | | | | |
| | 薬量 | ns | * | ns | † | ns | ns | ns | ns |
| | 薬剤散布日 | ns | ns | ns | ns | ns | ns | † | † |

^z *と†は、それぞれ5%と10%水準で有意差あり、nsは10%水準で有意差なし

表 6 シアナジン水和剤の薬量と散布時期が葉害に及ぼす影響 (2023 年播種)

| 薬量 (g・10a ⁻¹) | 薬剤散布日 | ねじれ症状 株率 (%) | 葉先枯症状 株率 (%) | 黄変 株率 (%) | 生育抑制 株率 (%) | 枯死 株率 (%) |
|------------------------------|-------|-----------------|-----------------|--------------|----------------|--------------|
| 50 | 4月1日 | 0.7 | 0 | 0 | 0 | 0.7 |
| | 4月12日 | 2.2 | 9.0 | 0 | 0 | 0 |
| 100 | 4月1日 | 0.7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 4月12日 | 4.7 | 2.3 | 0 | 0 | 0 |
| 200 | 4月1日 | 11.8 | 5.3 | 0 | 0 | 0.7 |
| | 4月12日 | 11.0 | 7.5 | 0 | 0 | 0.7 |
| 分散分析 ² | 薬量 | † | ns | - | - | - |
| | 薬剤散布日 | ns | ns | - | - | - |

² Arcsin 変換後に検定. †は10%水準で有意差あり, nsは10%水準で有意差なし, -は検定なし

表 7 シアナジン水和剤の薬量と散布時期がタマネギ収穫前の雑草発生量に及ぼす影響 (2023 年播種)

| 項目 | 薬量 (g・10a ⁻¹) | 薬剤散布日 | イネ科雑草 | | 非イネ科雑草 | | | | 総計 |
|----------------------------|------------------------------|-------|-------|-----|--------|----------------|-----|-----|------|
| | | | メヒシバ | その他 | カヤツリグサ | ゴウシュウ アリタソウ | タデ | その他 | |
| 本数 (本/m ²) | 50 | 4月1日 | 1.7 | 0.3 | 12.5 | 4.5 | 0.5 | 0.4 | 20.0 |
| | | 4月12日 | 0.9 | 0.4 | 3.6 | 0 | 0.5 | 0.1 | 5.6 |
| | 100 | 4月1日 | 0.4 | 0.3 | 9.6 | 1.6 | 1.1 | 0 | 12.9 |
| | | 4月12日 | 0.1 | 0.3 | 3.1 | 0.3 | 0.5 | 0.1 | 4.4 |
| | 200 | 4月1日 | 0 | 0.3 | 3.1 | 0 | 0.3 | 0 | 3.6 |
| | | 4月12日 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0 | 0.1 | 0 | 0.5 |
| 分散分析 ² | 薬量 | † | ns | ns | ns | ns | ns | ns | |
| | 薬剤散布日 | ns | ns | † | ns | ns | ns | ns | |
| 新鮮重 (g/m ²) | 50 | 4月1日 | 6.1 | 0.0 | 7.5 | 2.5 | 0.2 | 2.6 | 19.0 |
| | | 4月12日 | 1.0 | 0.4 | 1.5 | 0 | 0.0 | 0.5 | 3.4 |
| | 100 | 4月1日 | 0.8 | 1.1 | 4.1 | 0.9 | 0.3 | 0 | 7.2 |
| | | 4月12日 | 0.4 | 0.1 | 1.1 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 1.8 |
| | 200 | 4月1日 | 0 | 0.4 | 0.7 | 0 | 0.0 | 0 | 1.1 |
| | | 4月12日 | 0 | 0.1 | 0.1 | 0 | 0.0 | 0 | 0.2 |
| 分散分析 | 薬量 | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | |
| | 薬剤散布日 | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | |

² †は10%水準で有意差あり, nsは10%水準で有意差なし

3. 2 シアナジン水和剤と対照薬剤および無処理との効果比較 (2024 年播種)

