

この原因について土壌硫黄酸化能力の差異を考え、4) 土壌硫黄酸化能評価試験において検討した。

【結果：土壌酸性化処理による雑草抑制効果】 令和 2 年の試験では強酸性処理でムカデ芝定植後 1 ヶ月間以上雑草発生が効果的に抑制されたが、本検証試験においては強酸性処理区でも定植後直ちに雑草が発生し始めた (図 29)。畦畔 A、B ではメヒシバ、畔 C ではアメリカセンダングサが定植後直ちに発芽を始め、雑草発生を効果的に抑制できなかった。これは、雑草の発芽を抑制するレベルにまで強酸性化していなかことが原因と考えられ、強酸性化するまでに発芽した雑草に対する効果は低く、発芽して根が 3cm よりも深く達していた雑草には、強酸性処理の効果は期待できないといえる。ただし、発芽雑草個体数は硫黄華未添加区 (C 区、P 区) より少なく (目視による判定)、強酸性化の効果は認められた。

メヒシバやアメリカセンダングサは、7 月中旬までは強酸性処理で抑えられたが、7 月中旬～9 月上旬、畦畔 B、C では P3 区でも旺盛に成長し、草丈が 60～70cm 以上に達して密に繁茂した (図 30)。畦畔 C は雑草生育が最も旺盛となった 8 月に最も強い土壌酸性状態であったが、強酸性状態になる前に発芽していたメヒシバとアメリカセンダングサの生育を抑制できなかったといえる。メヒシバやアメリカセンダングサのような大型の遮蔽度の高い雑草種は、一旦発芽すると 7～8 月に旺盛に生育繁茂して (9 月中旬以降の雑草発生量は大きく減少するが)、その結果、ムカデ芝は雑草に覆われて、生育が著しく抑制されていた。



図 29. 種子雑草の発芽
定植 1 週間後

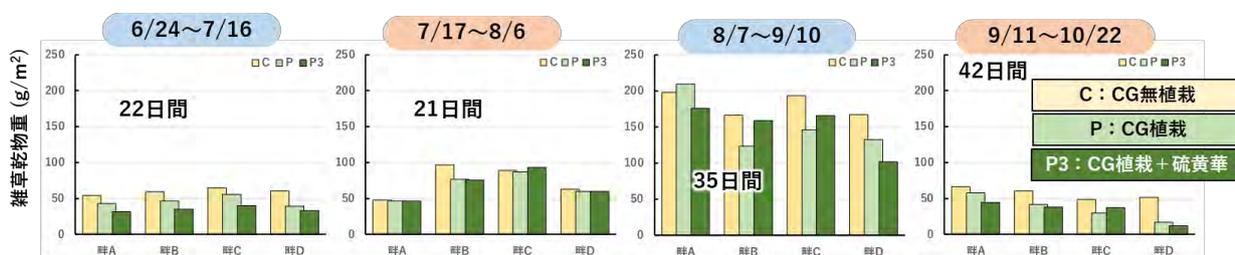


図 30. 時期別にみた各処理区で発生した雑草の乾物重

これらの雑草の発生を抑制する土壌強酸性処理のタイミングを検討する必要があるが、「強酸性処理をおこなっても雑草が繁茂することは想定されるリスクである」と捉え、発生する雑草は、刈り払って除去することを前提に管理すると考えることが实际的である。すなわち、定植から約 2 ヶ月間 (7～8 月) の雑草管理を必須とする。なお、メヒシバやアメリカセンダングサが少なく多様な雑草種で構成されていた畦畔 D は、土壌 pH が 3.5 程度まで低下しており、8 月上旬以降の雑草の発生を乾物重で 20% 以上減少させた。

【結果：センチピードグラスの生育への影響】

8 月～9 月上旬、畦畔 A、B、C では強酸性処理区においてもムカデ芝は繁茂した雑草に覆い隠され、葉色が低下し葉も細くなり徒長した。8 月中下旬におこなうべき草刈りを 9 月上旬まで約 2 週間延ばした結果であり、この時期の草刈りの重要性をよく示す事例である。一方、強酸性処理で効果的に雑草抑制された畦畔 D は雑草による遮蔽程度が低く維持されたため、ムカデ芝は健全な状態に維持され匍匐伸張も良好で旺盛に生育していた。

