

休廃止鉱山における坑廃
水処理の高度化技術調査
令和6年度 別添 3

休廃止鉱山の新たな緑化対策等に関するガイダンス
(別冊) 事例集【集積場等の緑化工事】

令和7年9月

経済産業省

独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構

目次

概要.....	1
1 X 鉱山、第一集積場の緑化状況調査.....	2
1.1 X 鉱山の概要（「X 鉱山展」展示物より抜粋）.....	2
1.2 緑化方法と緑化植物.....	3
1.3 調査の目的.....	5
2 現地調査及び分析.....	6
2.1 植生調査.....	6
(1) 方法.....	6
(2) 結果及び考察.....	7
2.2 土壌断面調査.....	8
(1) 方法.....	8
(2) 結果及び考察.....	8
2.3 土壌コアの三相分布の分析.....	9
(1) 方法.....	9
(2) 結果及び考察.....	9
(3) まとめ.....	9
2.4 植物周囲の土壌分析及び植物体分析.....	10
(1) 方法.....	10
(2) 土壌分析の結果及び考察.....	10
(3) 植物体分析の結果及び考察.....	11
(4) まとめ.....	13
3 現地植物の蒸散量及び含水量の解析.....	14
3.1 方法.....	14
3.2 結果及び考察.....	14
4 引用文献.....	16

概要

令和4年に作成、公開された「休廃止鉱山の新たな緑化対策等に関するガイダンス」は「捨石・鉱さいたい積場の手引」に則り、生態遷移を念頭におき自然の植生と一体化し鉱山跡地を元山化するものが最終目標とした場合、人の手をかけて植生遷移を助長させる際には、鉱山環境に適応できる植物種の選択が重要と考え、それらを提案することを目的に作成されたものである。具体的には高濃度の有害金属に対する耐性植物、自生植物を利用した植物の導入について述べ、本編では、鉱山環境における植生遷移、特徴的な鉱山植生、植物における重金属元素の必要性や毒性に関する基礎知見を説明した。また、国内外の文献検索により、重金属環境に自生する金属元素を蓄積する植物に関するデータをまとめた。さらに、「捨石・鉱さいたい積場緑化の手引」に従い、自生植物を利用した植物の導入方法についてまとめる一方で、現在進行中の鉱山跡地での一次遷移を想定した集積場での緑化に関わる研究例を示した。また、緑化対策技術に加え、実際の休廃止鉱山における緑化によるカーボンニュートラルに関する事例について、主に海外の事例を調査し、参考事例として取りまとめたものである。

今回、上記ガイダンスの別冊事例集として、集積場の緑化工事の記録がある X 鉱山を調査地として、1) 現在の植生や土壌の状況を把握し、2) 定着している植物の状況を明らかにすることで、現在の植生の成立要因を明らかにすることを目的とした調査を実施し、その成果を取りまとめた。

2006 年度に実播工を実施した調査地では、緑化植物から自生植物である草本、樹木への植生遷移が確認された。また現在でも、緑化植物であるヨモギとクリーピングレッドフェスクの定着が確認された。本調査地のススキは細根に高濃度の Al 及び Fe を、ヨシは細根に高濃度の Al を、アカマツは細根に高濃度の Al 及び Fe を蓄積していた。ススキ、ヨシ及びアカマツは鉱山跡地に自生し、根に金属元素を蓄積しても問題なく生育できる耐性機構を有しているため、調査地にも定着ができたと考えられた。

調査地において自生植物として植被率の高かったススキ、緑化植物として植被率の高かったヨモギを対象植物として、夏の日の蒸散量及び植物の含水量を調べた。ススキ及びヨモギの蒸散量や保水量、植物が発達させた A 層の保水量を考慮して解析を行った結果、植物の定着とともに植物の蒸散量・保水量が増加し、坑廃水量の低減に寄与している可能性が考えられた。

以上に示した本研究調査地の X 鉱山での緑化事例は、緑化植物や自生植物の利点を活かした鉱山跡地の緑化の成功例として、モデル事例となることが期待される。

なお、本事例集は国立大学法人筑波大学に多大なるご尽力をいただき作成したものである。

1 X 鉱山、第一集積場の緑化状況調査

1.1 X 鉱山の概要（「X 鉱山展」展示物より抜粋）

本研究の調査地は、1957年に閉山したX 鉱山（義務者不存在の廃止鉱山）である。X 鉱山は1720年に開坑し、1915年から大日本鉱業株式会社の経営になった。大日本鉱業株式会社はX 鉱山やその他の鉱山も対象として探鉱・採鉱する鉱山会社であった。1917年には全盛期を迎え、1941年から1944年にかけて銅鉱の年間生産量は2万トンを維持したとされる。X 鉱山の鉱床は黒鉱鉱床と網状鉱脈の2種類あり、主要鉱床は熊の沢の網状鉱床で母岩は石英粗面岩である。鉱石は黄銅鉱、斑銅鉱を主とする。

1979年以降、休廃止鉱山鉱業防止工事に関する長期計画において、「X 鉱山鉱害防止工事全体計画（1979年-1991年）」をもとに山元対策が実施された。対策内容としては、1) ズリ排工、ズリ堆積場の柵工、土留工、覆土植栽工、集排水路工、2) 坑口閉そく工、3) 沈殿池埋戻工、4) 山腹工などがあげられる（能登屋・佐々木, 1988）。2001年度から2007年度にかけては、堆積場を対象とした緑化工事を実施している（独立行政法人 エネルギー・金属鉱物資源機構, 2024）。2001年度には実播工・水路設置・整地工を行い、50 cm 厚の覆土工事を実施した。2002年度には実播工・道路、2003年度には実播工・整地、2004年度には安定処理・水路設置、2005-2006年度には実播工・水路、2007年度には実播工・整地・水路に関する工事を行った。2001年度以降の緑化工事には総額3.5億円投じている。

