休廃止鉱山の新たな緑化対策等に関するガイダンス

令和4年3月

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

まえがき

休廃止鉱山の緑化対策については、金属鉱業事業団 (1983) が作成した「捨石・鉱さいたい積場の手引」があり、これはたい積物の流出や飛散防止、景観の回復等を目的としたものである。一報、昨今の環境問題への社会的な関心の高まりを受け、緑化によるカーボンニュートラルへの貢献が着目されており、休廃止鉱山においても将来的には跡地を緑化することでカーボンニュートラルへ貢献できる可能性が考えられる。ただし、休廃止鉱山の跡地は一般的には緑化が難しい環境である場合もあり、そういった環境に対しての新たな緑化対策の技術が求められるという背景がある。

そこで、休廃止鉱山におけるグリーン・レメディエーション(元山回帰)の調査研究事業において設置されたグリーンレメディエーション(GR)委員会では、休廃止鉱山における新たな緑化対策技術について検討を進めてきた。本ガイダンスはこれらの検討の結果について取りまとめ、休廃止鉱山管理の関係者向けに整理したものである。

本ガイダンス作成の目的は、「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る。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。

日本では、上述の手引以来、休廃止鉱山の緑化に関する類似のガイダンスは存在していない。 そのため、休廃止鉱山における緑化対策を促進する上で本ガイダンスが有効に活用されることを 期待したい。また、本ガイダンスの刊行にあたって御指導を賜った関係各位に対して感謝申し上 げる。

令和4年3月

休廃止鉱山におけるグリーン・レメディエーション (元山回帰) 調査研究委員会 および事務局

目次

| IJ | にじ | めに. | | 4 |
|----|----|----------|--------------------------------------------------------|----------|
| 1. | | 鉱山跔 | が地における植生遷移を生かした緑化 | 5 |
| | 1. | 1. | 鉱山跡地における植生遷移 | 5 |
| | 1. | 2. | 鉱山植生の特性 | 7 |
| | 1. | 3. | 植物にとっての元素:その役割と毒性 | 10 |
| | | 1. 3. 1. | . はじめに | 10 |
| | | 1. 3. 2. | 植物の無機栄養元素・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 10 |
| | | 1. 3. 3. | . 植物における毒性 | 12 |
| | 1. | 4. | 金属元素に対する耐性 | 13 |
| | 1. | 5. | 好金属植物の利用 | 15 |
| | | 1. 5. 1. | ファイトレメディエーション | 15 |
| | | 1. 5. 2. | ファイトマイニング | 15 |
| 2. | | 重金属 | 属環境に自生する金属元素を蓄積する植物 | |
| | 2. | 1. | はじめに | 16 |
| | 2. | 2. | 国内の事例 | 16 |
| | 2. | 3. | 海外の事例 | 16 |
| 3. | | 自生植 | 堕物利用による緑化方法 | |
| | 3. | 1. | はじめに | 44 |
| | 3. | 2. | 自生植物を利用可能な緑化場所 | |
| | 3. | 3. | 遷移を意識した自生植物の選択・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 45 |
| | | 3. 3. 1. | 施工地の環境の重要性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 45 |
| | | 3. 3. 2. | | |
| | 3. | 4. | 自生植物の増殖及び定着方法 | |
| | | 3. 4. 1. | | |
| | | 3. 4. 2. | | |
| | | 3. 4. 3. | | |
| | | 3. 4. 4. | | |
| | | 3. 4. 5. | | 51 |
| | | 3. 4. 6. | <u></u> | |
| 4. | | 緑化に | こよるカーボンニュートラル等の事例について | |
| | | 1. | 海外における鉱山跡地の緑化の事例概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | |
| | | 2. | 緑化による二酸化炭素固定能の事例について | |
| | 4 | 3. | 海外における鉱山跡地緑化とカーボンニュートラルに関する研究具体例の紹介 | |
| | | 4. 3. 1. | | |
| | | 4. 3. 2. | | |
| | 4. | | | |
| | | 5. | 鉱山の集積場の法面の樹木管理について | |
| | | 6. | 海外におけるファイトマイニング(phytomining)の事例紹介 | |
| 5 | | ᆲᄪᅕ | | 72 78 |

図目次

| 义 | 1–1 | 1 次遷移の例(乾性遷移) | . 6 |
|---|------|--------------------------------------------------|-----|
| 図 | 1-2 | 1 次遷移の例(湿性遷移) | . 6 |
| 図 | 1-3 | 植物の無機元素濃度に対する成長量の関係 | 12 |
| 义 | 1-4 | 植物細胞における金属元素に対する耐性機構 | 14 |
| 义 | 3–1 | ポット埋設工 | 47 |
| 义 | 3-2 | 客土式筋工 | 47 |
| 义 | 3-3 | 集積場に自生するアカマツ実生 | 52 |
| 図 | 3-4 | アカマツ実生の生残率 | 53 |
| 図 | 3-5 | 内生菌の感染率 | 53 |
| 図 | 3-6 | アカマツ実生の根に含まれる元素濃度(2019 年 7 月) | 53 |
| 义 | 3–7 | ススキの含有する元素濃度 (2020 年 7 月) | 54 |
| 义 | 4–1 | 鉱山跡地の利用形態ごとの二酸化炭素固定率の整理 | 66 |
| 义 | 4–2 | 各国の鉱山跡地の緑化事例における二酸化炭素固定率の整理 | |
| 义 | 4–3 | 様々な研究事例における炭素収支の整理 | 67 |
| 図 | 4–4 | 本研究事例の研究対象地域・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 68 |
| 図 | 4–5 | 研究対象地域の緑化の様子(植林から a:2 年後、b:5 年後、c:13 年後) | |
| 図 | 4–6 | 研究対象地域の炭素固定能力の予測 | |
| 义 | 4–7 | ジャトロファの育床(左)と栽培風景(右) | |
| 义 | 4–8 | バイオディーゼル消費と二酸化炭素吸収の関係 | |
| 义 | 4–9 | 樹種ごとの二酸化炭素固定量の試算ページ | |
| 义 | 4–10 | 集積場の法面管理について | |
| 义 | 4–11 | ファイトマイニングの概要 | |
| 义 | 4–12 | ファイトマイニング関連文献の発表数推移 | |
| 义 | 4–13 | ファイトマイニングの処理対象となる金属種 | |
| 义 | 4–14 | ファイトマイニングの研究が実施されている土地の利用状況 | 76 |
| 図 | 4-15 | 研究文献発行国 | 76 |

表目次

| 表 1-1 | 鉱山環境で確認された植物種(その 1) | 7 |
|-------|--------------------------------------|------|
| 表 1-2 | 鉱山環境で確認された植物種(その 2) | 8 |
| 表 1-3 | 鉱山環境で確認された植物種(その3) | 9 |
| 表 1-4 | 必須栄養元素の植物における機能 | . 10 |
| 表 1-5 | 微量必須栄養元素の植物における機能 | . 11 |
| 表 1-6 | 有用栄養元素の植物における機能 | . 11 |
| 表 1-7 | 土壌における元素の平均値及び植物体での濃度範囲 | . 12 |
| 表 1-8 | 栽培品種における Al、Fe、Mn、Cu、Zn、Ni 過剰吸収による毒性 | . 13 |
| 表 2-1 | 研究論文報告での分析方法 | . 16 |
| 表 2-2 | コケ植物・シダ植物(国内の研究報告より作成) | . 17 |
| 表 2-3 | 草本類(国内の研究報告より作成) | . 21 |
| 表 2-4 | 樹木 (国内の研究報告より作成) | |
| 表 2-5 | シダ植物(海外の研究報告より作成) | . 30 |
| 表 2-6 | 草本類 (海外の研究報告より作成) | . 32 |
| 表 2-7 | 樹木 (海外の研究報告より作成) | . 42 |
| 表 4-1 | 鉱山跡地を主とした緑化によるカーボンニュートラル等の研究事例 | . 56 |
| 表 4-2 | バイオディーゼル原料としてのジャトロファと他種との比較 | . 70 |

はじめに

金属鉱業事業団(1983)が作成した「捨石・鉱さいたい積場の手引」は、たい積物の流出や飛散防止、 景観の回復等を目的とした、たい積場の緑化技術に対して、金属鉱業事業団が現地で実施してきた植栽 試験結果を踏まえて有識者の見解とともにまとめたものである。当時各鉱山が暗中模索・試行錯誤して いた緑化手順及び工法について、緑化工施工の定形化は困難としながらも、気候、地形、たい積物の性 状、周辺植物の種類を考慮し各項目について詳細に示しており、後世に引き継がれるべき有用な手引書 である。「捨石・鉱さいたい積場の手引」のあとがきでは下記のように述べられている。「本書は、た い積場の緑化に関する事項をまとめたものであり、使用済みのたい積場が自然植生と一体化し、地山化 することを最終目標としている。(中略)本手引書では、施工の経済性と生態遷移を念頭において、た い積場の緑化について記述したが、①自然の生態遷移、②浸透水減少対策としての適正な覆土の厚さに ついてはふれていない。」本あとがきにおいて、①については「たい積場の緑化と生態遷移(仮称)」 を取りまとめる旨の記載があるが、現時点では発行が確認されていない。本ガイダンス作成の目的は、 「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、提案するものである。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る。緑化を実施している現場の方々に少しでも有用な情報が 提供できれば幸いに思う。

1. 鉱山跡地における植生遷移を生かした緑化

1.1. 鉱山跡地における植生遷移

山崩れや埋立地で新しくできた裸地に草本が見え始め、そのうちヤブが形成され、樹木が定着する。このようにある一定の土地に生えている植物群落が時間の経過とともに交代して変化することを「遷移」という(沼田,1974; 中静,2012)。裸地から1年生草本、多年生草本、陽樹の低木林、陰樹の常緑広葉樹林への変化をさす。遷移には大きく分けて2つあり、「今まで全く植物が存在しなかった裸地から出発する遷移(1次遷移)」と「今まであった植物群落が火事や病虫害、洪水、人間活動などによって除去されたところから出発する遷移(2次遷移)」がある。自然環境で1次遷移の例として挙げられるのは、火山噴火後の溶岩上(植物や土壌のない状態)(上條ら,2015)である。

鉱山跡地における植生遷移を考慮する場合、「たい積場、集積場やひどく侵蝕された場所」のように 土壌の未発達な場所では 1 次遷移、「森林伐採跡のような既存植物の種子や地下茎、根などが残存し、 土壌条件も良好な場所」では 2 次遷移と分けて考慮する必要がある。1 次遷移と 2 次遷移では遷移の進行 にも大きな差があり、Tagawa (1964) の桜島の溶岩上での研究によると、1 次遷移の終了には 1000 年を要 したが、2 次遷移の終了は 200 年だったという。鉱山跡地での植生遷移を検討する場合は、まずはその 土地の履歴を考慮しなければならない。