3. 2. 1 試験期間中の気象状況

2024年10月から2025年6月までの月降水量および月平均気温データを図2に示した。降水量は12月～4月にかけて少なく、5月～6月は平年より多かった。また、気温は2月を除いて平年並～高く推移した。鱗茎の肥大が始まる3月～4月にかけて少雨だったことから、中生品種の‘ターザン’は肥大が悪く小玉傾向だった。一方、中晩生品種の‘もみじ3号’は5月以降に十分な降雨があったため、生育終盤に鱗茎が肥大した。

シアナジン水和剤散布前後の3月29日から4月13日までの日最高気温、日最低気温および日降水量を表8に示した。散布日から7日後までの間、30mm以上の強い雨や25℃以上の

の高温になる日はなかった。

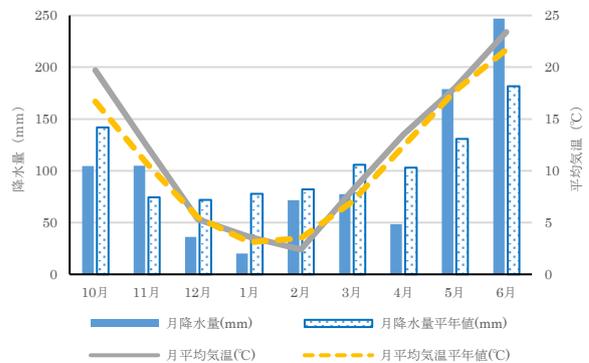


図 2 試験期間中の気象状況² (2024 年播種)

² 東近江のアメダスデータから引用。平年値は1991-2020年の30年間の観測値の平均をもとに算出

3. 2. 2 タマネギの生育および収量

生育調査の結果を表9に示した。‘もみじ3号’および‘ターザン’の草丈、葉鞘径、葉数について、処理区間で有意差は認められなかった。

収量調査の結果を表10に示した。総収量、可販収量、規格別収量のいずれも処理区間で有意差は認められなかった。

3. 2. 3 タマネギの薬害

薬害調査の結果を表11に示した。シアナジン処理区の‘ターザン’で葉先枯症状がわずかに発生したが、その他の薬害の発生は認められなかった。

3. 2. 4 雑草発生量

シアナジン水和剤散布前の雑草発生量調査の結果を表12に示した。スズメノカタビラやスズメノテッポウがわずかに

発生していた他、‘ターザン’を栽培した区においてはタデおよびカラスノエンドウの発生が認められた。

タマネギ収穫前の雑草発生量調査の結果を表13に示した。全雑草の本数では無処理区とシアナジン区の間に有意差は認められなかったが、新鮮重はシアナジン区が有意に低く、シアナジン水和剤は対照薬剤のプロスルホカルブ乳剤と同等以上の雑草抑制効果が認められた。種類別では、タデ、ノボロギクの本数およびメヒシバ、ゴウシュウアリタソウ、タデの新鮮重で無処理区と比較してシアナジン区が有意に低かった。圃場の優占雑草のタデとゴウシュウアリタソウに対して高い抑制効果が見られた。ノボロギクは本数が少なく、個体間の生育のばらつきが大きかったため、新鮮重で有意差は認められなかったが、シアナジン区では大きく生育したノボロギクは観察されなかった。

表8 シアナジン水和剤散布前後の気象状況^z (2024年播種)

| | | | | | | | | |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 日付 ^y | 3/29 | 30 | 31 | 4/1 | 2 | 3 | 4 | 5● |
| 日最高気温 (°C) | 12.8 | 9.6 | 11.9 | 12.9 | 16.5 | 16.2 | 13.9 | 18.6 |
| 日最低気温 (°C) | 5.0 | 2.0 | 1.0 | 5.1 | 6.6 | 6.8 | 3.6 | 0.1 |
| 日降水量 (mm) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 日付 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 日最高気温 (°C) | 19.7 | 18.3 | 23.4 | 19.9 | 21.1 | 19.7 | 23.6 | 17.4 |
| 日最低気温 (°C) | 9.6 | 5.0 | 2.0 | 6.9 | 4.9 | 8.9 | 9.4 | 6.4 |
| 日降水量 (mm) | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.5 | 0.0 | 0.0 | 23.5 |