1.2 緑化方法と緑化植物

実播工の実施例として、2006 年度及び 2007 年度における吹き付け材の種類、量及び単価を表 1 に示した。また、緑化に使用された資材の機能を表 2 に示した。表 2 は金属鉱業事業団（1983）及びカネコ種株式会社 HP を参考にまとめた。

表 1 緑化に使用された吹き付け材

吹き付け材/m ³	2006 年度		2007 年度	
	数量	単価	数量	単価
岩盤緑化用バーク堆肥	600 L	12 円	600 L	12 円
保水材・ボンテンラン土	200 L	20 円	200 L	18 円
土壌改良材・ケービーグリーン	200 L	60 円	200 L	52 円
土壌微生物・キンコンクリアー	5 kg	2000 円	5 kg	1800 円
無機質高度化成	4.5 kg	79 円	4.5 kg	79 円
浸食防止材・高分子系	3 kg	1340 円	3 kg	1500 円

表 2 緑化に使用された吹き付け材の機能

吹き付け材	機能
岩盤緑化用バーク堆肥	水はけ、水もち、通気性、土壌保肥力が良好、土壌微生物活性の上昇
保水材・ボンテンラン土	保水力、保肥力、透水性、通気性が良好
土壌改良材・ケービーグリーン	不明
土壌微生物・キンコンクリアー	不明（微生物資材：共生菌を利用？）
無機質高度化成	化成肥料（窒素・リン酸・カリウムを合計した 成分有率が 30%を超過するもの）
浸食防止材・高分子系	団粒形成促進

例として、2006年度及び2007年度における実播工の際に使用した緑化植物種子を表3に示し、緑化植物の生態学的特性を表4に示した。表4は金属鉱業事業団（1983）及びカネコ種株式会社HPを参考にまとめた。

表3 現地で使用された緑化植物

吹き付け種子/m ³	2006年度		2007年度	
	数量	単価	数量	単価
トールフェスク	0.295 kg	540 円	0.295 kg	540 円
クリーピングレッドフェスク	0.065 kg	520 円	0.065 kg	520 円
オーチャードグラス	0.1 kg	590 円	0.1 kg	590 円
ヨモギ	0.01 kg	2090 円	0.01 kg	2090 円
メドハギ	0.045 kg	2000 円	0.045 kg	2000 円

表4 現地で使用された緑化植物の生態学的特性

吹き付け種子	生態学的特性
トールフェスク	寒地型草種の中では、最も耐暑性、耐乾燥性に優れる。土壌適応性も高い。
クリーピングレッドフェスク	耐寒性、耐陰性、耐瘦地性に優れる。耐乾性があるが耐暑性、耐湿性は他フェスクに比べ劣る。冬型（3-5月、9-10月に成長がピーク）で夏の高温期には成長を休止する。
オーチャードグラス	耐陰性、耐寒性、土壌適応性に優れる。乾燥にやや弱い。寒冷地では混植が推奨される。冬型（3-5月と9-10月に成長がピーク）である。
ヨモギ	耐寒性・耐湿性に優れ、瘦地、乾燥地、陽地にも定着する。種子及び地下茎で繁殖する。全国に広く分布し、成長期間は5月-9月である。
メドハギ	瘦地、乾燥地、酸性土壌にも定着する。種子及び地下茎で繁殖する。根系の発達が良い。

1.3 調査の目的

金属鉱業等の休廃止鉱山では、As、Cd、Mn、Pb等の有害元素を含む坑廃水が流出し続ける状況にある中、このような坑廃水を放置し河川等に流出した場合、健康被害をはじめ、農作物被害や漁業被害等が発生し、深刻な社会問題を引き起こすことがある。これらの被害を回避するにあたり、休廃止鉱山を管理する地方公共団体等は坑廃水処理を昼夜問わず継続しているところ、本処理には大量の電力を消費するため、当該処理の省エネ化の対策が求められている。休廃止鉱山の鉱害防止対策については、坑廃水処理を半永久的に行う必要も予測されることから、将来的なグリーン・レメディエーション（元山回帰）など中長期的視点に立った鉱害防止対策技術の最適化、管理の高度化等に関する方向性についての検討を踏まえつつ、「休廃止鉱山の新たな緑化対策等に関するガイダンス」の改訂に資する鉱山跡地の緑化状況の調査を行い情報整理をする必要がある。そこで本研究では、緑化工事の記録がある X 鉱山・第一堆積場を調査地として、1) 現在の植生や土壌の状況を把握し、2) 定着している植物の状況を明らかにすることで、現在の植生の成立要因を明らかにすることを目的とする。また、オーストラリア政府は緑化に関するガイドラインにおいて、鉱山跡地における植生の機能として「植物の蒸発散による坑廃水量減少への寄与」を指摘している（Australian Government, Department of Industry Tourism and Resources, 2006）。以上から、現地に定着している自生植物としてススキ、緑化植物としてヨモギを選択し、これら植物における夏場の蒸発散量や保水量を把握することで、緑化が坑廃水処理量の減少にどの程度寄与するのかについて、知見を得ることとした。

2 現地調査及び分析

2.1 植生調査

(1) 方法

調査地である X 鉱山第一堆積場では、2001 年度から 2007 年度にかけて実施された緑化工事の施工方法や植栽植物の種類に関する記録が詳細に残っている。本研究では 2006 年に施工された箇所を対象として、1) 緑化植物（クリーピングレッドフェスク、トールフェスク、オーチャードグラス、ヨモギ、メドハギ）の生残状況、2) 周囲から供給された種子の定着による自生植物の定着状況に着目し、コドラート法により地表から 1 m 高における植被率を算出した。2024 年 6 月の事前調査において代表的な植生が確認された 2 地点において、道路から西方向に 120 m のライン A 及び B を設置した（図 1、図 2 及び図 3）。植生調査は 2024 年 7 月に実施し、ライン A 及び B に 1 m×1 m のプロットを設定し、プロット内の植被率、深度 13 cm の土壌体積含水率及び EC を測定した。コドラート内の 2 箇所を無作為に選び、土壌水分センサー（WET150, Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK）で土壌体積含水率及び EC を測定し、2 点のデータの平均値を 1 プロットのデータとして算出した。植生調査と同時にレベル測定による微地形の把握も行った。2024 年 10 月調査時にライン A 及び B の起点から 3 m が刈り込まれたため、植生調査及び土壌体積含水率の解析には道路側から 3 m 西側のプロットを 1 としてプロット 117 までのデータを使用した。