1次遷移には、乾燥状態からはじまる「乾性遷移」(図 1-1)がある。乾性遷移は裸地に蘚苔類(コケ植物)や地衣類の定着が確認され、開拓者となる先駆種である 1 年生草本が侵入・定着、多年生草本の定着が進む。その後、陽樹低木林、陽樹高木林が定着し、最終的には極相である陰樹林が形成されることとなる。遷移初期には、先行して侵入する植物の定着により、土壌における有機物の増加、栄養塩類の蓄積、水分保持力の増加などが生じることで次世代の植物の定着を促進させる環境条件となりうる。一方で、陽樹林の形成により下方への光量の減少、湿度上昇が生じ、次世代の植物の生育に悪影響を与えることとなる。植物間の競争が生じた結果、葉丈や樹高の高く寿命が長い植物種が優占することになり、既存植物を駆逐した結果、最終的には遷移後期種である陰樹林が形成されることとなる。

また、鉱山跡地における「たい積場、集積場やひどく侵蝕された場所」のような 1 次遷移を想定する場所での蘚苔類(コケ植物)について述べる。蘚苔類は火山荒原のような土壌が未発達で強い乾燥にさらされる場所でしばしば優占することが知られている。一方で、蘚苔類は全ての火山荒原で優占的に出現するわけでもなく、蘚苔類はほとんど出現しないのに多年生草本や樹木が出現した事例も多い(中坪、1997)。一方で、蘚苔類には重金属環境に適応した種類に関する報告例があり、重金属が多い環境の指標植物として知られているものもある(Larcher, 2004)。蘚苔類には乾燥条件でも良好に光合成を行う種も存在することから(中坪、1997)、乾燥状態のたい積場、集積場などに定着している蘚苔類には、乾燥や高濃度の重金属に対して耐性があると考えられ、土壌生成や水分保持に寄与する可能性もあり、検討する必要がある。

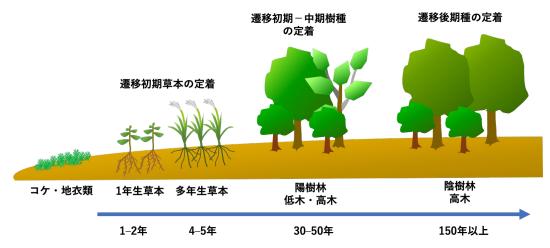


図 1-1 1次遷移の例(乾性遷移)

遷移終了まで要する年数は、石井ら(1996)の関東及び西日本の低地における植生遷移を参考に掲載 したが、気候や土壌の発達程度などによって異なる。

さらに1次遷移には、湿性状態からはじまる「湿性遷移」(図1-2)がある。初期には水生植物が定着するが、土砂や水生植物の遺体で陸地化した後に乾性遷移をたどる。鉱山跡地における湿性遷移は、鉱廃水が流入し湿地化している鉱さいたい積場を最終的にそのまま乾燥させた場合に想定される。

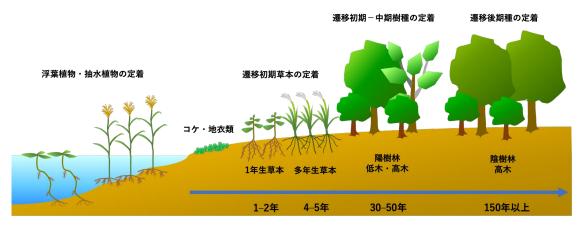


図 1-2 1次遷移の例 (湿性遷移)

1.2. 鉱山植生の特性

植生遷移の進行には土壌の栄養状態、水分保持量など植物に影響を与える環境要因が影響すると考えられるが、自然環境と比較して鉱山跡地で大きく異なる要因の一つとして、土壌中の重金属量を考慮する必要がある。実際、重金属を多く含む土壌の上に成立する植生は、その周囲にある通常の土壌に成立する植生と全く異なることが知られている。そこでは重金属に生理的にも生態的にも適応できる植物種が進化してきたと考えられ(Ernst, 2006)、そういった植物種は「好金属植物」と定義され重金属を多く含む場所の生物指標となる植物種でもある(Larcher, 2004)。鉱脈の露頭付近などの自然環境のみならず、人間活動で生じた工場近辺でも高濃度の重金属にさらされた結果、重金属に適応してきた植物種も報告されている。鉱山跡地で 2 次遷移が生じると考えられる「森林伐採跡のような既存植物の種子や地下茎、根などが残存し、土壌条件も良好な場所」では、重金属に適応してきた植物種が生育していると考えられる。

自然環境における重金属を多く含む土壌の例としては蛇紋岩土壌が代表例としてあげられる。蛇紋岩は(Mg, Fe)3Si2O5(OH)4の化学組成からなる蛇紋石を主要鉱物としている。蛇紋岩の風化により生成された蛇紋岩土壌は、Ni、Cr等の重金属や Mg の濃度が高い一方で、植物の多量必須栄養元素である Ca、P、Kの濃度が低いという特徴を有した土壌である (Proctor, 1971)。日本では、北海道の日高山脈周辺、岩手県早池峰山、群馬県至仏山、四国地方の黒瀬川帯、熊本県の田浦など、全国に分布している (Mizuno et al., 2009)。蛇紋岩土壌における植物の生理障害には複合的な要因が考えられるが、高濃度に含まれるNi が顕著に影響する (Kruckeberg, 1954)という報告があり、日本国内の蛇紋岩地帯においてもNi に対して耐性のある植物種が自生すると考えられている (水野・水野, 2007)。

国内の鉱山環境においては、広井(1974; 1980)が複数の鉱山を対象に植生調査を実施しており、貧 栄養で高濃度の重金属を含む鉱山土壌に特徴的な植生の成立を指摘している。各鉱山で高頻度に確認さ れた植物種について、

表 1-1~表 1-3 に示す。特徴的なのはヘビノネゴザ、ススキ、イタドリ、オオイタドリなどの遷移初期草本やリョウブ、アカマツ、ヤナギ類などの遷移初期樹種であった。鉱山植生の特徴的な群落としては、ヘビノネゴザ群落、ススキ群落、イタドリ群落及びオオイタドリ群落などを報告している(広井、1980)。広井(1974; 1980)の報告当時と比較すると、現在は 50 年近くが経過していることから、先に述べた 2 次遷移が考慮できる場所(例として、森林伐採跡のような既存植物の種子や地下茎、根などが残存し土壌の条件も良好な場所)においては、現在は陽樹林が形成されていると推測される。

| A鉱山 | B鉱山 | C鉱山 | D鉱山 |
|---------|---------|----------|--------|
| クマイザサ | ススキ | ヘビノネゴザ | ヘビノネゴザ |
| ススキ | ヘビノネゴザ | イタドリ | ススキ |
| ヘビノネゴザ | タニウツギ | ススキ | イタドリ |
| オオイタドリ | リョウブ | ヒメノガリヤス | アカソ |
| ミネヤナギ | オオイタドリ | ヨモギ | ニワトコ |
| タニウツギ | ヒメノガリヤス | アカソ | ニシキウツギ |
| ヨシ | ヨツバヒヨドリ | リョウブ | ヘクソカズラ |
| ヒメノガリヤス | アカマツ | トダシバ | コクサギ |
| | クマイザサ | トリアシショウマ | |

表 1-1 鉱山環境で確認された植物種(その 1)

広井(1980)を参考に作成した。出現頻度が高かった植物種を上方に、出現頻度が低い植物種を下方に示した。

A鉱山及びB鉱山は東北地方、C鉱山及びD鉱山は関東地方に位置する。A鉱山、B鉱山、C鉱山は荒廃地を含む調査との記載がある。

表 1-2 鉱山環境で確認された植物種 (その 2)

| E鉱山 | F鉱山 | G鉱山及び 製錬所周辺 | H鉱山 |
|----------|----------|----------------|---------|
| ヘビノネゴザ | ヘビノネゴザ | ヘビノネゴザ | ススキ |
| ススキ | スゲ属植物 | ハクサンハタザオ | ヤマハゼ |
| ハクサンハタザオ | ヘクソカズラ | ススキ | ウツギ |
| タニウツギ | ススキ | カンスゲ | フジ |
| ヨツバヒヨドリ | ヨモギ | シシガシラ | ヘクソカズラ |
| バッコヤナギ | ハクサンハタザオ | ヘクソカズラ | トダシバ |
| シラカンバ | ヒメノガリヤス | フジ | ゼンマイ |
| アカモノ | アオツヅラフジ | ツクバネウツギ | ツタ |
| アキノキリンソウ | ヤマノイモ | ヒガゲツツジ | ホラシノブ |
| ネマガリダケ | イタドリ | ヒメカンスゲ | コシダ |
| トリアシショウマ | アキノキリンソウ | イタドリ | イタドリ |
| アスヒカズラ | ウツギ | ノブドウ | ヨモギ |
| | | ヤマツツジ | スイカズラ |
| | | | テリハノイバラ |
| | | | ウラジロ |
| | | | シシガシラ |
| | | | サワラ |
| | | | サルトリイバラ |
| | | | ノリウツギ |
| | | | アカマツ |
| | | | リョウブ |
| | | | チガヤ |

広井 (1980) を参考に作成した。出現頻度が高かった植物種を上方に、出現頻度が低い植物種を下方に示した。 E鉱山は中部地方、F鉱山、G鉱山及びH鉱山は関西地方に位置する。F鉱山調査地には著しい荒廃地はなかった との記載がある。

表 1-3 鉱山環境で確認された植物種 (その3)

| I鉱山 | J製錬所周辺 |
|-----------|--------------|
| ノリウツギ | ヘビノネゴザ |
| ヤマツツジ | ススキ |
| ススキ | ヨシ |
| ヤマヤナギ | イタドリ |
| クロマツ | アオツヅラフジ |
| ヒメノガリヤス | オニドコロ |
| ヘビノネゴザ | クサボタン |
| イタドリ | ハクサンハタザ オ |
| アカモノ | ヨモギ |
| リョウブ | ツルウメモドキ |
| ツガザクラ | フジ |
| トサノミツバツツジ | クマイザサ |
| ウツギ | スギナ |
| ウスノキ | |
| アキノキリンソウ | |
| ヤマホウコ | |
| ホソバノヤマホウコ | |
| スゲ属植物 | |

広井(1980)を参考に作成した。出現頻度が高かった植物種を上方に、出現頻度が低い植物種を下方に示した。 I鉱山は四国地方、J製錬所は東北地方に位置する。I鉱山は荒廃地を含む調査との記載がある。