雑草に覆われるとムカデ芝の生育は著しく抑制されるが、雑草繁茂下でも硫黄施与した強酸性区 (P3 区) は、P 区よりもムカデ芝の生育が良好であった。ムカデ芝の最長匍匐長は匍匐本数と相関があり、匍匐長が長いほど匍匐本数が多く、ムカデ芝の生育が良いことを意味する。図 31 のとおり、20cm 以上の匍匐発生株の割合を比較すると、雑草被覆のダメージが最も大きかった 9 月上旬において、畦畔 A では P 区 54%、P3 区 66%、畦畔 B では P 区 91%、P3 区 100%、畦畔 C では P 区 78%、P3 区 100%、畦畔 D では P 区 64%、P3 区 98% となり、雑草繁茂下においても強酸性区のほうが生育良好であった。

ムカデ芝の生育状況は、最終的に被覆状況に反映され、強酸性処理で雑草が最も抑制された畦畔 D の P3 区では 11 月上旬に 75% に達し匍匐がほぼ全面を被覆した (図 32、33)。強酸性処理で雑草繁茂を抑制できなかった畦畔は被覆状況が悪く、畦畔 B で約 40%、畦畔 A、C は、20~30% にとどまったが、P3 区の方が P 区より被覆率が高く、強酸性処理による被覆状態の改善効果が認められた。2021 年は 9 月中旬から約 1 ヶ月間続いた早天のため、例年であれば被覆率が 1.5~2 倍に増大する時期であるが、乾燥ストレスにより被覆拡大が抑制されていた。

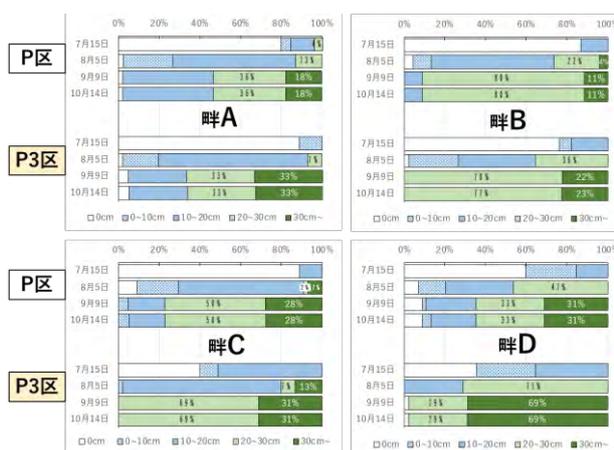


図 31. 各株の最長匍匐長さ別割合 (各処理区 45 株平均)