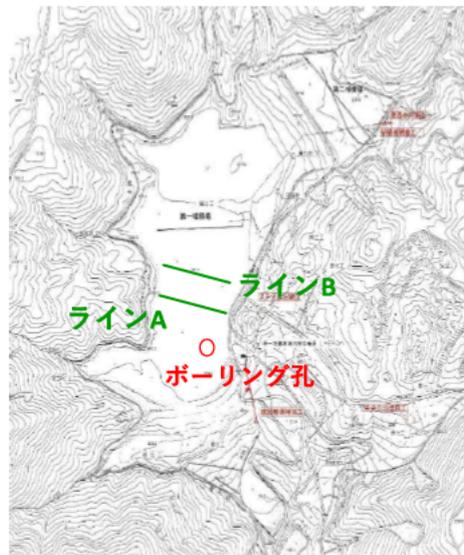


図 1 X 鉱山第一堆積場

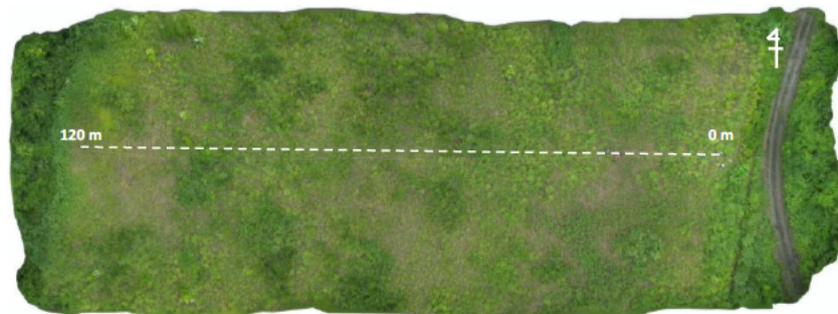


図 2 X 鉱山第一堆積場に設置したライン A の空撮写真（2024 年 7 月撮影）
白い点線はライン A を示す。



図 3 X 鉱山第一堆積場に設置したライン B の空撮写真 (2024 年 7 月撮影)
白い点線はライン B を示す。

(2) 結果及び考察

ライン A の土壌体積含水率は 16.2 %-65.0 %の間であり、ライン B の土壌体積含水率は 17.3 %-59.4 %の間であった。また、ライン A の土壌体積含水率の平均値±標準誤差は 39.6 ± 0.94 %、ライン B は 41.9 ± 0.86 %であった。以上の結果から、調査地の土壌は植物の生育には十分な水を含んでいると考えられた。また、地形と土壌体積含水率の間には明瞭な関係性は確認できなかった。

ライン A の EC の平均値±標準誤差は 57.3 ± 1.21 mS/m、ライン B の EC の平均値±標準誤差は 72.8 ± 2.42 mS/m であった。EC に対する農作物の抵抗性のデータ (JA 全農 肥料農薬部編, 2014) によると、ライン A 及び B の EC は植物の生育には問題ない値であると考えられた。

ライン A 及びライン B において植被率が最も高かった植物はススキであり、次にヨシであった。樹木の定着としてはライン A ではアカマツ、ライン B ではイタチハギ、アカマツが確認された。緑化植物としてはライン A ではクリーピングレッドフェスク、ヨモギが確認されたが、植被率は低かった。一方、ライン B では緑化植物としてヨモギが確認され、植被率は 4 番目に高かった。以上から、2001 年度以降 2007 年度まで毎年実施された実播工により緑化植物が良好に定着していた (図 4b) が、その後、周囲から種子の飛散により定着した自生植物であるススキやヨシの植被率が上昇したと考えられた。現在は周囲の森林から供給された種子により、樹木の定着が進んでいると考えられた。

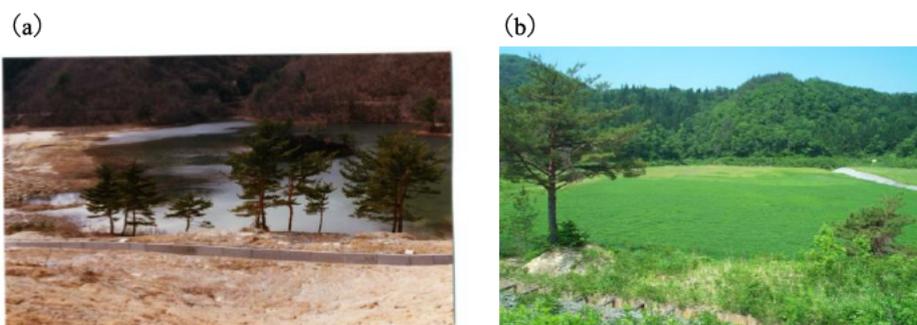


図 4 X 鉱山第一堆積場の写真
(a) 1985 年 4 月当時の様子 (b) 2008 年 6 月当時の様子
(独立行政法人 エネルギー・金属鉱物資源機構, 2024)

2.2 土壌断面調査

(1) 方法

土壌調査は日本ペドロロジー学会編（1997）に基づき、2024年10月に行った。調査地点は植生調査結果を基に、ラインAの起点付近のススキが生育している地点、ラインBの起点付近のヨシが生育している地点を選択した。