1.3. 植物にとっての元素:その役割と毒性

1.3.1. はじめに

1.1 では鉱山跡地の土壌環境に多く含まれる重金属元素が植生に影響を与える可能性について述べた。 しかし、重金属元素には植物の生育に必須な栄養元素としての役割もあることから、重金属元素の存在 が植物に毒性を示すわけではなく、植物に吸収された後に毒性を発現する濃度を考慮する必要がある。 本項では、重金属元素は植物にとって有用であるが、その濃度によっては毒性を示し成長を阻害する可 能性があることについてまとめる。

1.3.2. 植物の無機栄養元素

植物の生育には必要とされる特定の元素があり、それを「必須元素」という。必須元素の定義は、① 対象の元素がないと植物が生活環をまっとうできないこと(Arnon and Stout, 1939)、②植物における生理的役割が明確な元素(Epstein 1999)、とされる。必須栄養元素は植物体内の存在量や要求量の面から、「比較的多量に必要な元素」と「必要量は微量で、多いと害を与えるもの」に分けることができ、前者を「多量必須栄養元素」、後者を「微量必須栄養元素」という。多量必須栄養元素としては N、P、K、S、Ca、Mg、微量必須栄養元素としては Fe、Mn、Cu、Zn、Ni、Mo、B、Cl がある(森ら, 2001; 米山ら, 2010)。さらに、「必須栄養元素ではないが植物の生育を促進するか、ある特定の植物種や特定の条件で必要とされる元素」として「有用元素」が定義されており(Marschner, 1995; 森ら, 2001; 米山ら, 2010)、代表的なものとして Na、Si、Al がある。各元素の植物における機能(必須あるいは有用とされる根拠)については表 1-4~表 1-6 にまとめた。

表 1-4 必須栄養元素の植物における機能

| 元素 | 植物体での機能 | | | |
|----|--------------------------------|--|--|--|
| N | 炭素化合物の構成成分 (アミノ酸、タンパク質など) | | | |
| P | エネルギーの保存や構造維持に重要(核酸、ATP など) | | | |
| K | 酵素の補助因子、電気的なバランス維持に重要 | | | |
| S | 炭素化合物の構成成分(グルタチオン、ビオチンなど) | | | |
| Ca | 細胞壁中葉の成分 酵素の補助因子 代謝調節のシグナル伝達因子 | | | |
| Mg | リン酸転移反応に関わる酵素に必要 クロロフィルの構成成分 | | | |
| | ニノル ボノゼ (2014)そ 名本) | | | |

テイツ・ザイガー(2014)を参考に作成した。

表 1-5 微量必須栄養元素の植物における機能

| 元素 | 植物体での機能 | | | |
|----|------------------------------|--|--|--|
| Fe | 光合成、N固定、呼吸のシトクロムや非へム鉄成分 | | | |
| Mn | 基礎的代謝に関わる酵素活性に関与 | | | |
| Cu | 基礎的代謝に関わる酵素の構成成分 | | | |
| Zn | 基礎的代謝に関わる酵素の構成成分 | | | |
| Ni | ウレアーゼの成分 | | | |
| Mo | N固定、N代謝、P代謝に関わる酵素の成分 | | | |
| В | エネルギーの保存や構造維持に重要(細胞壁構成成分に結合) | | | |
| Cl | 21 光合成反応のうち酸素発生に関わるものに必要 | | | |
| | テイツ・ザイガー(2014)を参 | | | |

・サイガー(2014)を参考に作成した。

表 1-6 有用栄養元素の植物における機能

| 元素 植物体での機能 | | |
|------------|------------------------------|--|
| NT- | C4 植物や CAM 植物において PEP 再生に関与 | |
| Na | K 欠乏下での代替効果(イネ、オオムギ、ワタ、キャベツ) | |
| a. | 細胞壁の物理的性質に関与 | |
| Si | 光合成量の増加・病虫害耐性の付与 (イネ) | |
| Al | 過剰のリン酸害の抑制による生育促進作用 (チャ) | |

テイツ・ザイガー(2014)及び森ら(2001)を参考に作成した。

鉱山跡地の土壌環境に多い元素である重金属元素である Fe、Mn、Cu、Zn、Ni 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 を与えることになる。また有用元素である AI は酸性環境では土壌中での移動性が高く植物に過剰に吸収 されやすいため、毒性を生じやすいことが知られており(森ら、2001)、鉱山跡地の土壌環境では植物 に対する影響を考慮するべき元素と考えられる(以下、軽金属元素のAIも考慮にいれるため、「金属元 素」という表現にする)。それでは、鉱山跡地の土壌を想定して植物に生じる毒性について考えてみる。 植物には無機栄養元素がどの程度吸収されているかによって、「欠乏領域」、「適切領域」、「有害領 域」の3つの段階があるとされる。図1-3は植物体の無機元素濃度に対する成長量の関係を示したもの であるが、「欠乏領域」では植物が吸収する元素量が増加すると成長が増加することがわかる。「適切 領域」では植物が吸収する元素量が増加しても必要十分量を満たしているため成長増加にはつながらず、 適切領域を超えた元素の吸収が生じた場合「有害領域」となり成長が減少する。以上から、①植物体内 の元素には適切な濃度域があること、②高濃度になると有毒性を示し成長阻害につながること、が分か る。また、表 1-7 には鉱山環境に比較的多いと考えられる元素を抜粋し、土壌及び植物体での各元素の 濃度範囲(平均値)を示した。一般的にはこれらの濃度範囲を過大に超過して植物が元素を吸収すると 過剰吸収になり毒性を示す可能性があると推測される。以上のことから、鉱山跡地のように土壌に金属 元素が高濃度で存在すると、植物は過剰に元素を吸収してしまうことで成長阻害等の毒性が顕在化する と考えられる。

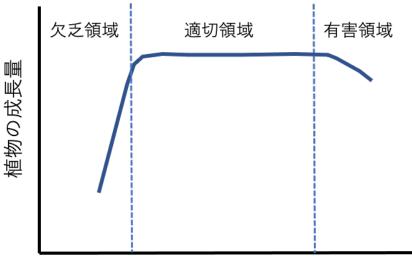


図 1-3 植物の無機元素濃度に対する成長量の関係 テイツ・ザイガー(2014)を参考に作成した。

表 1-7 土壌における元素の平均値及び植物体での濃度範囲

| • • • | | * 11-2 * - 11-11 * 11-12 * 11-12 |
|----------|----------------|----------------------------------|
| 元素 | 土壌での平均値(mg/kg) | 植物体での範囲 (mg/kg) |
| Al | 70000 | 40~500 |
| Fe | 40000 | 2~700 |
| Mn | 1000 | 3~1000 |
| S | 700 | 600~8700 |
| Zn | 90 | 1~400 |
| Ni | 50 | 5まで |
| Cu | 30 | 4~20 |
| Pb | 30 | 20まで |
| Co | 8 | 5まで |
| As* | 6 | $0.02 \sim 7$ |
| Cd* | 0.35 | 0.1~2.4 |
| Cr* | 70 | 0.03~10 |
| 1 (2004) | 2 地址本1 一/2 | #11 D (10(0)) > D T H 2 - |

Larcher (2004)を一部改変して作成した。*は Bowen (1966)からの引用を示す。

1.3.3. 植物における毒性

植物における金属元素の過剰吸収による障害は、生体膜の損傷、酵素反応の阻害、酸素ラジカルの発生による障害、呼吸や光合成系の電子伝達系の不活性化を引き起こし、植物の生命活動の維持に必須な代謝経路の阻害により成長が抑制される(茅野, 1988; Kabata-Pendias, 2010)。また、元素の種類によっても植物体内での移動性が異なるため、毒性を示す組織や症状、程度が異なると考えられている。過剰吸収による Al、Fe、Mn、Cu、Zn、Ni の植物(栽培品種)に対する毒性(可視化できるもの)について、表 1-8 にまとめた。

表 1-8 栽培品種における Al、Fe、Mn、Cu、Zn、Ni 過剰吸収による毒性

| 元素 | 素 毒性症状の特徴 | | | | |
|-------------|---------------------------------|--|--|--|--|
| | | | | | |
| Fe | 葉色の変化(濃い緑色)・地上部や根の発育不全 | | | | |
| Ma | 古い葉でのクロロシス、ネクロシス・表皮細胞での MnO2 沈着 | | | | |
| Mn | 葉の先端の枯死・葉地上部と根の発育不全 | | | | |
| | 濃い緑色の葉色(Fe 欠乏)・太く短い根、有刺鉄線状の根 | | | | |
| Cu | 分げつ抑制 | | | | |
| 7 | 葉の先端にクロロシス、ネクロシス・新しい葉の葉脈の間にクロロシ | | | | |
| Zn | ス・根の障害(有刺鉄線状)・成長阻害 | | | | |
| N 1. | 新しい葉における葉脈間のクロロシス (Fe 欠乏) | | | | |
| Ni | 葉色の変化(灰緑色)・茶色に変色した根の発育不全・成長阻害 | | | | |
| - DI | 葉色の変化(濃い緑色)・古い葉のしおれ・発育不全の葉 | | | | |
| Pb | 茶色に変色した短い根 | | | | |
| | 全体的に発育不全・葉色の変化(濃い緑色)・茎色の変化(紫色) | | | | |
| Al | 葉の先端の枯死・サンゴ状の根・根の障害 | | | | |
| | | | | | |

Kabata-Pendias (2010) をもとに作成した。クロロシスとは葉が黄白化すること、ネクロシスとは細胞が壊死することをさす。

1.4. 金属元素に対する耐性

鉱山環境で生育する植物は、重金属の過剰吸収による毒性を回避するため、金属元素に対して耐性を有する必要がある。植物の耐性機構は、①金属元素の毒性を軽減した上で体内に蓄積する、②積極的に体外に金属元素を排出する、の大きく 2 つに分けることができる。図 1-4 に植物細胞レベルでの金属元素に対する耐性メカニズムを示す。重要なのは、「植物の生命活動を担う核やミトコンドリアなどの細胞内小器官への金属元素の局在を避ける」ようなメカニズムになっている点である。また、重金属はイオン形態での毒性が最も高いと言えるため、「イオン形態であることを避ける」ような解毒メカニズムになっている。

図 1-4 に従い説明をする。①金属元素を細胞壁で吸着し不動化することで細胞内に入れない。細胞壁に含まれる多糖類であるペクチンが金属元素の吸着に関与すると考えられている。②細胞膜の透過性を変化させ、金属元素を細胞質内に移動させない。③細胞質ゾルに移行した金属元素が、硫黄を含むポリペプチドであるグルタチオンや、グルタチオンを基質としたフィトケラチン、ストレス誘導性タンパク質と結合し、無毒化する。④有機酸やフェノール性化合物などと金属元素を結合させ、液胞に隔離させ無毒化する。⑤プロトンポンプなどの機能により、エネルギーを利用して能動的な排出を行う。①~④は、金属元素を蓄積する植物体内での耐性機構、⑤は積極的に体外へ金属元素を排出しているので、金属元素濃度を比較的低濃度で保つ植物における耐性機構、と言い換えることもできる。以上のような耐性メカニズムを獲得することにより、植物は金属元素に対する耐性を獲得できると考えられる。鉱山跡地で健全に生育できる自生植物は、何らかの金属耐性機構を体内に有していると考えられる。