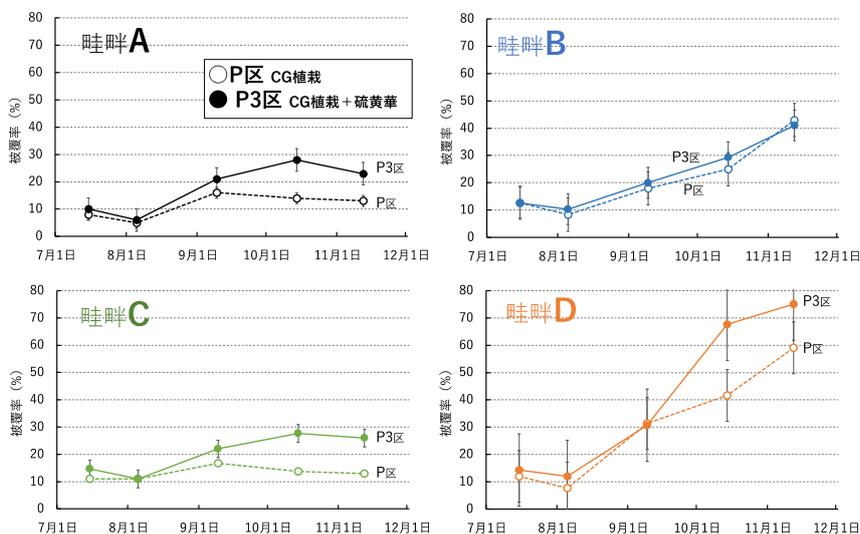


図 32. 被覆率の変化

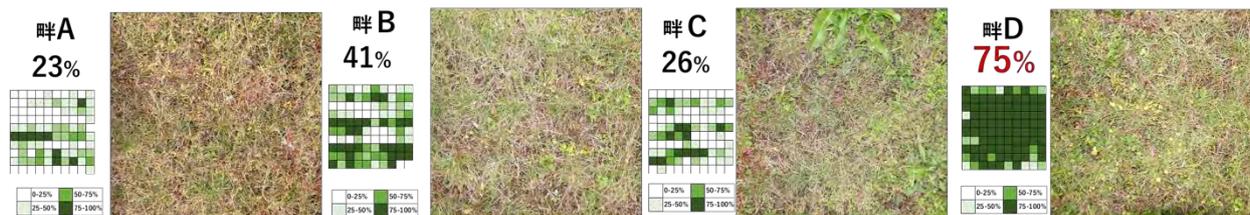


図 33. 各畦畔の強酸性処理区の最終被覆率(11 月 12 日)

2年目の被覆率は定量化していないが、雑草繁茂状況と対応しており、雑草が多い畦畔は被覆状況が不良であった（図 34）。P3 区の 5 月上旬の春雑草量は P 区に対して、畦畔 A で 65%、畦畔 B で 64%、畦畔 C で 16%、畦畔 D で 48% 低下しており、強酸性処理の 2 年目の雑草抑制効果が認められた。春雑草の発生の少ない畦畔 A、B の P3 区はほぼ全面が被覆されていた。畦畔 C はギシギシのような地下茎雑草が再生しており、被覆状況も昨年から大きく改善していなかった。硫黄華による強酸性化処理は初年度夏季の夏雑草を抑制できないケースがあるが、翌年の春雑草抑制効果が認められ、2 年目の被覆拡大に貢献していた。



図 34. 2年目の春雑草発生状況(畦畔 A, 2022 年 5 月 11 日)

【結論】 土壤強酸性化処理で効果的に雑草が抑制できず雑草が繁茂するケースがある。その原因は、硫黄華による土壤酸性化と雑草の発芽のタイミングのズレであり、強酸性化するまでに発芽した雑草に対する強酸性処理の効果は低い。そのため、強酸性化処理で抑えきれない雑草は、刈り払って除去することを基本に対応しなければならない。とくに 7～8 月の雑草管理が重要である。硫黄施与区では、硫黄無施与区と比較して雑草繁茂下でもムカデ芝の生育が良好に維持されるため、大型の遮蔽度の高い雑草種が繁茂しても、夏季の草刈り（高刈り）を適切におこなうことで、ムカデ芝の枯死を防ぐことができれば、初年度の被覆率が 50%程度に達していなくても 2 年目の春雑草を抑制して被覆拡大につながる。また、土壤 pH の低下が不十分であった、あるいは低下速度が遅かったということも検討の課題であり、これは土壤の硫黄酸化能が影響した結果と考えられる。

4) 土壤硫黄酸化能評価試験

土壤強酸性化のための効果的な硫黄華施与の検討(屋内試験、現地畦畔試験)令和 4 年度

ムカデ芝ピット苗移植工法において施工初年度の雑草抑制のための簡便かつ効果的な手法として、硫黄華散布による畦畔法面土壤表面の強酸性化の有効性を検討してきた。しかし、硫黄華散布により設定したいレベル（pH3 付近）まで強酸性化できないケースがあり、これは開発工法の安定化のため課題である。そこで、令和 2, 3 年の現地試験において強酸性化が良好、不良であった畦畔土壤の硫黄酸化能を評価し、土壤を強酸性化させるための硫黄華施与量の判断基準を検討するとともに、土壤が十分に強酸性化しない場合の対策について検討した。