(2) 結果及び考察

土壌断面形態の記載は日本ペドロロジー学会編（1997）に従った。A層は最表層にあって生物の影響をもっとも強く受けている層位であり、腐植によって暗色～黒色に着色された無機質層位（有機物含量30%未満）である（中塚, 2014）。本調査地でA層はラインA起点付近で0-12 cm、ラインB起点付近で0-14 cmに確認され、深度はほぼ一致していた。また、どちらのA層も土色から「有機物に富む（5-10%）」と判定された。土壌有機物（腐植物質）の機能としては、1) 植物や微生物への栄養供給源になること、2) 土壌の養分保持と緩衝能に寄与すること、3) 元素とのキレート能による養分供給・毒性軽減をすること（酸性土壌でAlと結合し毒性を軽減させたり、Pとの結合が低下することでPの利用性を増加させるなど）、4) 植物の生育促進をすること、5) 団粒形成及び土壌構造の安定化に関わること、が知られている（松中, 2003）。以上のことから、植物が発達させたA層は、定着している植物の生育にとっても重要な層であると言える。調査地点では50 cmの覆土がされた場所であることから、実播工を行った後、覆土に定着した緑化植物や、黒ボク土でA層を発達させることが知られるススキ（山根, 1973）が覆土にA層を発達させたと考えられた。覆土に使用した土壌の種類もA層の発達に影響を与えると考えられるため、今後の文献調査が必要である。

一般にB層はA層とC層の間において、両者の中間的な性質を占める部分である（中塚, 2014）。また、A層から溶脱してきた様々な物質が集積する場所でもあり、B層の赤みは溶脱してきたFeやAlなどが集積する場所でもある（松中, 2003）。添字であるgは、季節的停滞水による酸化、還元の影響により三二酸化物の斑紋を生じた層であることを示す。ススキ及びヨシのBg層ではジピリジル試薬によりFe(II)が検出されたことから、両方とも排水が不良な還元環境と考えられたが、ヨシのBg層はススキのBg層と比べるとより長期的な湛水環境にあったと考えられた。Bg1層からBg4層はラインA起点付近で12-75+ cm、ラインB起点付近で14-80+ cmに確認され、深度はほぼ一致しており、50 cmの覆土処理を考慮するとBg3層までが覆土層と推測された。

植物根の量はA層と比べBg層で低下していた。土壌のち密度は植物根の成長にも影響する。三好（1972）は農作物29種類を対象に土壌ち密度（土壌硬度）が根の伸長への影響を調べているが、ち密度が18 mmを超えると根の伸長が低下し、多くの植物種では22-23 mmが上限値になることを示している。ラインA起点付近のBg1層のち密度は25 mm、ラインB起点付近のBg1層のち密度は18 mmであり、植物根がBg1層で発達するのは土壌硬度の点から困難であると考えられた。

2.3 土壌コアの三相分布の分析

(1) 方法

2024年10月初旬に、ラインA及びラインBに沿って、プロット10、20、30、40、50、60、70、80、90、100、110、117における土壌コアをライナー採土器(DIK-110C, Daiki, 鴻巣)を使って採取した。採取した土壌コアはA層、Bg1層、Bg2層に分け、層界(土壌層位の境界)から1-3cm程度離してステンレス試料円筒100mL(DIK-1801, Daiki)あるいはステンレス試料円筒50mL(DIK-1803, Daiki)に入れデジタル実容積測定装置(DIK-1150, Daiki)で三相分布を測定した。気相率、液相率、固相率の算出にあたっては、土壌の新鮮重量及び乾燥重量の値を使用した。

(2) 結果及び考察

採取した土壌コア全体に渡ってほぼ同様の三相分布の傾向が確認された。A層の固相率はBg1層及びBg2層に比べて有意に低く、気相率は有意に高かった。液相率には有意な差が確認されなかった。以上のことから、気相が発達したA層は排水がよく酸素の供給が十分な土壌環境であり、Bg1層及びBg2層は排水が悪く低酸素になりやすい環境であると示唆された。

(3) まとめ

植生調査、土壌断面調査、土壌コアの三相分布の分析の結果と考察を図5にまとめた。2006年度に実播工を実施した調査地では、緑化植物から自生植物である草本、樹木への植生遷移が確認された。現在でも、緑化植物であるヨモギとクリーピングレッドフェスクの定着が確認された。緑化植物の定着は土壌の流出を抑制し土壌の安定化に貢献したと考えられた。その後、周囲から種子の飛散により定着したススキやヨシの植被率が上昇したと考えられた。ススキの定着は気相率や有機物量が多いA層を発達させ(山根, 1973; Doyama et al., 2024)、アカマツやイタチハギなどの樹木の定着を促進したと考えられた。以上から、植生遷移は順調に進んでいると考えられた。



図5 まとめ

2.4 植物周囲の土壌分析及び植物体分析

(1) 方法

2024年10月に、ラインA及びBで植被率が高かったススキ、アカマツ及びヨシを無作為に3個体ずつ採取した。植物体を採取するのと同時に、各植物の周囲20cm×20cmにおいて土壌も採取した。各植物の土壌のA層は約10cm、Bg1層はA層直下の10cmを採取した。

A層及びBg1層の土壌は風乾し2mm篩を通過させた後、各種分析に供した。土壌のpH(H₂O)、陽イオン交換容量(CEC)、交換性Ca、Mg、K及びNa濃度、トルオーグ法による可給態P濃度、硝酸-過塩素酸分解で抽出された金属元素濃度、植物が利用しやすい形態のFe及びAl濃度(可給態Fe及び交換性Al濃度)の分析を行った。分析方法は土壌環境分析法編集委員会編(1997)及び土壌養分測定法委員会(1970)に従った。pHの測定にはpHメーター(F-22, HORIBA, 京都)を使用した。溶出液や分解液に含まれる元素の定量には誘導結合プラズマ発光分光分析装置(ICP-OES; Optima 7300 DV, PerkinElmer, Waltham, USA)を使用した。