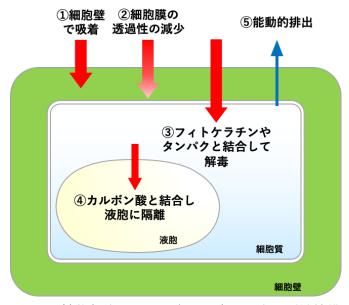


図 1-4 植物細胞における金属元素に対する耐性機構

Larcher (2004)をもとに作成した。

1.5. 好金属植物の利用

1.5.1. ファイトレメディエーション

ファイトレメディエーション(phytoremediation)は「植物」を意味する phyto と「修復」を意味する remediation を合わせた造語で、植物によって環境中の除去対象物質・元素を浄化する手法とされる。対象土壌を取り除いて他の土壌に入れ替える方法(客土)のような即効性はないが、広範囲かつ低濃度に存在する対象物質や元素を含有する土壌の持続的な浄化に効果的であるとされる。ファイトレメディエーションはさらに細分化されるが、重金属に関わる項目として以下の3つを示す(Ali et al., 2013)。①ファイトエキストラクション(phytoextraction):植物の地上部に重金属を移行・蓄積させ、地上部を刈り取ることで重金属の除去を行う方法である。小規模な土地に適しており、農耕地が対象となる場合が多い。②ファイトスタビライゼーション(phytostabilization):植物が土壌中での重金属の移動性を減少させ、系外や地下水への拡散を抑制する方法であり、植生を発達させることにより長期間に渡る土壌の安定化を図るものと言い換えることができる(Wang et al., 2017)。ファイトスタビライゼーションでは重金属の拡散を抑制できるよう、重金属耐性があり根系の発達が望まれる植物種である必要がある。鉱山跡地の緑化はファイトスタビライゼーションの考え方に近いと考えられ(Ali et al., 2013)、国際的にも現地で重金属元素を蓄積する植物種を選抜する研究事例が多く報告されている。③ファイトフィルトレーション(phytofiltration):水生植物の根において坑廃水から重金属を吸収・吸着させ、水中から元素を除去する方法である。鉱さいたい積場などの湿性環境で検討できる方法となる。

好金属植物の中には、微量必須栄養元素としての濃度の 100~1000 倍に達する高濃度で重金属を蓄積することができる植物(ハイパーアキュミュレーター)が存在するが、ハイパーアキュミュレーターはファイトエキストラクションに適した植物である。国内の例だと、Cd のハイパーアキュミュレーターであるハクサンハタザオを用いた農地でのファイトエキストラクションの研究事例がある(Zhang et al., 2017; 菅原ら、2011)。 Zhang et al. (2017) の結果によるとハクサンハタザオの収穫により 18.2 kg/ha の Cd、27.38 kg/ha の Zn が土壌から除去できたとある。ファイトエクストラクションの成否には、植物個体の大きさや重金属耐性に加え、対象の重金属が吸収しやすい形態にあるか否かが重要であり(Ma et al., 2011)、キレート剤を投与することで土壌から重金属元素を溶出して植物に吸収させる報告例は国際的にも数多いが、土壌へ投与したキレート剤の影響も考慮する必要が出てくる。しかし、ハクサンハタザオの研究事例では植物が吸収しにくい形態のCd及びZnを吸収したと示唆される結果が出ており(Zhang et al., 2017)、ファイトエクストラクションへの実用性が期待されるものである。

1.5.2. ファイトマイニング

ハイパーアキュミュレーターは、ファイトマイニング(phytomining, 植物採鉱)にも利用可能とされる(Brook et al., 1998a)。ファイトマイニングとは、成長量が大きく、かつ、植物体内に対象元素を高濃度蓄積できる植物種(作物など)を生育させた後、植物から目的元素を抽出し目回収する方法である。現地での栽培試験の結果、Ni のハイパーアキュミュレーターであるアブラナ科植物 Alyssum bertolonii から回収できる Ni 量は 7.2 g/m²、南アフリカのキク科植物 Berkheya coddii から回収できる Ni 量は 11 g/m² と試算された例もある(Brook et al., 1998a)。また、Au を含むスラッジにキレート剤を投与して Au を溶出後、Au をカラシナやチュリーなどに蓄積させ効率的に回収することができる可能性を示した研究報告もある(Brook et al., 1998b)。その他のファイトマイニングについては井藤賀ら(2010)が詳しいので参考にされたい。

4.6海外におけるファイトマイニング (phytomining) の事例紹介で別途言及する。

2. 重金属環境に自生する金属元素を蓄積する植物

2.1. はじめに

本章では、実際の野外環境(主に鉱山環境)で自生する植物の金属元素蓄積に関する報告例をまとめた。論文検索にあたり着目したのは、「野外環境で生育する植物を採取して分析した研究内容」である。重金属を含む実験室内での水耕培養での試験に関する論文を含めると多数のものが存在するが、実際の野外での緑化に対して植物を選択する際には、実験室内のデータが必ずしも反映しない可能性を考慮したためである。2.2 では国内の研究事例を、2.3 では海外の研究事例を掲載した。国内外論文について、生育場所、土壌及び水の元素濃度のデータ、植物名、植物の元素濃度のデータを、引用先とともに掲載した。ハイパーアキュムレーターのように高濃度の元素蓄積植物以外についても掲載した。土壌や水のpH は論文中で記載がある限り記入した。分析方法については表 2-1 にまとめて示した。なお、植物の組織名については「葉」、「根」というように簡略化し、学術的に正確な組織名は使用しなかった。

また、植物体の含有元素濃度が比較的低い場合でも、土壌の含有元素濃度が高い条件でも生育できていると判断されたものについては、有用な情報となりうると判断し掲載をした。

項目方法土壌の含有元素濃度硝酸、過塩素酸、フッ化水素酸による分解 (0.1 M HCl 抽出の場合は、その旨記載をした)植物の含有元素濃度硝酸・硫酸・過塩素酸などによる湿式灰化 植物の採取時期春・夏・秋 (植物の成長期)

表 2-1 研究論文報告での分析方法

2.2. 国内の事例

コケ植物・シダ植物は表 2-2 に、草本類は表 2-3 に、樹木は表 2-4 にそれぞれ示した。採取場所について、鉱山名をふせて掲載した。気候条件は植物の生育に重要な要因であると考え、地方名は記載した。植物の引用文献の記載も表に入れた。

2.3. 海外の事例

シダ植物は表 2-5 に、草本類は表 2-6 に、樹木は表 2-7 にそれぞれ示した。海外の研究事例については、植物の生育する気候条件の参考となると考え、国名及び場所を掲載した。また、海外で注目されている重金属蓄積性植物の中には外来種であるものあったため、国立研究開発法人国立環境研究所「侵入生物データベース」で全ての植物種が外来種でないことを確認して掲載した。以下に HP アドレスを示す。https://www.nies.go.jp/biodiversity/invasive/

表 2-2 コケ植物・シダ植物 (国内の研究報告より作成)

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 | |
|----------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------|
| | | Scopelophila cataractae | 雨水 mg/L | 葉先端 5 mm | Satake et al. (1988) Journal of Bryology 15: 353–376. | |
| 士明忠 (東書) | | зсорегорниа санагаснае | Cu 6.2 | Cu 30800 | | |
| 本門寺(東京) | コケ植物 | | Fe 0.1 | Fe 18600 | | |
| | | ホンモンジゴケ | Al 0.1 | Al 16100 | | |
| | | Scopelophila cataractae | 融雪水 mg/L | 葉先端 0-15 mm | | |
| 圓蔵寺 | コケ植物 | ъсорегорниа санагаснае | Cu 0.8 | Cu 11800–27470 | 佐竹 (2014) 銅ゴケの不思 | |
| (会津柳津) | コク 相関の | ホンモンジゴケ | | | 議株式会社イセブ,p49. | |
| | | | 雨水 mg/L | 葉 先端 0-15 mm | | |
| 専福寺 | | Scopelophila cataractae | Cu 13 | Cu 12600–27600 | 佐竹 (2014) 銅ゴケの不思 | |
| (会津若松) | コケ植物 | | | | | |
| V = 111. 111. | | ホンモンジゴケ | | | | |
| | コケ和郷 | Sanalonkila satavastas | 雨水 mg/L | 原糸体:Cu 11400-17800 | | |
| 筑波山神社 | | 3. 上海 3. 上海 5. 上海 | Scopelophila cataractae | Cu 1.2–1.7 | 茎葉体先端部 (0-3 mm): Cu 13100 | Satake et al. (1990) Journal |
| (つくば) | | ホンモンジゴケ | pH 5.6-5.8 | 茎葉体先端部 (3-6 mm) : Cu 14100 | ofBryology 16: 109–116. | |
| | | | ホンセンシュケ | | 茎葉体基部 (6-9 mm) : Cu 12500 | |
| | #・温泉地 コケ植物 チャツボミゴケ | hmoarmannia vylaaniaola | 水 mg/L | 茎葉体:Fe 18700 | Satake and Saijo (1974) | |
| 期末 . 泪息胁 | | Fe 6.8 | | Limnology and | | |
| 因水 溫水地 | | | チャツボミゴケ | рН 1.9–2.0 | | Oceanography 19: 331– |
| | | フィンホミニ ク | | | 336. | |
| | | haarman | Jungermannia vulcanicola | 水 mg/L | 茎葉体: Fe 12300 | Satake and Saijo (1974) |
| 関東・温泉地 | コケ植物 | | Fe 1.3 | | Limnology and | |
| 风水 皿水垣 | 対果・温泉地 コケ植物 チャツボミゴケ | チャツボミゴケ | рН 1.9–2.0 | | Oceanography 19: 331– | |
| | | ノヤノかくログ | | | 336. | |