① 土壤の硫黄酸化能の評価

【方法】 鳥取県八頭町内（図 2 参照）および大山町内の 8 か所の農地畦畔（畦畔 A、B、C、D、E、F、G、H、畦畔 A、B は土壤 pH 低下が不十分）の硫黄添加歴の無い土壤を供試して

硫黄添加培養実験*をおこなった (A、B、C、D、E、F では硫黄添加歴がある土壤も採取)。

*硫黄添加培養実験：風乾細土 20g を 100ml 容ポリ瓶に入れ、硫黄華を 0、50、100、200mg 添加し、最大容水量の 50%相当の水分条件、25℃で培養した。1 週間、4 週間後に pH(H₂O) を計測し硫黄華添加量と土壤 pH の関係を求めた。

【結果：土壤の硫黄酸化能を考慮した硫黄華施与】 設定した pH に低下させるのに要する硫黄華量を求めるために次の 2 つの方法を適用した。①硫黄華添加培養実験から求められた硫黄華添加量と pH 低下との関係 (緩衝曲線法) から任意の pH に設定するのに必要な量を求める方法、②土壤診断によるバランスのとれた土づくり Vol.3 -土壤診断に基づく改善対策- ((財) 日本土壤協会) に示されている pH を 1 下げるのに要する硫黄華量にもとづいて算出する方法 (本試験では風乾土 100kg の土壤 pH を 1 下げるのに必要な硫黄華量として 80g を採用した)。

②の方法はあくまでも目安であり土壤の種類や特性の影響を大きく受けると考えられる。①の方法は、実際に施工する畦畔の土壤を用いるため、理論的に合理的であり、求めた必要量を施与すれば、希望の土壤 pH に調整できるはずであるが、硫黄は土壤微生物の作用で硫酸に変化するため、培養時の水分や温度条件等の影響を受ける。令和 2 年におこなった最初の強酸性化試験では、①と②の方法で求めた必要量はほぼ一致していたが、令和 3 年の検証試験の畦畔土壤は、①の培養による方法では pH が 5 程度までしか低下せず (培養条件が過湿気味であったのかもしれない)、②の方法で求めた量を施与したが、結果として雑草抑制効果が期待できる pH3.5 以下にまで低下できない畦畔があった。

そこで、改めて酸性化傾向が異なった土壤を適湿な水分条件で培養して、添加した硫黄華量に対する pH の低下傾向を比較した。過湿状態では硫黄がスムーズに酸化しないため、最大容水量の 50%の水分条件 (降雨後 1 日経過した土壤水分状態を想定) を適用して硫黄を添加培養した。その結果、土壤が強酸性化しない原因として、硫黄華の添加量不足 (初期土壤 pH が高いことも影響する)、土壤の硫黄酸化能の低さ、そして両者が影響しているケースの 3 つが考えられた (表 3)。令和 3 年の検証試験畦畔 (A、B、C、D) では、最低 pH に達する時間が長く、2~3 ヶ月を要し、土壤の硫黄酸化が非常に遅であったが、令和 2 年 (2020 年) の試験サイトは 1 ヶ月で最低 pH に達しており、硫黄酸化能の高い環境であった。畦畔 A、B では pH 低下が緩慢であることに加えて、現地の最低 pH が 3.5 に達していなかった。これは硫黄華の施与量の不足が原因と考えられた。令和 3 年の検証試験では硫黄増量施与の影響を確認するため、畦畔 A、B にコドラート設置区以外に P3 区の 1.5 倍量を施与した処理区を別に設けていた。その結果と比較すると、pH 低下時間の短縮はできなかったが、最低 pH を 3.5 以下にすることができたことから裏付けられた。なお 1.5 倍量施与 (≒100g/3cm/m²) でもムカデ芝への悪影響は認められなかった。