採取したススキ及びアカマツの根はA層で横方向に広がっており、Bg1層には達していなかった。ヨシの根も同様にA層で横方向に広がっていたが、Bg1層でも生育が確認された。採取した植物体は各組織に分断し水道水及びMillipore水で洗浄した。ススキは、地上部、枯死した地上部、細根(Feプラーク有・無)、根皮(Feプラーク有・無)に分けた。ヨシは、地上部、枯死した地上部、A層の細根、Bg1層の細根に分けた。アカマツは葉、枝、細根に分けた。洗浄した各組織は80°Cで2日間乾燥し、瑪瑙乳鉢で粉砕した後、硝酸分解を行った。分解液はICP-OESに供し、元素濃度を定量した。また、アカマツについては地際部の組織を用いて年輪解析を行った結果、7.3±0.3年生(平均値±標準誤差)であった。

(2) 土壌分析の結果及び考察

植物体と同時に採取したA層及びBg1層の土壌pH(H₂O)は弱酸性であった。pH6未満の酸性土壌においてはFeやMnの溶解度が高まり、pH5以下ではAlの溶解度が高まる(Brady and Weil, 2002)ことが知られていることから、調査地において植物体可以利用できるAlやFe濃度が増加する可能性が考えられた。

植物体と同時に採取したA層及びBg1層の陽イオン交換容量(CEC)を測定した。土壌に含まれる粘土や有機物は負電荷を帯びており、栄養元素になる陽イオンを静電的に結合している。CECは土壌の潜在的な養分保持能の指標となる。ススキ、ヨシ、アカマツのA層のCECはそれぞれのBg1層と比べて高い値を示したことから、A層の養分保持能はBg1層に比べて高いことが判明した。

植物が吸収しやすい形態の栄養元素(Ca、Mg、K、Na、P)を分析したが、可給態P及び交換性Naは検出されなかった。Pは多量必須栄養元素として知られている。pH6未満の酸性土壌においてはFeやMnの溶解度が高まり、pH5以下ではAlの溶解度が高まる(Brady and Weil, 2002)ことが知られているが、溶解したFeやAlはPと結合し不溶化するため、植物が利用可能な形態のP(可給態P)が減少する(松中, 2003)。本調査地土壌はpH5.1以下の弱酸性土壌であったため可給態P濃度が低く、本分析条件での検出は困難だった可能性が考えられた。以上のことから、A層及びBg1層ともに生物利用性の高いPの不足が考えられた。

畑の作土を対象とした土壌診断の基準値として、交換性CaOは800-6,000mg/kg(土壌によって範囲が異なる)、交換性MgOは250-450mg/kg、交換性K₂Oは150-300mg/kgが示されている(松中, 2003)。交換性Ca濃度はヨシのBg1層、アカマツのA層及びBg1層の基準値より低く、交換性Mg

濃度はヨシの A 層 (298 mg/kg) 以外の全ての層で基準値より低かった。また、交換性 K 濃度はヨシ A 層及び Bg1 層でのみ基準値以上に検出され、ススキ及びアカマツの A 層及び Bg1 層では検出されなかった。畑の作土は施肥を行う環境であり、作土を対象とした基準値と本調査地の土壤データと直接比較することは難しいが、少なくとも生物利用性が高い P や K、Mg が不足した土壤環境であると考えられた。

硝酸-過塩素酸分解で抽出された Al 及び Fe 濃度は土壤での Al の平均濃度、Fe の平均濃度 (Larcher, 2004) と比較して低かった。土壤の Cu の平均濃度、Zn の平均濃度、Mn の平均濃度、Pb の平均濃度 (Larcher, 2004; 土壤環境分析法編集委員会編, 1997) と比較すると、A 層及び Bg1 層で、Cu、Pb 及び Zn 濃度が高かった。

ススキの Bg1 層において、A 層に比べて可給態 Fe 及び交換性 Al 濃度が高い傾向が確認された。ヨシの Bg1 層において、A 層に比べて可給態 Fe 及び交換性 Al 濃度が有意に高かった。アカマツの Bg1 層において、A 層に比べて交換性 Al 濃度は有意に高く、可給態 Fe 濃度は有意に低かった。

(3) 植物体分析の結果及び考察

鉱山跡地の土壤環境に多い元素である重金属元素である Fe、Mn、Cu、Zn、Ni などは、植物にとって微量必須栄養元素であり生育に必要な元素であるが、適正な濃度範囲が狭く、吸収量によっては著しい障害を与える (テイツ・ザイガー, 2014)。また Al は酸性環境では土壤中での移動性が高くなり植物に過剰に吸収されやすいため、特に根が Al 毒性を生じやすいことが知られており (森ら, 2001)、鉱山跡地の土壤環境では植物に対する影響を考慮するべき元素と考えられる。一般的な植物における Al の濃度範囲、Cu の濃度範囲、Fe の濃度範囲、Mn の濃度範囲、Zn の濃度範囲 (Larcher, 2004) の最大値と比較して、ススキは高濃度の Fe 及び Al を死細胞である根皮に蓄積していた。ススキは高濃度で毒性を生じる Fe 及び Al を死細胞に蓄積することで過剰の Fe 及び Al を体外へ排出し、毒性を軽減していると考えられた。ススキは国内の多くの鉱山跡地で自生が確認される植物種であるが (広井, 1974; 1980)、本現象は国内の集積場に自生するススキにおいても確認されている (Haruma et al., 2023)。他の既往報告において、鉱山跡地に自生するススキは高濃度の Al を細根に蓄積しているが、1) 抗酸化物質である chlorogenic acid を産生し、2) Al を根の細胞壁に局在することによって、Al 毒性を軽減していることが示されている (Haruma et al., 2018)。本調査地におけるススキの定着にはススキ自身が有する耐性機構が影響していると考えられた。一方で、ススキの根は Bg1 層での生育が抑制されていることが確認された。Bg1 層は滞水しやすい還元環境であり、生物利用性が高い Al や Fe が多く存在する層である。また、A 層と比べると気相率も低いことから酸素が不足しやすい環境と考えられる。以上の要因が影響し、Bg1 層におけるススキ根の成長が抑制されたと考えられた。