^z 東近江のアメダスデータから引用

^y ●は薬剤散布日を示す

表9 シアナジン水和剤と対照薬剤および無処理との生育の比較 (2024年播種)

| 品種 | 処理区 | 草丈 (cm) | 葉鞘径 (mm) | 葉数 (枚) |
|-------|-------|---------------------|-------------|-----------|
| もみじ3号 | 無処理 | 48.7 a ^z | 12.9 a | 6.8 a |
| | 対照 | 48.2 a | 12.6 a | 6.7 a |
| | シアナジン | 49.7 a | 13.2 a | 6.9 a |
| ターザン | 無処理 | 50.6 a | 12.5 a | 6.5 a |
| | 対照 | 47.4 a | 12.2 a | 6.4 a |
| | シアナジン | 50.2 a | 12.4 a | 6.6 a |

^z 解析は同一品種内で行った。Tukeyの多重比較検定により、同一英子文字間には10%水準で各処理間に有意差なし

表10 シアナジン水和剤と対照薬剤および無処理との収量の比較 (2024年播種)

| 品種 | 処理区 | 総収量 | | 販収量 (球径7cm以上) | | 規格別収量 | | | |
|-------|-------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| | | 球数 (個/m ²) | 反収 (kg・10a ⁻¹) | 球数 (個/m ²) | 反収 (kg・10a ⁻¹) | 2L (kg・10a ⁻¹) | L (kg・10a ⁻¹) | M (kg・10a ⁻¹) | 規格外 (kg・10a ⁻¹) |
| もみじ3号 | 無処理 | 21.9 a ² | 5019 a | 18.2 a | 4612 a | 667 a | 2690 a | 1254 a | 407 a |
| | 対照 | 23.3 a | 5377 a | 20.0 a | 4980 a | 746 a | 2704 a | 1530 a | 397 a |
| | シアナジン | 23.6 a | 5451 a | 20.2 a | 5054 a | 649 a | 2783 a | 1623 a | 397 a |
| ターザン | 無処理 | 23.8 a | 3846 a | 13.9 a | 2691 a | 0 - | 835 a | 1856 a | 1156 a |
| | 対照 | 23.3 a | 3441 a | 11.4 a | 2114 a | 0 - | 366 a | 1747 a | 1327 a |
| | シアナジン | 24.7 a | 3913 a | 14.1 a | 2652 a | 0 - | 621 a | 2031 a | 1261 a |

² 解析は同一品種内で行った。Tukeyの多重比較検定により、同一英子文字間には10%水準で各処理間に有意差なし。-は検定なし

表11 シアナジン水和剤と対照薬剤および無処理との葉害株率の比較² (2024年播種)

| 品種 | 処理区 | ねじれ症状 株率 (%) | 葉先枯症状 株率 (%) | 黄変 株率 (%) | 生育抑制 株率 (%) | 枯死 株率 (%) |
|-------|-------|-----------------|-----------------|--------------|----------------|--------------|
| もみじ3号 | 無処理 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 対照 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | シアナジン | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ターザン | 無処理 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 対照 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | シアナジン | 0 | 1.8±0.9 | 0 | 0 | 0 |

² 数値は3反復の平均値±標準偏差を示す

表12 シアナジン水和剤と対照薬剤および無処理との散布前の雑草発生量の比較² (2024年播種)

| 調査項目 | 品種 | 処理区 | イネ科雑草 | | 非イネ科雑草 | |
|---------------------------|-------|-------|--------------|--------------|---------|--------------|
| | | | スズメノ カタビラ | スズメノ テッポウ | タデ | カラスノ エンドウ |
| 本数 (本/m ²) | もみじ3号 | 無処理 | 0.1±0.1 | 0 | 0 | 0 |
| | | 対照 | 0 | 0.1±0.1 | 0 | 0 |
| | | シアナジン | 0.1±0.1 | 0.1±0.1 | 0 | 0 |
| | ターザン | 無処理 | 0.1±0.3 | 0 | 0.2±0.2 | 1.5±0.9 |
| | | 対照 | 0.1±0.1 | 0 | 0.9±0.2 | 0.4±0.6 |
| | | シアナジン | 0.1±0.3 | 0.1±0.1 | 0.1±0.1 | 1.4±1.3 |