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 | | | | | | |
|-------------|-----------------|------------------------------|--------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------|--------------|------------------------------|-------------------------|---------------------|--|
| | | Scopelophila cataractae | 水 mg/L | 植物体全体: As 0.45 Cu 15 | | | | | | | |
| 北陸地方 | コケ植物 | beoperophia catalactee | As 0.005 Cu 0.023 | Fe 45 Pb 2 Zn 4 | Suzuki et al. (2016) Mine Water Environ 35: 265– | | | | | | |
| 鉱山 | | ホンモンジゴケ | Fe 0.001 Pb 0.004 | | 272. | | | | | | |
| | | 4.0 500 | Zn 0.880 pH 6.7 | | | | | | | | |
| | | Brachythecium plumosum | 水 mg/L | 植物体全体: As 0.1 Cu 8 | g 1: . 1 (001 () 2 f | | | | | | |
| 北陸地方 | コケ植物 | ът аспутнестт ратомин | As 0.005 Cu 0.023 | Fe 12 Pb 1 Zn 5 | Suzuki et al. (2016) Mine Water Environ 35: 265– | | | | | | |
| 鉱山 | 7 IIE IW | ハネヒツジゴケ | Fe 0.001 Pb 0.004 | | 272. | | | | | | |
| | | 7.7.2.2.2.3 | Zn 0.880 pH 6.7 | | | | | | | | |
| | コケ植物 | | | | | | | Rhynchostegium riparioides | 水 mg/L | 植物体全体: As 0.02 Cu 2 | |
| 北陸地方 | | | As 0.005 Cu 0.023 | Fe 10 Pb 0.8 Zn 2 | Suzuki et al. (2016) Min Water Environ 35: 265— | | | | | | |
| 鉱山 | | アオハイゴケ | Fe 0.001 Pb 0.004 | | 272. | | | | | | |
| | | 7 47 - 1 - 2 | Zn 0.880 pH 6.7 | | | | | | | | |
| | ことがおかか | シダ植物 | シガ病肺 | २ / देर्ग kata filan | (地方 シダ精物 | Equisetum arvense | 土壌 mg/kg | 枝: Cd 23 Zn 1110 Cu 17 Pb 24 | Morishita and Boratynsl | | |
| 東北地方 | | | | | | Equiseium di verse | Cd 10 Zn 920 | 茎: Cd 14 Zn 633 Cu 26 Pb 34 | (1992) Soil Science and | | |
| 製鍊所周辺 | 2) HERO | スギナ | Cu 36 Pb 36 | 地下茎: Cd 70 Zn 2330 Cu 144 Pb 323 | Plant Nutrition 38: 781—785. | | | | | | |
| 東北地方 集積場 | ことは社が | | | Equipatem flensiatila | 土壌 mg/kg | 地上部: Fe 400 Cu 55 Mn 25 | | | | | |
| | | Equisetum fluviatile シダ植物 | Fe 170000 Al 53000 | 地下部: Fe 8000 Cu 450 Mn 100 | 黒澤ら (2021) 環境資源コ | | | | | | |
| | マラ (巨物) | ミズドグサ | Zn 19000 Cu 11000 | | 学67:122-127. | | | | | | |
| | | 7/1// | Mn 1500 pH 7.7 | | | | | | | | |

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 | | | | | | |
|---------|---------------------|-----------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------|--|-----|----------|-----------------------|--|
| | | Athyrium yokoscense | 土壤 mg/kg | 古葉:As 242 Cd 1095 Pb 80 Zn 973 Cu 88 | | | | | | | |
| 関西地方 | シダ植物 | Atnyi tum yokoscense | As 814 Cd 11 | 成熟葉: As 240 Cd 959 Pb 40 Zn 700 Cu 40 | Van et al. (2006) Soil Science and Plant Nutritio | | | | | | |
| 鉱山 | ンク 和 E+707 | ヘビノネゴザ | Pb 3464 Zn 2422 | 若葉: As 168 Cd 335 Pb 30 Zn 150 Cu 30 | 52: 701–710. | | | | | | |
| | | ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | Cu 343 pH 5.2 | 根: As 2175 Cd 80 Pb 2040 Zn 1165 Cu 375 | | | | | | | |
| | | Athyrium yokoscense | 土壌 mg/kg | 葉: Cu 72-1050 Cd 6-167 | Usui et al. (1975) Special | | | | | | |
| 関東地方 | シダ植物 | nosyr tans yoursessue | Cu 242–2232 | 根: Cu 1320-5270 Cd 1.2-27.4 | Bulletin of the Collage of | | | | | | |
| 鉱山 | U J IEW | ヘビノネゴザ | Cd 0.5–23 | | Agriculture, Ustunomiya University 9: 25–36. | | | | | | |
| | | ベビノ 不コッ | pH (KCl) 3.6-4.2 | | Offiversity 7, 25–30. | | | | | | |
| | | Athyrium yokoscense | 土壌 mg/kg | 葉: Cd 996 Zn 1690 Cu 27 Pb 28 | Morishita and Boratynski | | | | | | |
| 北陸地方 | シダ植物 | | Cd 20 Zn 1800 | 葉柄: Cd 287 Zn 290 Cu 11 Pb 30 | (1992) Soil Science and | | | | | | |
| 製鍊所周辺 | | V / 11212 | ヘビノネゴザ | Cu 140 Pb 141 | 根: Cd 185 Zn 4710 Cu 498 Pb 1140 | Plant Nutrition 38: 781—785. | | | | | |
| | 3、序标制6m | Athyrium シダ植物 | | | | | | 4.1 | 土壌 mg/kg | 胞子: Pb~81 胞子囊: Pb~740 | |
| Pb汚染土壌 | | | Athyrium yokoscense | Pb 3000-57000 | 葉身: Pb ~2080 葉柄: Pb ~1530 | 酒井ら (1991) 日本化学会 | | | | | |
| ru(7朱土墩 | ンク (1 <u>11</u> 47) | ヘビノネゴザ | | 根茎: Pb ~2890 根: Pb ~22400 | 誌 5: 416-421. | | | | | | |
| | | 4.4 - 1 | 土壌 mg/kg | 根茎・根:Ag 1.6-7.3 | | | | | | | |
| 関西地方 | シダ植物 | Athyrium yokoscense | Ag 56–69 | 葉:Ag 1.7-4.5 | 北川 (2005) 植物地理・分 | | | | | | |
| 鉱山 | ング (1E-10) | ング惟物 ヘビノネゴザ | | | 類研究 53: 161-165. | | | | | | |
| Pb汚染土壌 | | Athawiam wkonacca | 土壤 mg/kg | 葉身: Pb 7.5-1500 | | | | | | | |
| | シダ植物 | Athyrium yokoscense | Pb 3000-57000 | 葉柄: Pb 64-1000 | 本浄ら (1984) 植物地理・ | | | | | | |
| | ング恒物 | シタ種物 へビノ | | | 根茎・根:Pb 93-11000 | 分類研究 32: 68-80. | | | | | |

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 | | |
|---------|--------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| | | Athyrium yokoscense | 土壌 mg/kg | 葉: Cd 716 Zn 6370 Cu 23 Pb 31 | Morishita and Boratynski | | |
| 東北地方 | シダ植物 | | Cd 9.9 Zn 920 | 葉柄: Cd 74 Zn 677 Cu 19 Pb 25 | (1992) Soil Science and | | |
| 製錬所周辺 | ンク 110-1 20 | ヘビノネゴザ | Cu 36 Pb 36 | 根: Cd 24 Zn 11300 Cu 223 Pb 842 | Plant Nutrition 38: 781—785. | | |
| | | Athyrium yokoscense | 土壌 mg/kg | 葉:Cd 922 Zn 378 Cu 22 Pb 569 | Morishita and Boratynski | | |
| 中部地方 | シダ植物 | hityi tani yokoscerae | Cd 47 Zn 10300 | 葉柄: Cd 393 Zn 228 Cu 34 Pb 615 | (1992) Soil Science and | | |
| 製錬所周辺 | | ヘビノネゴザ | Cu 1260 Pb 1070 | 根: Cd 115 Zn 1410 Cu 330 Pb 1400 | Plant Nutrition 38: 781—785. | | |
| | | Athyrium yokoscense | 土壌 mg/kg | 葉: Cd 451 Zn 1130 Cu 34 Pb 32 | Morishita and Boratynski | | |
| 関東地方 | シダ植物 | | Cd 14 Zn 1250 | 葉柄: Cd 316 Zn 992 Cu 30 Pb 27 | (1992) Soil Science and | | |
| 製錬所周辺 | | | | ヘビノネゴザ | Cu 111 Pb 149 | 根: Cd 157 Zn 2810 Cu 523 Pb 637 | Plant Nutrition 38: 781—785. |
| | シダ植物 | | Athyrium yokoscense | 土壤 mg/kg | 葉: Cu 90-275 Zn 76-155 Cd 10-48 | | |
| 関東地方 | | Amyi iani yokoscense | Cu 744–3589 Zn 95–672 | 根: Cu 735-5989 Zn 121-644 Cd 4-13 | Nishizono et al. (1987) | | |
| 鉱山 | | ヘビノネゴザ | Cd 2–7 | 枯死葉:Cu 518–1990 Zn 335–401 Cd 19–36 | Plant and Soil 102: 65-70 | | |
| | | | | Athyrium yokoscense | 土壤 mg/kg | 葉: Cu 19–32 Zn 692–803 Cd 36–165 | |
| 東北地方 | シダ植物 | Ainyi tum yokoscense | Cu 69-235 Zn 882-11430 | 根: Cu 26-127 Zn 1120-6384 Cd 11-54 | Nishizono et al. (1987) | | |
| 製鍊所周辺 | V / 1E10 | ヘビノネゴザ | Cd 23-96 | 枯死葉:Cu 154-305 Zn 14464-25654 Cd 215-462 | Plant and Soil 102: 65-70 | | |
| | | Athyrium yokoscense | 土壤 mg/kg | 地上部: Cu 24-38 Ni 1-2 Zn 11-57 Pb 30-51 | 気波大学・環境生態化学 | | |
| 関東地方 | シダ植物 | | Cu 214–375 Ni 8–13 | 根茎:Cu 43-82 Ni 2-3 Zn 113-128 Pb 217-278 | | | |
| 広山周辺国有林 | イン相関が | ヘビノネゴザ | Zn 117–130 Pb 269–530 | 細根: Cu 158-201 Ni 2-3 Zn 102-190 Pb 324-592 | 研究室所蔵データ | | |
| | | ヘビノ不コザ | pH4.2 | | | | |

表 2-3 草本類 (国内の研究報告より作成)