ススキの栄養元素濃度を調べたところ、一般的な植物における Ca の濃度範囲、K の濃度範囲、Mg の濃度範囲、Na の濃度範囲、P の濃度範囲、S の濃度範囲 (Larcher, 2004) と比較して、Ca、K、Na、P 及び S 濃度はほぼ範囲内であった。Mg 濃度は細根及び根皮において通常の濃度範囲よりも低かった。Mg は植物にとって多量必須栄養元素であり、リン酸転移反応に関わる酵素やクロロフィルの構成成分として知られ、Mg 欠乏は葉色の変化 (黄色や白色) や成熟前の落葉を引き起こす (テイツ・ザイガー, 2014)。調査地で生育するススキは細根において Mg 不足であるが、地上部への Mg の移行はなされており、地上部については不足状態ではないと考えられた。細根における Mg 不足には、ススキの A 層の交換態 Mg 濃度が影響している可能性が示唆された。また、他の栄養元素に関しては

欠乏状態ではないと考えられた。

ヨシの金属元素濃度を調べたところ、一般的な植物における含有元素濃度の最大値と比較して、ヨシは高濃度の Al 及び Fe を根に蓄積していた。地上部、地上部・枯死部、A 層及び B 層の細根に含まれる Cu 濃度は一般的な植物における濃度の最大値よりは高かったが、鉱山跡地に自生する他の植物における Cu 濃度（国立大学法人筑波大学生命環境系 他, 2022）と比較すると高濃度とは言えなかった。ヨシも国内の多くの鉱山跡地で自生が確認される植物種であり（広井, 1974; 1980）、多くの論文で重金属や放射性核種を蓄積すること（Pevery et al., 1995; Shitaka et al., 2002; Wang and Dudel, 2017）や、重金属耐性機構の報告がある（Ederli et al., 2004; Jiang and Wang, 2007; Jiang and Wang, 2008）。また、国内の鉱山跡地に生育するヨシは根にフェリハイドライドである Fe プラークを形成し、重金属の体内への吸収を抑制する機構を有することが報告されている（Nakamoto et al., 2021）が、本調査地のヨシの根の表面には Fe プラークは確認されなかった。

ヨシはススキやアカマツと異なり、Bg1 層にも根を発達させていた。先に述べた通り、Bg1 層は酸素が不足しやすい環境であると考えられるが、ヨシは通気組織を発達させ、根端へ酸素を供給できる ROL バリア（塩野, 2016）を有しているため、ヨシは Bg1 層で根を発達できたと考えられた。

ヨシの栄養元素濃度を調べたところ、一般的な植物における Ca の濃度範囲、K の濃度範囲、Mg の濃度範囲、Na の濃度範囲、P の濃度範囲、S の濃度範囲（Larcher, 2004）と比較して、Ca、K、Mg、Na、P 及び S はその範囲内であった。以上から、調査地で生育するヨシは地上部及び Bg1 層の細根において栄養元素に関しては欠乏状態ではないと考えられた。

アカマツの金属元素濃度を調べたところ、一般的な植物における含有元素濃度の最大値と比較して、アカマツは高濃度の Al 及び Fe を細根に、Mn を葉及び枝に蓄積していた。アカマツも国内の多くの鉱山跡地で自生が確認される植物種である（広井, 1974; 1980）。国内の集積場に自生するアカマツは高濃度の Fe を細根に蓄積しているが、抗酸化物質である catechin を産生し耐性を有していることが報告されている（Haruma et al., 2023）。さらに、集積場で定着したアカマツは、先に定着したススキのパッチ内で良好に成長することが確認されている（Haruma et al., 2023）。本調査地においても、ススキが A 層を発達させ、その後にアカマツが定着できた可能性が考えられた。

また、アカマツの根は Bg1 層での生育が抑制されていることが確認された。先に述べた通り、Bg1 層は滞水しやすい還元環境であり、生物利用性が高い Al や Fe が多く存在する層である。また、A 層と比べると気相率も低いことから酸素が不足しやすい環境であると考えられる。以上の要因が影響し、Bg1 層におけるアカマツの根の成長が抑制されたと考えられた。調査地で確認されたアカマツの根の状況は、鉱山跡地の露天掘り跡地の覆土層に定着したアカマツ、イヌツゲ、タニウツギの根の状況と類似しており（Doyama et al., 2024）、覆土層の直下に形成された還元及び酸素が不足しやすい環境は樹木の定着を抑制する要因になると考えられた。一方で、ススキによる A 層の発達が進めば、樹木の遷移が良好に進行すると考えられた。

アカマツの栄養元素濃度を調べたところ、一般的な植物における Ca の濃度範囲（400-13,000 mg/kg）、K の濃度範囲（1,000-68,000 mg/kg）、Mg の濃度範囲（700-9,000 mg/kg）、Na の濃度範囲（20-1,500 mg/kg）、P の濃度範囲（100-10,000 mg/kg）、S の濃度範囲（600-8,700 mg/kg）（Larcher, 2004）と比較して、全ての栄養元素濃度はほぼその範囲内であった。以上から、調査地で生育するアカマツは栄養欠乏状態ではないと考えられた。