² 数値は3反復の平均値±標準偏差を示す

表13 シアナジン水和剤と対照薬剤および無処理とのタマネギ収穫前の雑草発生量の比較 (2024年播種)

| 調査項目 | 品種 | 処理区 | イネ科雑草 | | 非イネ科雑草 | | | | | 総計 (対無処理比) | |
|----------------------------|-----------|-------|--------------------|-------|----------------|--------|--------|--------------|---------------|---------------|----------------|
| | | | メヒシバ | その他 | ゴウシュウ アリタソウ | タデ | ノボロギク | カラスノ エンドウ | ショクヨウ ガヤツリ | | その他 |
| 本数 (本/m ²) | もみじ 3号 | 無処理 | 5.1 a ² | 0.4 a | 49.0 a | 33.2 a | 1.0 a | 0 - | 4.7 a | 6.1 a | 99.5 a (100) |
| | | 対照 | 2.4 a | 0.5 a | 39.6 a | 27.3 a | 0.6 a | 0 - | 4.8 a | 3.9 a | 79.3 a 79.7% |
| | | シアナジン | 4.5 a | 0.4 a | 39.3 a | 18.7 a | 0.6 a | 0 - | 6.1 a | 4.2 a | 73.9 a 74.2% |
| | ターザン | 無処理 | 6.0 a | 0.5 a | 77.9 a | 53.4 a | 2.0 a | 0.7 a | 2.7 a | 7.7 a | 151.0 a (100) |
| | | 対照 | 3.8 a | 0.1 a | 43.5 a | 26.1 b | 0.7 b | 0.3 a | 3.5 a | 3.0 a | 81.0 a 53.7% |
| | | シアナジン | 5.9 a | 0.7 a | 22.1 a | 13.9 b | 0.4 b | 0.8 a | 2.4 a | 4.0 a | 50.1 a 33.2% |
| 新鮮重 (g/m ²) | もみじ 3号 | 無処理 | 2.2 a | 0.9 a | 43.6 a | 81.4 a | 60.6 a | 0 - | 1.7 a | 16.4 a | 206.7 a (100) |
| | | 対照 | 1.8 a | 0.2 a | 15.1 a | 28.6 b | 52.6 a | 0 - | 1.8 a | 14.5 a | 114.5 ab 55.4% |
| | | シアナジン | 2.6 a | 2.9 a | 11.5 a | 5.3 b | 2.4 a | 0 - | 2.3 a | 3.4 a | 30.3 b 14.7% |
| | ターザン | 無処理 | 5.5 a | 6.6 a | 26.8 a | 54.1 a | 57.2 a | 32.6 a | 0.9 a | 4.2 a | 187.8 a (100) |
| | | 対照 | 2.5 ab | 0.0 a | 7.0 b | 9.2 b | 43.9 a | 9.7 a | 0.8 a | 6.0 a | 79.1 b 42.1% |
| | | シアナジン | 2.2 b | 2.2 a | 2.6 b | 3.5 b | 1.4 a | 14.6 a | 0.6 a | 2.5 a | 29.7 b 15.8% |

² 解析は同一の調査項目および品種内で行った。Tukeyの多重比較検定により、異なる英子文字間には10%水準で有意差あり。-は検定なし

4. 考察

本県において、タマネギの直播栽培は移植栽培と比較して雑草害が問題となりやすい。その理由として、移植栽培の定植時期は11月上～中旬だが、直播栽培の播種時期は10月上～中旬と1か月程度早く、生育初期の気温が移植栽培と比較して高いため、雑草防除を適切に行わないと年内に雑草が繁茂する。また、収穫時期は6月上旬以降が中心となるため、気温の上昇と梅雨入りによる降水量の増加により、収穫時期が遅れるほど雑草が繁茂し、機械収穫が困難となる場合がある。具体的には、収穫機での掘取り時に草が絡まって機械が動かせなくなったり、ピッカーによる拾い上げ時に雑草が同時に拾い上げられるため人力による除去が必要となったりする。これらのことから、直播栽培を普及するためには生育初期および収穫期の雑草対策が重要となる。

生育初期の雑草対策は、2020年にシアナジン水和剤、2021年にペンディメタリン乳剤の適用地帯が「北海道」から「全域」に変更登録されたことから、これらの剤で適切に防除を実施すれば年内の雑草の発生を抑制できる。一方、収穫期については、直播栽培で使用可能な土壌処理剤の種類が少なく、移植栽培で使用できるベンタゾン液剤やアイオキシニル乳剤等の茎葉処理剤が使えないため、特に広葉雑草の発生が問題となる。