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 | |
|---------|--------------|----------------------|-----------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--|
| | | Anton Fontinintus | 土壌 mg/kg | 葉: Cd 32 Zn 672 Cu 34 Pb 30 | | |
| 北陸地方 | 友生芸 | Aster fastigiatus | Cd 20 Zn 1800 | 茎: Cd 19 Zn 64 Cu 12 Pb 223 | Morishita and Boratynski (1992) So | |
| 製鍊所周辺 | 多年草 | ヒメシオン | Cu 140 Pb 141 | 根: Cd 22 Zn 368 Cu 48 Pb 24 | Science and Plant Nutrition 38: 781–785 | |
| | | Anabia accomitara | 土壌 mg/kg | 葉: Cd 95 Zn 178 Cu 45 Pb 227 | N 1 | |
| 東北地方 | 多年草 | Arabis gemmifera | Cd 10 Zn 920 | 茎: Cd 95 Zn 296 Cu 45 Pb 365 | Morishita and Boratynski (1992) Soil | |
| 製鍊所周辺 | 多年早 | ハクサンハタザオ | Cu 36 Pb 36 | 根: Cd 158 Zn 695 Cu 222 Pb 2450 | Science and Plant Nutrition 38: 781–785. | |
| | | 4.1. | 土壤 mg/kg | 葉: Cd 1810 Cu33 Fe 648 Mn 128 Pb 383 Zn 20300 | Kubota and Takenaka | |
| 北陸地方 | 多年草 | Arabis gemmifera | Cd 83 Cu 65 Fe 25 | 茎: Cd 555 Cu 8 Fe 123 Mn 21 Pb 1560 Zn 9520 | (2003) International Journal of Phytoremediation 5: 19 –201. | |
| 鉱山周辺 | | ク 午早 ハクサンハタザオ | Mn 113 Pb 608 Zn 2880 | 根: Cd 295 Cu 109 Fe 2040 Mn 74 Pb 2430 Zn 3130 | | |
| | | | (0.1M HCl溶出) | | | |
| | ツル性多年生 草本 | | Paederia scandens | 土壤 mg/kg | 葉:Sb 522-994 | |
| 四国地方 | | 1 dederia scandens | Sb 472 | 茎:Sb 453 | 内海ら (2009) 愛媛大学 | |
| 鉱山 | | ヘクソカズラ | | 実: Sb 39 | 理学部起要 15: 17-26. | |
| | | <i>a</i> | 土壌 mg/kg | 葉: Cd 6 Zn 466 Cu 16 Pb 254 | | |
| 北陸地方 | 草本 | Cyperus spp. | Cd 20 Zn 1800 | 茎: Cd 2 Zn 935 Cu 10 Pb 26 | Morishita and Boratynski (1992) Soil | |
| 製鍊所周辺 | 早 平 一 | カヤツリグサ属 | Cu 140 Pb 141 | 根: Cd 23 Zn 1560 Cu 52 Pb 67 | Science and Plant Nutrition 38: 781–785. | |
| | | | 土壌 mg/kg | 葉: Cu 27 Ni 18 Zn 27 Cd ND Pb 20 | 筑波大学・環境生態化 | |
| 関東地方 | 多年生草本 | Sasa veitchii | Cu 504 Ni 21 | 茎: Cu 29 Ni 6 Zn 29 Cd ND Pb 10 | | |
| 広山周辺国有林 | 9十二早平 | クマザサ | Zn 95 Cd 6 | 地下茎: Cu 68 Ni 5 Zn 62 Cd ND Pb 16 | 学研究室所蔵データ | |
| | | クャリリ | Pb 614 | 根: Cu 235 Ni 10 Zn 116 Cd 18 Pb 160 | | |

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 | |
|---------|----------------|---------------------|---------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--|
| | | Migganthus SDD | 土壤 mg/kg | 葉: Cd 2 Zn 160 Cu 14 Pb 35 | | |
| 東北地方 | 草本 | Miscanthus spp. | Cd 10 Zn 920 | 茎: Cd 2 Zn 450 Cu 29 Pb 31 | Morishita and Boratynski (1992) So | |
| 製鍊所周辺 | 早 个 | ススキ属 | Cu 36 Pb 36 | 根: Cd 15 Zn 326 Cu 194 Pb 575 | Science and Plant Nutrition 38: 781–785 | |
| | | Miscanthus sinensis | 土壌 mg/kg | 地上部:Al 70-284 Fe ND-141 Cu 4.5-8.7 Zn 16-78 | | |
| 関東地方 | 夕年上世士 | Miscaninas sinensis | Al 54375 Fe 38569 | 枯死葉:Al 208-1026 Fc 110-665 Cu 10-27 Zn 15-71 | Haruma et al. (2018) | |
| 鉱山周辺国有林 | 多年生草本 | مدل بود بود | Cu 439 Zn 83 | 地下茎:Al 448-1852 Fc 264-1279 Cu 14-40 Zn 28-261 | Plant Species Biology 33: 109–122. | |
| | | ススキ | pH 4.3–4.4 | 細根:Al 1742-2675 Fe 903-1403 Cu 74-108 Zn 33-134 | | |
| | | Miscanthus sinensis | 土壌 mg/kg | 葉: Fe 288 Al 216 Zn 448 | | |
| 東北地方 | 多年生草本 一 | | Fe 191616 Al 58474 | 地下茎: Fe 121 Al 147 Zn 597 | 筑波大学・環境生態化学研究室所蔵データ | |
| 鉱山集積場 | | ススキ | Zn 18890 | 細根: Fe 842 Al 568 Zn 747 | | |
| | | | pH 7.6 | 根皮: Fe 7445 Al 723 Zn 848 | | |
| | 夕仁儿古士 | | Miscanthus sinensis | 土壌 mBq/g | 葉: ²²⁶ Ra 7 mBq/g | |
| 中国地方 | | 多年生草本 | 226Ra 58 | 葉: ²²⁶ Ra 7 mBq/g | Shitaka et al. (2002) Journal of Nuclear | |
| U鉱山集積場 | 多十生早本 | ススキ | | | Science and Technolog 958–961. | |
| | | D | 土壤 mg/kg | 地上部:Cu 147 Zn 247 Cd 7 | 27.1. | |
| 関東地方 | 夕年上古士 | Reynoutria japonica | Cu 2746 Zn 466 | 根: Cu 2142 Zn 243 Cd 14 | Nishizono et al. (1989) Plant and Cell | |
| 鉱山 | 多平生早本 | 多年生草本 イタドリ | Cd 6 | | Physiology 30: 595— 598. | |
| | | Domoutria ignorias | 土壌 mg/kg | 葉: A1510-829 Fe 114-136 Zn 76-103 Cu 25-29 Pb 16-23 | 筑波大学・環境生態化 | |
| 関東地方 | 多年生草本 - | Reynoutria japonica | Zn 87 Cu 787 | 茎: A158-78 Fe 24-45 Zn 27-37 Cu21-28 Pb 5-8 | | |
| 鉱山周辺国有林 | 多十生早平 | イタドリ | Pb 377 Al 49334 | 地下茎:Al 292-575 Fe 121-318 Zn 25-38 Cu 31-41 Pb 18-34 | 学研究室所蔵データ | |
| | | イクド ク | Fe 42759 pH 4.6 | 細根:Al 494–963 Fe 126–368 Zn 11–35 Cu ND–45 Pb 52–83 | | |

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 | |
|---------|------------|------------------------|-----------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------|------------|
| | | D | 土壌 mg/kg | 葉:Al 583 Fe 872 Zn 207 Cu 83 Pb 3 | | |
| 東北地方 | 夕左升去十 | Reynoutria japonica | Al 8490 Fe 46640 | 茎: Al 165 Fe 121 Zn 66 Cu 58 Pb 3 | Lu et al. (2021) Minerals 11, 806. | |
| 鉱山選鉱場跡地 | 多年生草本 | 2 h 1 v II | Zn 624 Cu 1292 | 地下茎: Al 443 Fe 647 Zn 106 Cu 72 Pb 13 | https://doi.org/10.3390/ min11080806 | |
| | | イタドリ | Pb 1368 pH 7.5 | 根: Al 2207 Fe 3604 Zn 188 Cu 263 Pb 36 | IIIII TOOOOO | |
| | | D | 記載なし | 葉: Mn 78 Zn 56 Co <0.5 Ni 0.9 Cd 0.5 | Okamoto et al. (1980) | |
| 関東地方 | 多年生草本 | Reynoutria japonica | | Fe 110 Cu 10 Pb 0.7 | Research Report from the National Institute for | |
| 鉱山 | 多平生早本 | イタドリ | | | Environmental Studies 18: 1–102. | |
| | | | 土壌 mg/kg | 葉:Cu 38 Nī 5 Zn 41 Cd ND Pb 6 | | |
| 関東地方 | 多年生草本 | Lysimachia clethroides | Cu 640 Ni 11 Zn 300 | 茎: Cu 25 Ni 3 Zn 43 Cd ND Pb 9 | 筑波大学・環境生態化 | |
| 鉱山周辺国有林 | | オカトラノオ | Cd 15 Pb 593 | 根:Cu 81 Ni 9 Zn 299 Cd 36 Pb 22 | 学研究室所蔵データ | |
| | | A W L / / A | pH 5.0 | | | |
| | 夕 年 | 多年生草本 | Eupatorium chinense | 土壌 mg/kg | 葉: Cu 46 Ni 6 Zn 145 Pb 8 | |
| 関東地方 | | | Eupatorium emmense | Cu 236 Ni 30 | 茎: Cu 32 Ni 5 Zn 97 Pb 3 | 筑波大学・環境生態化 |
| 鉱山周辺国有林 | 多十工早小 | ヒョドリバナ | Zn 28 Pb 161 | 根: Cu 55 Ni 6 Zn 82 Pb 12 | 学研究室所蔵データ | |
| | | | Artemisia indica var. | 土壌 mg/kg | 葉: Cd 30 Zn 742 Cu 49 Pb 38 | W - 1 |
| 東北地方 | 多年生草本 | maximow iczii | Cd 10 Zn 920 | 茎: Cd 10 Zn 168 Cu 24 Pb 236 | Morishita and Boratynski (1992) Soil | |
| 製錬所周辺 | 多十工早小 | ヨモギ | Cu 36 Pb 36 | 根: Cd 76 Zn 3030 Cu 153 Pb 361 | Science and Plant Nutrition 38: 781–785. | |
| | | Artemisia indica var. | 土壌 mg/kg | 葉: Al 454 Fe 824 Zn 164 Cu 45 Pb 12 | | |
| 東北地方 | 多年生草本 | maximow iczii | Fe 30600 Al 8700 | 茎: Al 65 Fe 156 Zn 161 Cu 41 Pb 4 | Lu et al. (2021) Minerals 11,806. | |
| 鉱山選鉱場跡地 | 9十二早年 | ヨモギ | Zn 226 Cu 391 | 根:Al 843 Fe 3711 Zn 272 Cu 220 Pb 66 | https://doi.org/10.3390/ min11080806 | |
| | | 11 T M | Pb 210 pH 6.6 | | | |