(4) まとめ

本調査地において、ススキは細根に高濃度の Al 及び Fe を、ヨシは細根に高濃度の Al を、アカマツは細根に高濃度の Al 及び Fe を蓄積していた。ススキ、ヨシ及びアカマツは鉱山跡地に自生し、根に金属元素を蓄積しても問題なく生育できる耐性機構を有していることが既往報告で明らかになっているため、調査地にも定着ができたと考えられた。また、ススキ及びアカマツは A 層のみに細根を発達させていたが、ヨシは A 層及び Bg1 層に根を発達させていた。本調査地の Bg1 層は滞水しやすい還元環境であり、生物利用性が高い Al や Fe が多く存在する。また、A 層と比べると気相率も低いことから酸素不足の環境であると考えられる。ヨシは通気組織や根端へ酸素を輸送できる ROL バリア (塩野, 2016) を有しているため、Bg1 層で根を発達できたと考えられた。

3 現地植物の蒸散量及び含水量の解析

3.1 方法

本実験では自生植物として植被率の高かったススキ、緑化植物として植被率の高かったヨモギを対象植物とした。現地で2024年7月に採取したススキ及びヨモギ各5個体を、学内の日陰のベランダで1ヶ月近くポット栽培した。2024年8月13日(晴れ)に、国立大学法人筑波大学理科系棟A棟の屋上にススキ及びヨモギの栽培ポットを設置し、秤量法による蒸散量の測定を行った。土壌からの蒸発散を防ぐために、栽培ポットはビニール袋で覆った。最初の重量測定は10:30に行い、その後1時間おきに17:30までポットの重量を測定し、減少量を蒸散量とした。現地では自然通風フィルター内に温湿度データロガー(TR72A, ティアンドデイ, 長野)を設置し、温度及び湿度の測定を行った。測定前には、各ポットのススキ及びヨモギの植被率(地面から1m高、1m²)を測定した。

蒸散量を測定した植物体は、十分に給水をし学内の日陰のベランダで約1週間栽培をした後、採取した。植物体は水道水及びMillipore水で洗浄し、各組織に分別し新鮮重量を測定した。その後、各組織は80°Cで2日間乾燥し、乾燥重量を測定した。得られた新鮮重量及び乾燥重量をもとに、各植物体の葉、根及び個体の含水量を算出した。

3.2 結果及び考察

ススキ及びヨモギの日中の蒸散量の変化には多少変動が確認されたが、16:30以降には全個体で減少した。そこで、12:30-15:30に測定した蒸散量を1日当たりの蒸散量とし、各個体の植被率のデータを元に植被率1%あたりの1日の蒸散量を算出し、平均した。その結果、ススキ1%の植被率の蒸散量/日(平均値±標準誤差)は、10.2±2.2 mL、ヨモギ1%の植被率の蒸散量/日(平均値±標準誤差)は7.8±0.9 mLと算出された。

また、ススキ及びヨモギの含水量を調べたところ、個体当たりの含水量を両植物で比較すると、ススキの含水量はヨモギの約10倍であった。各個体の植被率のデータを元に、各個体の植被率1%の含水量を算出し平均した。その結果、ススキ1%の植被率の含水量/個体(平均値±標準誤差)は、13.9±2.7 mL、ヨモギ1%の植被率の蒸散量/個体(平均値±標準誤差)は1.9±0.2 mLと算出された。

以上の結果を基に、調査地において植物が影響する水量に関して考察をする。1m²におけるススキあるいはヨモギの植被率を100%と仮定し、夏場の30日間の蒸散量を算出すると、ススキの蒸散量は30.6 L/m²、ヨモギの蒸散量は23.4 L/m²となる。1m²におけるススキあるいはヨモギの植被率を100%と仮定し、かつ植物体の含水量は30日間一定と仮定すると、ススキの含水量は1.39 L/m²、ヨモギの含水量は0.19 L/m²となる。これらの結果を1haあたりに換算すると、ススキ植被率が100%の場合、蒸散量(夏場30日間)は306t、ススキの含水量は13.9tとなる。ヨモギ植被率が100%の場合、蒸散量(夏場30日間)は234t、ヨモギの含水量は1.9tになる。ここに、ラインA及びBの土壌体積含水率から算出した「植物が発達させたA層(深度13cm)の1ha当たりの保水量533t」をそれぞれに加えると、ススキ植被率が100%の場合(夏場30日間)は852.9t/ha、ヨモギ植被率が100%の場合(夏場30日間)は768.9t/haが、植物が関与する水量の総計と結論した。

蒸散とは、植物の根から吸収された水が茎や幹、枝の道管を上昇して葉に輸送され、気化して大気へ拡散する水の移動をさす(町村, 2021)。山腹植栽が水収支に及ぼす影響を解明した研究(福嶋, 1987)によると、山腹植栽が行われると洪水流出が小さくなり、植物の定着とともに蒸発散量が増加するとしている。一方で、植栽から20年後以降に森林が安定化すると蒸発散量には大きな変化がなく、年間雨量に占める蒸散量の割合は50%弱と算出されている。オーストラリア政府が発行した

鉱山でのリハビリテーション（緑化を含む）のガイドラインでは、鉱山跡地における植生の機能として「植物の蒸発散による坑廃水量減少への寄与」を示している（Australian Government, Department of Industry Tourism and Resources, 2006）。鉱山跡地においても、植栽による蒸散が坑廃水量減少への寄与が示唆され、緑化の利点として、坑廃水量減少への低減を含めて良いと考える。

Australian Government, Department of Industry Tourism and Resources（2006）はリハビリテーション（緑化）の際に必要な事前検討事項として、1) 鉱物学的分析（保管物の特性）、2) 物理的分析（植物成長に影響する水分や酸素に影響する要因：粒度分布、密度・空隙率、強度と圧縮性、保水能力、透水係数）、3) 侵食性、4) 化学分析（植物成長に関わる pH、塩分、栄養素）、5) 植物の栄養条件（植物種にあった施肥条件の把握）、6) 生物学的分析（微生物量・活性、菌根菌、土壌有機物の量、覆土層での種子の保存状態）を示している。これらの項目の中で、本研究では 2) の一部、4)、5) 及び 6) の一部に関して明らかにしたが、これらの項目は緑化の達成度や今後の植生遷移を評価する上で重要な項目であると判断された。