表 3. 硫黄華添加培養実験と現地土壤 pH の変化から推定する硫黄華施与量の過不足

	pH3にするために 要する硫黄華量 (g/3cm・m ²)	硫黄華1gあ たりの土壤 pH低下能*	現地初期土 壌pH (a)	設定pH3へ の下げ幅	4週後の現 地土壤pH (b)	現地土壤 のpH変化 (b-a)	現地土壤の 最低pH	4週後現地土 壌pHとpH3と の差異	現地土壤最 低pHとpH3 の差異	硫黄華 施与量	4週目で土 壌pH3.5以 下	最低土壤 pH3.5以下	pH低下 傾向
畦畔A	65	-0.030	6.1	3.1	4.0	-2.1	3.6	13週目	1.0	0.6	不足		ゆっくり
畦畔B	67	-0.016	5.6	2.6	4.4	-1.2	4.1	13週目	1.4	1.1	不足		ゆっくり
畦畔C	79	-0.015	5.8	2.8	3.8	-2.0	3.1	9週目	0.8	0.1	適量	到達	ゆっくり
畦畔D	57	-0.020	5.2	2.2	3.8	-1.4	3.5	9週目	0.8	0.5	やや不足	到達	ゆっくり
畦畔A 1.5倍	98		6.1	3.1	4.3	-1.8	3.1	13週目	1.3	0.1		到達	ゆっくり
畦畔B 1.5倍	101		5.6	2.6	4.1	-1.5	3.3	13週目	1.1	0.3		到達	ゆっくり
2020年試験畦畔	50	-0.019	5.0	2.0	3.4	-1.6	3.4	4週目	0.4	0.4	適量	到達	良好
大山町畦畔 2022年	100	-0.017	5.8	2.8	4.1	-1.7	3.8	12週目	1.1	0.8	やや不足		ゆっくり
実証畦畔1 2022年	100	-0.017	5.2	2.2	未計測		3.3	11週目	-	0.3		未計測	到達
実証畦畔2 2022年	100	-0.023	5.2	2.2	未計測		3.1	11週目	-	0.1		未計測	到達

*硫黄華培養試験の4週間培養結果より

以上の結果から、硫黄の施与量は、施工する畦畔土壌毎に硫黄華を添加培養して必要量を求めることは現実的ではないため、やや多めの量を一律施与することが実際的と考えた。最終的に土壌 pH を 3.5 以下にでき、ムカデ芝に悪影響がない 100g/3cm/m² を暫定的に基準量に設定した。

令和 4 年度に実証試験をおこなった試験畦畔（八頭町、大山町）において硫黄華施与量 100g/3cm/m² を適用したところ、ムカデ芝の生育にダメージを与えることなく土壌を強酸性化して、常にムカデ芝に日が当たる程度に雑草発生量（主体はメヒシバ）を抑制することができた。令和 2 年施工畦畔のように硫黄酸化能の良好な法面土壌では過剰施与の可能性はあるが、緩衝曲線の結果から低下しても pH2.9~3.0 程度と予測され、ムカデ芝に対する障害はないと考えているが、酸緩衝能が低い粗粒土壌では検証が必要である。

硫黄華による土壌強酸性化のもう一つの課題は pH 低下が遅いことであり、雑草の発芽タイミングとの関係で雑草抑制効果に直接的に関わってくる。この課題に対して、硫黄華の施与履歴のある土壌では pH 低下速度を 2 倍程度速める傾向が認められたことから、事前に硫黄華を施与して土壌の硫黄酸化能を高めておくか、pH の低下が緩慢な場合には、硫黄華を追加施与することが有効と考えている。

② 硫黄華の追加施与による pH 低下効果

【方法】 2021 年の検証試験において、pH 低下が不十分であった畦畔 A、B の硫黄華処理区（P3 区）に最初の硫黄華施与から 3 ヶ月後の 9 月中旬に最初の施与量の 1.5 倍量の硫黄華を追加散布して土壌 pH の低下効果と秋雑草、2 年目の春雑草の抑制効果を検討した。