直播栽培で春期に使用可能な土壌処理剤には、IPC乳剤とプロスルホカルブ乳剤がある。IPC乳剤は気温が20℃以下の低温期に効果が高く1～3月の防除に使用する剤であり、プロスルホカルブ乳剤は生育が進んだ雑草が残存する圃場では十分な除草効果が得られないおそれがあるため、異なる系統の土壌処理剤を用いることで、収穫期の雑草害低減を図れないかと考えた。そこで、本試験では、春期に用いる土壌処理剤としてシアナジン水和剤を供試した。

シアナジン水和剤は2025年8月現在、直播栽培では「播種後出芽前」でしか登録がとれておらず、生育終盤の春期に散布することはできない。このため、今後の変更登録を期待して本試験を実施した。

シアナジンはキク科、アカザ科、タデ科、スベリヒユ科、ゴマノハグサ科、シソ科、ツユクサ科、イネ科に効果を示す。発芽前の雑草では、発根と同時に根部より吸収され、体内に移行し、萌芽後光合成を阻害する。また、発生初期の雑草では、根部とともに茎葉部からも容易に吸収されるため、使用適期幅が広いという特徴を持つ⁵⁾。

2023年播種では、シアナジン水和剤の薬量を50g、100g、200g・10a⁻¹、散布日を4月1日および12日として試験を行った。シアナジン水和剤の使用上の注意事項には、雨の多い時期、場所での使用を避けること、高温時の散布は薬害を生ずるおそれがあるので、所定範囲内の少な目の薬量とすることが記載されており、薬害の発生に留意する必要がある。本

試験では薬量が多いほどねじれ症状が発生し、最も多い薬量の200g・10a⁻¹では1割程度の株で発生した(表6)。しかし、5月下旬頃にはねじれ症状株と無症状株の見目の違いはなくなり、可取収量は薬量が多いほど高まる傾向が見られた(表5)、薬害を原因とする収量減は発生しなかった。薬量が多いと収穫前の雑草が少なくなる傾向が見られたが(表7)、いずれの処理区も雑草量は多くなく、収量に差が生じた理由については判然としなかった。散布時期は、遅くなるほど高温傾向となり薬害リスクが高まるが、4月1日散布と4月12日散布の間で薬害発生株率に有意差は認められず(表6)、可取収量でも有意差は認められなかった(表5)。一方、収穫前の雑草は散布時期が遅いほうが少なくなる傾向が見られた(表7)。以上の結果から、本県の水田土壌で直播栽培した‘もみじ3号’に対して4月上旬にシアナジン水和剤を散布した場合、50～200g・10a⁻¹の範囲では可取収量に影響するほどの薬害がでる可能性は低いと考えられた。ただし、200g・10a⁻¹ではねじれ症状が多く発生するため、実用上は薬害リスクと収穫前の雑草量のバランスを考慮して、100g・10a⁻¹を4月10日前後までに散布することが適切と考えられた。注意点として、シアナジンは多雨や高温といった気象条件のほか、砂土や水はけの良い土壌でも薬害リスクが高まるため⁵⁾、そういった圃場では使用を避ける必要がある。また、タマネギの品種によって薬害の出方が異なる可能性があるため、その点も留意しなければならない。

2024年播種は、4月5日にシアナジン水和剤とプロスルホカルブ乳剤をそれぞれ散布する区および無処理区を設けて効果比較を行った。品種は中晩生品種‘もみじ3号’と中生品種‘ターザン’の2品種を用いた。シアナジン水和剤は前年の結果から薬量を100g・10a⁻¹とした。プロスルホカルブ乳剤は所定範囲内の最大量である500ml・10a⁻¹とした。本試験では両剤ともに薬害はほぼ発生しなかった(表11)。散布日以降、前年と比較して低温で降水量も少なかったため(表3、表8)、薬害が発生しにくい気象条件だったと考えられた。可取収量は処理区間で有意差は認められず、‘もみじ3号’は約5t・10a⁻¹、‘ターザン’は約2t・10a⁻¹であった(表10)。収穫前の雑草は、全雑草の本数では処理区間の有意差はなかったが、新鮮重は無処理と比較すると両剤ともに防除効果が認められた(表13)。全雑草の新鮮重の対無処理比は‘もみじ3号’でプロスルホカルブ(対照)区が55.4%、シアナジン区が14.7%、‘ターザン’ではそれぞれ42.1%、15.8%となった。機械収穫の観点から見ると、無処理区ではタデとノボロギク、プロスルホカルブ区はノボロギクが大きく生育していたため、事前に手取り除草が必要と考えられたが、シアナジン区は手取り除草なしで機械収穫が可能と考えられた。以上の結果から、タマネギ収穫期の雑草に対してシアナジン水和剤の防除効果は高く、収穫機での掘取りやピッカーによる拾い上げなどの機械収穫作業時の労働負荷低減に有効と考え