海外では、鉱山跡地利用の目的や保管物の特性に応じて、緑化の到達目標（遷移段階：草本あるいは樹木の定着）を設定し、覆土方法や覆土厚を変えている（International Network for Acid Prevention, 2017）。国内の鉱山跡地での緑化においても、草本の定着までとするか、樹木の定着までとするかについて検討し、覆土層の設置を検討する必要があるだろう。本調査地の場合、覆土厚は 50 cm と樹木根の発達には十分な厚さであり、今後の森林回復を目的とするのであれば良い条件であると考えられるが、Bg1 層で根をどのように発達させていくのかが今後の課題となる。

本研究の成果を図 6 にまとめた。2006 年度に実播工を実施した調査地では、緑化植物から自生植物である草本、樹木への植生遷移が確認された。緑化植物やススキの定着は土壌の安定化、気相率や有機物量が多い A 層を発達させ、樹木の定着を促進したと考えられた。X 鉱山の植生発達の状況は良好であり、今後の樹木定着が見込まれた。また、植物の定着とともに増加した植物の蒸散量・保水量が坑廃水量の低減に寄与していると考えられた。海外では、フィリピン政府が鉱山の緑化を法律で義務化、アメリカ・チリ・カナダ・オーストラリアなどでは鉱山開設時の許認可取得時に環境保全を念頭においた緑化は必須、など、温室効果ガスの削減や生物多様性を意識した緑化に対する対応が進んでいる。本研究調査地の X 鉱山での緑化事例は、緑化植物や自生植物の利点を活かした鉱山跡地の緑化の成功例として、日本における緑化のモデル事例となることを期待する。



図 6 本研究のまとめ

4 引用文献

- Australian Government, Department of Industry Tourism and Resources (2006) Mine rehabilitation. https://nt.gov.au/__data/assets/pdf_file/0016/203416/mine-rehabilitation.pdf (閲覧日 : 2025/2/23)
- Brady and Weil (2002) The nature and properties of soils. 13th edition. Prentice Hall.
- Doyama et al. (2024) Journal of Environmental Management 362: 121292.
- Ederli et al. (2004) Physiologia Plantarum 121: 66–74.
- Haruma et al. (2018) Plant Species Biology 33: 109–122.
- Haruma et al. (2023) PLoS ONE 18(5): e0286203.
- International Network for Acid Prevention (2017) Global cover system design, technical guidance document. <https://www.inap.com.au/wp-content/uploads/global-cover-system-design.pdf> (閲覧日 : 2025/2/23)
- Jiang and Wang (2007) Aquatic Botany 86: 353–360.
- Jiang and Wang (2008) Journal of Plant Physiology 165: 697–704.
- Larcher (2004) 植物生態生理学, シュプリンガー・フェアラーク東京.
- Nakamoto et al. (2021) Minerals 11, 1337. <https://doi.org/10.3390/min11121337>
- Peverly et al. (1995) Ecological Engineering 5: 21–35.
- Shitaka et al. (2002) Journal of Nuclear Science and Technology 39: 958–961.
- Wang and Dudel (2017) Environmental Science and Pollution Research 24: 12185–12194.
- カネコ種株式会社 HP <https://www.kanekoseeds.jp> (閲覧日 : 2025/2/23)
- 金属鉱業事業団 (1983) 捨石・鉱さいたい積場の手引.
- 国立大学法人筑波大学 生命環境系, 国立研究開発法人産業技術総合研究所, 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門, 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 経済産業省 産業保安グループ. 2022. 休廃止鉱山の新たな緑化対策等に関するガイドンス.
- JA 全農 肥料農薬部編 (2014) よくわかる土と肥料のハンドブック 土壌改良編. 農林漁村文化協会, 東京. pp. 54-56.
- テイツ・ザイガー (2014) 植物生理学 第3版. 培風館.
- 独立行政法人 エネルギー・金属鉱物資源機構 (2024) 資料 4-2 鉱害防止技術の最適化、管理の高度化等に関する方向性の検討. ②新たな緑化対策等に関するガイドンスの改訂の検討.
- 土壌環境分析法編集委員会 (1997) 土壌環境分析法. 博友社, 東京.
- 土壌養分測定法委員会 (1970) 土壌養分分析法. 養賢堂, 東京.
- 中塚 (2014) 土壌生成分類学. 養賢堂, 東京.
- 日本ペドロロジー学会編 (1997) 土壌調査ハンドブック. 博友社, 東京.
- 能登屋・佐々木 (1988) 農業土木学会誌 56: 567-572.
- 広井 (1974) 東京経済大学人文自然科学論文集 38: 177-226.
- 広井 (1980) 東京経済大学人文自然科学論文集 55: 63-98.
- 福嶋 (1987) 水利科学 31: 17-34.
- 町村 (2021) 植物の光合成および蒸散と気象環境. 2. 蒸散作用と水. 鮫島良次 (編) 農業気象学入門. 文英堂出版, 東京. pp.111-121.
- 松中 (2003) 土壌学の基礎: 生成・機能・肥沃度・環境 農山漁村文化協会.
- 三好 (1972) 土壌肥料学会誌 43: 92–97.
- 山根 (1973) ペドロジスト 17: 84-94.

本ガイダンス策定に関する問い合わせ先
経済産業省 産業保安・安全グループ 鉱山・火薬類監理官付
〒100-8912 東京都千代田区霞が関1丁目3番1号
TEL：03-3501-1870

事例や技術開発等に関する問い合わせ先
独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構 金属環境事業部 調査技術課
TEL：03-6758-8032 メール：chosa-tech@jogmec.go.jp