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度 (mg/kg) | 引用文献 | | | | | | | |
|------------------|---------------|----------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------|----------------------|--|------|---|-----------------------------------------------------------|--|
| | | 1 1 | 土壌 mg/kg | 地上部:Fe 2200 Cu 125 Mn 55 | | | | | | | | |
| 東北地方 | 多年生草本 | Lespedeza cuneata | Fe 170000 Al 53000 | 地下部:Fe 12500 Cu 800 Mn 200 | 黒澤ら (2021) 環境資源 | | | | | | | |
| 鉱山集積場 澱物の生育試験 | 多年生早本 | メドハギ | Zn 19000 Cu 11000 | | 工学 67: 122-127. | | | | | | | |
| | | メトハキ | Mn 1500 pH 7.7 | | | | | | | | | |
| | | C 1 | 土壤 mg/kg | 地上部: Cu 23 Ni 18 Zn 70 Cd ND Pb 8 | | | | | | | | |
| 関東地方 | 2年生草本 | Cardamine flexuosa | Cu 640 Ni 11 | 地下部: Cu 98 Ni 84 Zn 195 Cd 15 Pb 85 | 筑波大学・環境生態化 | | | | | | | |
| 鉱山周辺国有林 | 2十生早本 | タネツケバナ | Zn 300 Cd 15 Pb 593 | | 学研究室所蔵データ | | | | | | | |
| | | クインケハナ | pH 5.0 | | | | | | | | | |
| | | Phragmites australis | 土壤 mg/kg | 根・水面下の茎:Cu 30–89 Zn 41–142 | | | | | | | | |
| 北海道 鉱山 | 多年生草本 水生植物 | | Cu 411–6780 | | 荻野ら(2001) 北海道立 地質研究所報告 72: 115 | | | | | | | |
| 化酶坦 数田 | | ョシ | Pb 69-333 Zn 105-5950 | | 型員切允別報告 72.113 —120. | | | | | | | |
| | | | 3.7 | pH 3.0-6.5 | | | | | | | | |
| | 多年生草本 | | | Phragmites australis | 土壌 | 葉: ²²⁶ Ra 160 mBq/g | Shitaha et al (2002) | | | | | |
| 中国地方 U鉱山 | | 1 m agmitta austrans | ²²⁶ Ra 1420 mBq/g | 茎: ²²⁶ Ra 27 mBq/g | Shitaka et al. (2002) Journal of Nuclear | | | | | | | |
| 広さいたいせき場 | 水生植物 | ∃シ | | | Science and Technology 39: 958–961. | | | | | | | |
| | | | | | | | | | ni i | 水 | 葉:Fe 0.1-0.37 Mn 0.2-2 ²³⁸ U ND-0.79 μg/g 灰化DW | |
| 中国地方 | 多年生草本 | Phragmites australis | Fe 9–15 mg/L Mn 0.6-1 mg/L | 茎:Fe 0.03-0.1 Mn 0.03-0.32 ²³⁸ U ND-0.28 μg/g 灰化DW | Nakamoto et al. (2021) Minerals 11, 1337. | | | | | | | |
| U鉱山 鉱さいたいせき場 | 水生植物 | 72, | ²³⁸ U 15–46 µ/L | 節根: Fe 7–93 Mn 0.9 –8 ²³⁸ U 26.6–684 µg/g 灰化DW | https://doi.org/10.3390/ min11121337 | | | | | | | |
| | | ヨシ | рН 6.7-6.8 | | | | | | | | | |
| Jak * 4-1. | | | 流入水 mg/L | 葉: Fc 192–2279 Mn 487–1628 Cu 11–715 Zn 23–76 | | | | | | | | |
| | 多年生草本 | Phragmites australis | Fe 0.02-117 Mn 1.2-26 | 茎: Fe 29-663 Mn 132-504 Cu 2-54 Zn 12-47 | 北海道道立地質研究所 ら (2005) 平成16年度 重 | | | | | | | |
| 北海道 鉱山 | 水生植物 | ョシ | Cu 0.06-3.1 Zn 0.05-1.87 | 根:Fe 2027-12598 Mn 309-2143 Cu 35-492 Zn 25-102 | 点領域研究課題報告書. | | | | | | | |
| | | | | J 2 | pH 5.8 (平均) | | | | | | | |

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 |
|---------------------------------------|-------|----------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| | | T | 流入水 mg/L | 葉 : Fe 106-4265 Mn 1215-14227 Cu 7-210 Zn 12-96 | |
| ····································· | 多年生草本 | Typha latifolia | Fe 0.02–117 Mn 1.2–26 | 茎:Fe 16-1280 Mn 505-1382 Cu 2-60 Zn 14-30 | 北海道道立地質研究所 |
| 北海道 鉱山 | 水生植物 | ガマ | Cu 0.06–3.1 Zn 0.05–1.87 | 根:Fc2491-26067 Mn 12-1886 Cu 30-350 Zn 43-161 | ら (2005) 平成16年度 重 点領域研究課題報告書. |
| | | ДŸ | pH 5.8 (平均) | | |
| | | n | 水 | 葉: ²³⁸ U (38-60 (μg/g 灰化重量)Fe 5-17 Mn 7-18 | |
| 中国地方 | 多年生草本 | Potamogeton fryeri | ²³⁸ U 2 μ/L | 茎: ²³⁸ U (16-19 (µg/g 灰化重量)Fe 4 Mn 2-6 | 筑波大学・環境生態化 学研究室と研究機関と の共同研究データ |
| U鉱山 鉱さいたいせき場 | 水生植物 | 植物 フトヒルムシロ | Fe 0.7 mg/L Mn 0.8 mg/L | 地下茎: ²³⁸ U (5-25 (μg/g 灰化重量) Fe 14-17 Mn 3 | |
| | | 7 F E 1/2 5 U | рН 6.8 | 根: ²³⁸ U 17-70 (μg/g 灰化重量)Fe 79-98 Mn 1-2 | |
| | | Citi | 沼土壌 mg/kg | 地上部: Zn 150-220 | Nagata et al. (2014) Plant Species Biology 30: 116 –125. |
| 関東地方 鉱山周辺国有林 | 多年生草本 | Cicuta virosa 生草本 | Cu 760–993 Zn 273–454 | 地下茎:Zn 500-600 | |
| | 水生植物 | 水生植物 ドクゼリ | Pb 670–798 | 不定根:Zn 6000-8000 | |
| | | | pH 6.0 | | |

表 2-4 樹木 (国内の研究報告より作成)

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 | | | | | |
|-----------------|---------------------------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------|----------|------------------------|--|
| | | Cl.4 | 記載なし | 葉: Mn 1350 Zn 360 Co 8 Ni 6 Cd 8 | Okamoto et al. (1980) | | | | | |
| 関東地方 | ************************************ | Clethra barbinervis | | Fe 120 Cu 12 Pb 1 | Research Report from the | | | | | |
| 鉱山 | 落葉広葉樹 | リョウブ | | | National Institute for Environmental Studies 18: 1-102. | | | | | |
| | | al 4 1 1 · · | 土壤 mg/kg | 葉: Zn 190-450 | | | | | | |
| 関東地方 | *** | Clethra barbinervis | Cu 436–644 Zn 132–193 | 枝: Zn 100-220 Pb 40-280 | Yamaji et al. (2016) PloS ONE | | | | | |
| 鉱山周辺国有林 | 落葉広葉樹 - | 11 Ja-2* | Pb 492–779 | 根: Cu 150-250 Zn 150-350 Pb 280-800 | DOI:10.1371/journal.pon e.0169089. | | | | | |
| | | リョウブ | pH 3.6 | | c.0107007 . | | | | | |
| | | a 11 : | 土壤 mg/kg | 葉: Cd 80 Zn 800 | | | | | | |
| 関西地方 | 落葉広葉樹 — | 基本基件基础 | Gamblea innovans | Cd 19 Zn 78 | | Takenaka et al. (2009) Environ Geochem Health | | | | |
| 鉱山 | | 洛 果 丛果倒 | タカノツメ | (0.1M HCI溶出) | | 31:609–615. | | | | |
| 88 - ar 26 - 1- | | | Gamblea innovans | 土壌 mg/kg Cd 7 Zn 76 | 葉: Cd 80 Zn 750 | Takenaka et al. (2009) | | | | |
| 関西地方 鉱山 | 落葉広葉樹 - | タカノツメ | (0.1M HCI溶出) | | Environ Geochem Health 31:609-615. | | | | | |
| | | | | | | | Gamblea innovans | 土壌 mg/kg | 葉: Cd 13-51 Zn 200-300 | |
| 関西地方 | 落葉広葉樹 - | Gamolea innovans | Cd 1.1–1.5 Zn 27–63 | | Sakurai et al. (2019) International Journal of | | | | | |
| 鉱山 | 谷果 丛果倒 | タカノツメ | pH 4 | | Phytoremediation 21: 217–223. | | | | | |
| | | クルノング | (0.1M HCI溶出) | | 21.21, 225. | | | | | |
| 東北地方 | | G. 1: | 土壌 mg/kg | 葉: Al 307–347 Fe 225–293 | | | | | | |
| | 落葉広葉樹 - | Salix reinii | Al 19209–19644 | 茎:Al 322-370 Fe 101-125 | 筑波大学・環境生態化学 研究室と研究機関との共 | | | | | |
| 鉱山たい積場 | 俗果心果 例 | ミヤマヤナギ | Fe 37009-44444 | 地下茎:Al 513-809 Fe 191-277 | 研究室と研究機関との共 同研究データ | | | | | |
| | | ~ 1 7 1 / 7 | pH 5.0-5.2 | 細根:Al 4945-5634 Fe 4118-4589 | | | | | | |