られた。

臼木 (2021)⁶⁾ は、タマネギの直播栽培が定着するためには全国で利用できるより多くの除草剤が求められる、と指摘している。本試験ではシアナジン水和剤の春期土壌処理の効果を検討し、タマネギ収穫期の雑草に対して防除効果が高いことが示唆された。

シアナジン水和剤は直播栽培では「播種後出芽前」の登録しかないため、春期に散布するためには農薬の変更登録が必要である。しかし、変更登録は原体メーカーが採算性などを考慮して申請を判断することであり、今後、直播栽培が普及拡大していくことが重要となる。また、これとは別に、改正農薬取締法 (2018 年 12 月 1 日施行) において、全ての農薬について定期的に最新の科学的知見に基づき安全性等の再評価が行われており⁷⁾、現在、シアナジンは再評価の審査中である。したがって、仮に変更登録を申請しても、再評価審査終了後の変更登録審査となるため、変更登録までに時間がかかると考えられる。このため、現状では収穫期の雑草対策は既存の登録剤と中耕除草機で対応するしかない。シアナジン水和剤は移植栽培では「定植活着後但し収穫 30 日前まで」の登録となっているため、直播栽培において、収穫まで 1 ヶ月半以上前である 4 月上旬の春期に散布しても作物残留のリスクは低いと考えられる。また、本試験で葉害や防除効果に問題がなかったことから早期の変更登録が望まれるが、今後はシアナジンに限らず、さらに多様な系統の除草剤が使用できるようになることが期待される。

直播栽培は移植栽培と比較して播種および育苗、定植にかかる労働時間を大幅に削減でき、定植機などの機械代および育苗に必要な資材代がかからないうえ、パイプハウスなどの育苗施設を確保する必要がない。このため、3ha 規模で導入した場合、移植栽培に比べ固定費は 71%、変動費は 94%、作業労働時間は 76% となることが試算されている⁸⁾。本県において、導入面積はごくわずかではあるものの、圃場整備事業を進める地域で高収益作物の栽培を拡大する手段として取り入れる事例や、一部の個人農家でも取り組み始める事例がでてきた。近年は高齢化による生産者数の減少により省力的な栽培方法へのニーズが高まっていることや、気候変動により移植栽培の育苗時期が高温となり良質な苗を作ることが困難になってきていることから、今後のタマネギ栽培は、移植栽培を基本としつつも、状況に応じて生産者が直播栽培を選択できるようにすることが必要と考えられる。生産者が安心

して直播栽培に取り組むためには、少なくとも移植栽培並みの除草剤の種類が使えることが望まれるため、農薬メーカーなどから情報を得ながら、本県でのタマネギ直播栽培の普及について模索していきたい。

5. 謝辞

本研究を行うに当たり、シアナジン水和剤の使用法や雑草の同定に関するご助言を頂きましたアグロ カネシヨウ株式会社の安藤和俊氏、木田修一氏、機械操作や栽培管理についてご協力頂きましたヤンマーアグリジャパン株式会社および農事組合法人飯開の里はやしだの方々、各種調査にご協力頂きました東近江農業農村振興事務所の方々に深く感謝申し上げます。