【結果：硫黄華の追加施与効果】 硫黄華施与履歴を持つ土壌の硫黄酸化能が高くなっていることは、土壌の硫黄酸化スピードを高めることに適用できる可能性がある。令和 3 年の検証試験において pH 低下が不十分であった畦畔 A、B の硫黄華処理区（P3 区）において 9 月中旬に硫黄華を追加散布した結果、畦畔 A、B ともに、4 台前半に上昇していた pH がわずかに 10 日間で 1 程度低下し、その後 3~3.5 に維持された。硫黄華を追加施与しない場合、土壌 pH は 11 月上旬には 4.5 程度まで上昇した（[図 35](#)）。硫黄華の追加施与は pH 低下が不十分な場合、土壌を強酸性化する有効な手段になると考える。

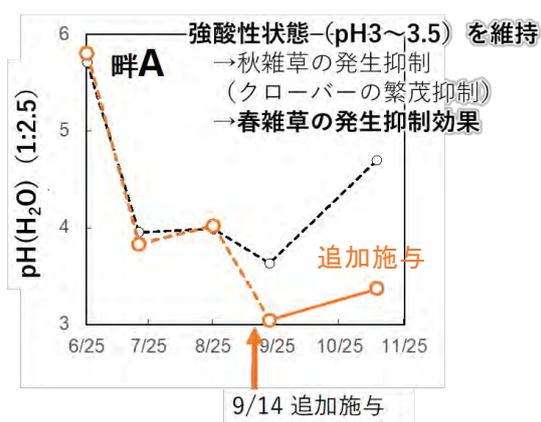


図 35. 硫黄華追加施与による pH 低下効果

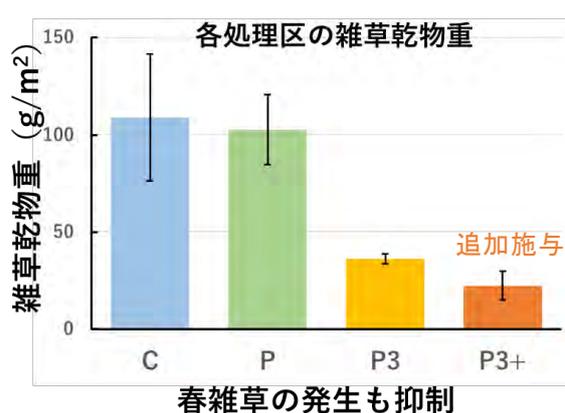


図 36. 硫黄華追加施与による春雑草抑制効果

硫黄華追加散布の結果、雑草発生抑制効果が低下し、秋雑草、とくにシロツメクサ（群落化してムカデ芝の脅威になる）の発生が抑制された。9 月中旬~2 ヶ月間はムカデ芝が被覆率を大きく高める期間であるが、強酸性化による芝への悪影響は認められなかった。強酸性処理効果が低下する 9 月中旬以降の硫黄華追加施与は、秋雑草の発生を抑制し、

センチピードグラスの被覆拡大を促す効果が期待された。また、**図 36** のとおり、2 年目の春雑草の発生も顕著に抑制され（晩秋に発芽して越冬するカラスノエンドウなどのマメ科雑草の抑制が顕著）、5 月上旬の雑草発生量が P3 区に対して 40%以上低下した（P3 区は P 区に対して 60～65%以上雑草量が減少、よって硫黄追加施与の P3+区は P 区に対して 80%以上雑草量が減少）。春雑草の抑制によってムカデ芝の繁茂状況も良好になり、施工年に 30～40%であった被覆率が 5 月上旬ではほぼ全面を被覆した状態になっていた。

【結論】 硫黄華施与に対する土壌の強酸性化のレスポンスの違いは、硫黄華施与量、土壌の硫黄酸化能が影響していた。硫黄華を一律 100g/3cm/m²相当施与することでムカデ芝への悪影響を抑えながら雑草抑制効果の高い pH3.5 以下にできた。硫黄施与履歴のない土壌では硫黄の酸化が緩慢であるため、それを高めるには事前に硫黄華を添加しておくこと（適切な予備添加量の設定は今後の課題）が効果的であるとともに、硫黄華の施与量の不足により 3 ヶ月以上経過しても pH が 3.5 以下にならない場合には、硫黄華の追加施与が効果的である。これにより土壌 pH をより早く低下させられ、秋季から翌春の雑草抑制効果が期待できる。

1. 7 実証試験（現場適用）の概要、結果、課題等

(1) IM 工法の実証試験

硫黄華施与で強酸性化した土壌表面が見えないマルチのように機能して雑草を抑制することから、この手法を IM（IM; Invisible Mulching、見えないマルチ）工法と命名し、令和 2～3 年度の 2 年間の検討結果を踏まえて、令和 4 年度、施工手順を作成するための実証試験に展開させた。

実証試験では、現場への実装を前提におき、硫黄華施与による土壌表面強酸性化処理とピット苗定植に要する作業の手順と所要時間を見積もること、実際の施工規模における本工法による施工初年度の雑草抑制効果とムカデ芝の被覆状況の検証、さらに強酸性化処理によって抑制できない雑草の対応について検討することを目的とした。また、実証試験の作業記録を元に IM 工法の作業面、コストにおける優位性を 2 つの苗移植工法（「BT 工法」、本事業で検討した「紙マルチ工法」と慣行草刈り管理と比較して検証した。

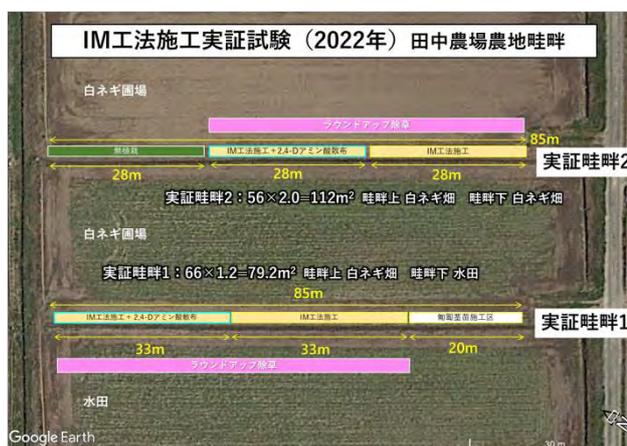


図 37. 実証試験畦畔

【方法】 鳥取県八頭町内の田中農場管理圃場畦畔で実施した。ムカデ芝の脅威となり、農地畦畔において一般的な雑草である「メヒシバ」を主要雑草とする 2 つの畦畔を選定した（**図 37**）。試験区は硫黄華を施与する標準施工区を二つ設置した（畦畔 1：法面高 1.2m × 長さ 66m 斜度 30～35 度、法面勾配 1：1.5～1.7、畦畔 2：法面高 2.0m × 長さ 56m 斜度 15 度前後、法面勾配 1：3.7 前後）。試験畦畔の一部を畦畔 1 では土壌強酸性化処理を行っていない葡萄苗施工区、畦畔 2 では無施工・無管理区（雑草繁茂を放任）とした。硫

黄華施与量は 100g/3cm/m² とした。作業の内容と手順は表 4 に示した。作業の流れは、施工畦畔準備、土壌表面強酸性化処理、定植そして雑草管理となる。各作業時間を 5 分刻みで計測すると共に高刈りの前後に写真を撮影し、雑草繁茂状況、ムカデ芝の被覆状況を記録した。なお、広葉雑草はメヒシバよりも草丈が低くてもムカデ芝の幼植物体を被覆して生育抑制する影響が大きいいため、各畦畔の試験区を半分に区切り、一方に広葉雑草に選択的に作用する除草剤（2,4-D アミン塩：石原産業）を散布して雑草抑制効果を検証した。