6. 引用文献

- 1) 井田陽介・近藤由紀子・松田眞一郎. 2024. 滋賀県における水稲跡タマネギ直播栽培の収量性の検討. 滋賀農技セ研報. 58 : 1-8
- 2) 横田祐未・八木田靖司・石井詩歩・大竹祐一・臼木一英・室 崇人・松尾健太郎. 2022. 福島県のタマネギ秋播き直播栽培における雑草防除体系の開発. 園学研. 21 (2) : 229-235
- 3) 杉戸智子. 2020. 北海道における直播タマネギ生育初期の中耕除草とプロスルホカルブ乳剤の併用効果とタマネギへの影響. 植調. 54 : 2-6
- 4) 松尾健太郎・山本岳彦・山崎篤. 2020. 東北地域のタマネギ春まき直播栽培における溝畝播種法の効果. 農作業研究. 55 (2) : 65~70
- 5) アグロ カネシヨウ株式会社. 2016. 農薬抄録.
- 6) 臼木一英. 2021. 我が国におけるタマネギ直播栽培の技術的課題と研究動向. 園学研. 20 (3) : 257-263
- 7) 農林水産省ホームページ
<https://www.maff.go.jp/j/nouyaku/saihyoka/>
- 8) 全国農業協同組合連合会. タマネギの秋まき直播栽培マニュアル令和 5 年度版

7. Summary

We evaluated the weed control efficacy and phytotoxicity of spring soil treatment using Cyanazine Wettable Powder during the harvest period in the direct seeding cultivation of onions. On October 13, 2023, Momiji 3-go' onions were direct-seeded and Cyanazine Wettable Powder was applied on April 1 or April 12 the following year at three dosage levels: 50 g, 100 g, and 200 g

per 10 a each diluted in 100 L of water. The results showed that higher dosages corresponded to a greater reduction in Crabgrass, whereas later application on April 12 tended to decrease sedge. Furthermore, no combination of application date and dosage resulted in phytotoxicity levels that were severe enough to affect the marketable yield. On October 22, 2024, 'Momiji 3-go' and 'Tarzan' onions were direct-seeded, and Cyanazine Wettable Powder was applied on April 5 the following year at a dosage of 100 g per 10 a diluted in 100 L of water. The observed phytotoxicity was negligible, and the weed control efficacy of Cyanazine Wettable Powder was similar to or superior to that of the control herbicide, Prosulfocarb Emulsifiable Concentrate. In particular, strong suppression effects were observed against smartweed and Tasmanian goosefoot. Based on the above findings, spring soil treatment using Cyanazine Wettable Powder demonstrated high weed control efficacy against weeds observed during the onion harvest period, without affecting marketable yield even when phytotoxicity occurred. This is expected to reduce the workload required for weeding during mechanical harvesting operations such as digging with harvesters and collection with pickers.

**BULLETIN
OF THE
SHIGA PREFECTURE AGRICULTURAL TECHNOLOGY
PROMOTION CENTER
No. 59
March, 2026**

Original Papers

- Rie KUSUDA, Kunihiko TAKEHISA, Takehiro NO, Yumi INODA, Kie KAWAMURA, Hiroyuki HASUKAWA
Reduction of brown rice (*Oryza sativa* L. cv. Koshihikari) inorganic arsenic
concentration by water-saving management and iron amendments
in Shiga Prefecture 1
- Toshiyuki MATSUMOTO
Investigation of Forecasting of *Discula theae-sinensis* Using the Leaf Wetness
Sensor 17
- Daisuque KITANO, Rinshiro MASUDA, Atsushi KONDO, Nobuyoshi KOKUBO and Yoshiya OBATA
Reduction in bacterial rot of internal scales of autumn-planted onions
by controlling onion thrips *Thrips tabaci* in Shiga Prefecture
..... 22
- Yosuke IDA, Shinichiro MATSUDA
Weeding Efficacy and Phytotoxicity of Spring Soil Treatment using Cyanazine
Wettable Powder during the Harvest Period in Direct-sown Onion
..... 31

**Published by The SHIGA PREFECTURE AGRICULTURAL TECHNOLOGY
PROMOTION CENTER
Azuchi-cho Dainaka 516, Omihachiman-shi, Shiga 521-1301 JAPAN**

滋賀県農業技術振興センター研究報告第59号

令和8年（2026年）3月発行

発行所 滋賀県農業技術振興センター
〒521-1301 滋賀県近江八幡市安土町大中516
TEL(0748)-46-3081

編集 農業技術振興センター編集委員会