表 4. IM 工法実証試験の作業内容と所要時間

年月日	作業	実証畦畔	
		実証畦畔1 66m×1.2m=79.2m ² 斜度30~35°	実証畦畔2 56m×2.0m=112m ² 斜度15° 前後
2022/6/14	畦上の枯れ草除去	計測せず	計測せず
2022/6/16	茎葉処理剤散布	二つ畦畔の合計 60分/1人 (液剤調整10分, 散布40分, 片付け10分) 10倍液 6Lを10倍液5L/10a散布可能専用ノズルで散布	
2022/6/22	枯れ草除去 チップソー (発芽雑草も可能な限り除去)	60分/2人	90分/2人
2022/6/22	硫黄華処理 (表面散布+表面土壌との攪拌) 施与量: 100g/m ² 500μmメッシュ篩 (φ200mm) で散布	散布量8.00kg 40分/2人	散布量10.12kg 45分/2人
2022/6/28	ピット苗定植 15株/m ²	株間20cm×条間35cm 3段 990株 80分/4人	株間20cm×条間30cm 5段 1400株 105分/4人
2022/7/20	高刈① (刈り取り+刈草除去) 定植後22日目 除草剤散布のため (最初の高刈り時に実際的には①, ②どちらのタイミングで除草剤を散布すればよい)	55分/1人	60分/1人
2022/7/20	除草剤散布 (広葉雑草対策: 2,4-Dアミン塩) 薬剤濃度300g/100L/10a 処理は各畦畔の半分	二つの処理区合計 30分/1人 (薬剤調整5分, 散布20分, 片付け5分) 散布量 4L	散布量 5.6L
2022/7/30	高刈② (刈り取り+刈草除去) 定植後32日目	60分/1人	60分/1人
2022/8/22	高刈③ (刈り取り+刈草除去) 定植後55日目	55分/1人	60分/1人
2022/9/21	高刈④ (刈り取り+刈草除去) 定植後84日目	60分/1人	65分/1人
2022/10/28	高刈⑤ (刈り取り+刈草除去) 定植後121日目	35分/1人	30分/1人

【結果：雑草抑制効果とムカデ芝の生育・被覆状況】

硫黄華施与した半月経過後（7月7日）にはメヒシバを主体に雑草が発芽して生育し始めた。硫黄華を施与していない畦畔 1 試験区に隣接する匍匐苗試験区（IM 工法実証試験と同時期に雑草を除去して裸地化）では、7月7日、ほぼ全面にメヒシバ（草丈 10～20cm）が繁茂しており、硫黄華処理により雑草発生は完全には抑えられなかったが、無処理に比べると雑草発生を顕著に抑制していることが認められた（図 38）。

さらに 2 週間ほど経過した 7月20日、硫黄華施与区ではメヒシバが全面に発生して草丈 30cm に達していたが、雑草の密度は地表面が確認できるほど疎であり、ムカデ芝苗に光が十分に当たる状態であった。一方、匍匐苗試験区ではメヒシバが密に繁茂しており、土壌表面強酸性処理の定植初期における雑草抑制効果の高さが検証できた。

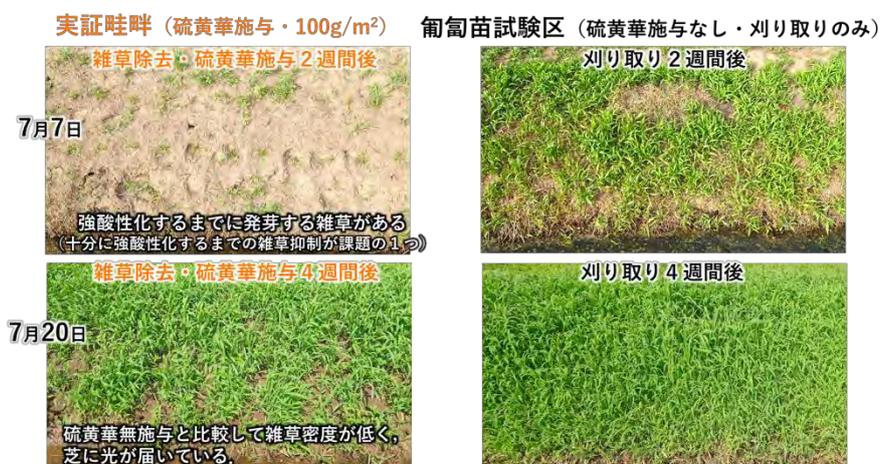


図 38. IM 工法の定植初期後の雑草抑制効果