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 | | | | |
|----------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|--|
| | | Pinus densiflora | 土壤 mg/kg | 葉: Fe 58-1484 Cu 6-94 Zn 46-397 | | | | | |
| 東北地方 | 选63.A1 数 344 | r imis densijiora | Fe 135100–197705 | 胚軸: Fe 101 - 776 Cu 17 - 996 Zn 76 - 473 | 筑波大学・環境生態化研究室、企業及び他大 | | | | |
| 鉱山集積場 | 常緑針葉樹 | 77 who 1) to | Cu 8597–12857 | 細根:Fe 3234 - 18760 Cu 623 - 2500 Zn 600-2478 | め 先主、 企業及 い他 人子 との共同研究データ | | | | |
| | | アカマツ | Zn 15281–22818 pH 7.7 | | | | | | |
| | | T 1 1 4 1 | 土壤 mg/kg | 葉:Al 800 Fc 100 Mn 1800 ²³⁸ U 0.13 μg/g 灰化DW | | | | | |
| 中国地方 U鉱山 | 落葉広葉樹 | Toxicodendron trichocarpum | Al 9924 Fe 6163 Mn 40 | 細根:Al 1000 Fe 300 Mn 100 ²³⁸ U 5.7 μg/g 灰化DW | 筑波大学・環境生態化学 研究室と研究機関との共 | | | | |
| 他が出 捨て石たい積場 | 洛果丛果彻 | ヤマウルシ | ²³⁸ U 5 μg/g | | 研究室と研究機関との共 同研究データ | | | | |
| | | 449700 | pH 4.8 | | | | | | |
| | | T 1 1 4.: 1. | 土壤 mg/kg | 葉:Al 300 Fe 400 Mn 1100 | | | | | |
| 関東地方 | 落葉広葉樹 | Toxicodendron trichocarpum | Al 11482 Fe 5983 | 細根:Al 6000 Fe 2000 Mn 200 | | | | | |
| 鉱山周辺国有林 | | ヤマウルシ | Mn 202 Cu 77 Pb 118 | | 研究データ 同研究データ | | | | |
| | | | pH 4.8 | | | | | | |
| | 苏菲宁菲特 | 落葉広葉樹 | | | | Toxicodendron trichocarpum | 土壌 | 葉: ²²⁶ Ra 18 mBq/g | |
| 中国地方 | | | | ²²⁶ Ra 66 mBq/g | 茎: ²²⁶ Ra 27 mBq/g | Shitaka et al. (2002) Journal of Nuclear | | | |
| U鉱山森林地 | 谷米 丛米伽 | ヤマウルシ | | | Science and Technology 39: 958–961. | | | | |
| | | | | | DI 1- | 土壌 mg/kg | 葉: Al 390 Fe 100 Cu 50 Mn ND Zn 350 | | |
| 関東地方 | 水林片 林林 | Rhus chinensis | Zn 82 Cu 604 | 茎:Al 600 Fe 100 Cu 200 Mn ND Zn 250 | 筑波大学・環境生態化学 | | | | |
| 鉱山周辺国有林 | 落葉広葉樹 | ~ , | Mn 135 | 細根:Al 1350 Fe 500 Cu 200 Mn ND Zn 400 | 研究室所蔵データ | | | | |
| | | ヌルデ | pH 5.2 | | | | | | |
| | | | 土壌 | 葉: ²²⁶ Ra 3 mBq/g | | | | | |
| 中国地方 | الما منف مله الما | Acer rufinerve | ²²⁶ Ra 47 mBq/g | 茎: ²²⁶ Ra 7 mBq/g | Shitaka et al. (2002) Journal of Nuclear | | | | |
| U鉱山森林地 | 落葉広葉樹 | ウリハダカエデ | | | Science and Technology 39: 958–961. | | | | |

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 | |
|---------|----------------|-------------------|----------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------|
| | | O | 記載なし | 葉: Mn 350 Zn 28 Co <0.5 Ni 2 Cd 0.1 | Okamoto et al. (1980) | |
| 関東地方 | 龙莱宁秦 烨 | Quercus mongolica | | Fe 42 Cu 12 Pb 0.3 | Research Report from the National Institute for | |
| 鉱山 | 落葉広葉樹 - | ミズナラ | | | Environmental Studies 18: 1-102. | |
| | | o | 土壌 | 葉 ^{:226} Ra 7 mBq/g | | |
| 中国地方 | 落葉広葉樹 - | Quercus mongolica | ²²⁶ Ra 66 mBq/g | 茎: ²²⁶ Ra 10 mBq/g | Shitaka et al. (2002) Journal of Nuclear | |
| U鉱山森林地 | 沿朱丛朱彻 | ミズナラ | | | Science and Technology 39: 958–961. | |
| | | | | 葉: Mn 320 Zn 30 Co <0.5 Ni 2 Cd 0.3 | Okamoto et al. (1980) | |
| 関東地方 | 落葉広葉樹 — | Quercus serrata | | Fe 61 Cu 12 Pb 0.6 | Research Report from the National Institute for | |
| 鉱山 | | 谷朱丛朱彻 | コナラ | | | Environmental Studies 18: 1–102. |
| | ## ## ph | | | 土壌 | 葉: ²²⁶ Ra 7 mBq/g | |
| 中国地方 | | Quercus serrata | ²²⁶ Ra 66 mBq/g | 茎: ²²⁶ Ra 13 mBq/g | Shitaka et al. (2002) Journal of Nuclear | |
| U鉱山森林地 | 落葉広葉樹 - | コナラ | | | Science and Technology 39: 958–961. | |
| | | | 土壌 | 葉: Cu 5–18 Zn 19–40 Pb ND | | |
| 関東地方 | 半 旬 亡本地 | Aucuba japonica | Cu 284–393 | 根: Cu 36–154 Zn 340–1736 Pb 17–863 | Doyama et al. (2021) | |
| 鉱山周辺国有林 | 常緑広葉樹 | ~5* v.ll- | Zn 88.0–216 Pb 382–186 | | PLoS ONE 16(9): e0257690. | |
| | | アオキ | pH 4.7 | | | |
| | | F | 土壌 | 葉:Cu 14-46 Zn 207-290 Pb ND-39 A17607-10109 | | |
| 関東地方 | 常緑広葉樹 | Eurya japonica | Cu 281–650 Zn 82–170 | 枝: Cu 32-97 Zn 292-353 Pb ND-109 A12222-2643 | 筑波大学・環境生態化学 | |
| 鉱山周辺国有林 | 市 秋/4 朱惻 | ヒサカキ | Pb 166-877 | 支持根:Cu 41-177 Zn 170-213 Pb 63-882 A1 1930-2646 | 研究室所蔵データ | |
| | | C y /4 4 | Al 402616-50626 pH 4.2-4.7 | 根:Cu 148-311 Zn 175-238 Pb 148-1265 Al 4084-5487 | | |

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 |
|---------|-------|-------------------|---------------|--------------------------------------|-------------|
| | | Neolitsea sericea | 土壤 mg/kg | 葉: Al 950 Fe 250 Cu ND Mn 800 Zn 400 | |
| 関東地方 | 常緑広葉樹 | | Zn 104 Cu 272 | 茎: Al 800 Fe 250 Cu ND Mn 200 Zn 400 | 筑波大学・環境生態化学 |
| 鉱山周辺国有林 | 市冰少米側 | シロダモ | Mn 198 | 細根:Al 2500 Fe 700 Cu ND Mn 50 Zn 400 | 研究室所蔵データ |
| | | <i>Σ</i> 13.4 | pH 5.2 | | |

表 2-5 シダ植物 (海外の研究報告より作成)

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度 (mg/kg) | 引用文献 | | | | |
|----------------------------|---------|-----------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------|----------|----------|--|
| Pb/Zn 鉱山集積場 (Fankou・中国) | シダ植物 | Pteridium aquilinum var. latiusculum | 土壌 mg/kg | 地上部:Pb 74 Zn 198 Cu 6 Cd 4 | Shu et al. (2005) Restoration Ecology 13 49–60. | | | | |
| | | | Pb 18423 Zn 16745 | 根: Pb 645 Zn 772 Cu 34 Cd 7 | | | | | |
| | | ワラビ | Cu 710 Cd 77 | | | | | | |
| | | | pH 5.5 | | | | | | |
| | | Pteridium aquilinum var. | 土壌 mg/kg | 葉: Pb 9 As 7 Sb 0.1 | | | | | |
| La Petite Faye Au鉱山集積場 | シダ植物 | latiusculum | Pb 2537–9304 | 茎: Pb 57 As 8 Sb 0.1 | Wanat et al. (2014) Environmental Geochem | | | | |
| (フランス) | ング11E40 | ワラビ | As 5465–41900 | 地下茎: Pb 270 As 893 Sb 39 | & Health 36: 783–795. | | | | |
| | | 99E | Sb 103-530 pH 3.8-4.5 | | | | | | |
| Pb, Zn, Cu | シダ植物 | Equisetum ramosisti | 土壌 mg/kg | 地上部 : Zn 307 Pb 324 Cd <5 Cu 34 | Deng et al (2004) Enviromental Pollution 132: 29–40. | | | | |
| 鉱山沈殿池 | | | Zn 4612 Pb 11161 | 根: Zn 1648 Pb 2135 Cd 22 Cu 189 | | | | | |
| (Jin chuantang • | | スギナ | Cd 46 Cu 649 | | | | | | |
| 中国) | | | pH 7.6 | | | | | | |
| | シダ植物 | Pteris vittata ダ植物 モエジマシダ | 土壌 mg/kg | 葉: Mn 2000 Pb 100 Cd 2 | Liu et al. (2006) Pedosphere 16: 131–130 | | | | |
| Xiantan Mn鉱山 鉱さいたいダム | | | Mn 151684 Pb 6005 | 茎: Mn 40 Pb 40 Cd 1 | | | | | |
| がないたい ラム | | | Cd 68 | 根:Mn 2000 Pb 40 Cd 2 | | | | | |
| | | | pH7.45 | | | | | | |
| | シダ植物 | | | | | Thelypteris palustris | 土壌 mg/kg | 葉:As 0-4 | |
| Gilgok Au 鉱山 | | i neighter is pains it is | As 21-3560 | | Min et al. (2021) Sustainability 13: 342 | | | | |
| (韓国) | | 15. 25. 25 | pH 7.0-8.7 | | | | | | |
| | | ヒメシダ | | | | | | | |
| Gilgok Au 鉱山 (韓国) | シダ植物 | | The Land and the Land | 土壌 mg/kg | 葉: As 0-8 | | | | |
| | | Thelypteris palustris | As 55-1378 | | Min et al. (2021) | | | | |
| | | | レインが | pH 6.6-7.3 | | Sustainability 13: 3421 | | | |
| | | ヒメシダ | | | | | | | |

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度 (mg/kg) | 引用文献 | |
|----------------------------------------------------|------|-------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Baoshan鉱山 鉱さいたいダム (Pb, Zn, Ag) | シダ植物 | Equisetum ramosissimum | 土壤 mg/kg | 地上部: As 7 Cd 5 Pb 90 Zn 152 | Pan et al. (2019) Environmental Science and Pollution Research 26: 23583–23592. | |
| | | | As 2050 Cd 47 | 根: As 20 Cd 7 Pb 192 Zn 224 | | |
| | | イヌドクサ | Pb 12527 Zn 5999 | | | |
| (湖南省・中国) | | | pH 6.9 | | | |
| Baoshan鉱山 鉱さいたいダム (Pb, Zn, Ag) | シダ植物 | Pteris ensiformis | 土壌 mg/kg | 地上部:As 1091 Cd 63 Pb 1347 Zn 296 | Pan et al. (2019) Environmental Science and Pollution Research 26: 23583–23592. | |
| | | | As 931 Cd 395 | 根: As 1047 Cd 11 Pb 114 Zn 118 | | |
| | | ホコシダ | Pb 14054 Zn 6577 | | | |
| (湖南省・中国) | | | pH 7.2 | | | |
| Baoshan鉱山 | シダ植物 | | Woodwardia japonica | 土壌 mg/kg | 地上部:As 62 Cd 9 Pb 436 Zn 257 | Pan et al. (2019) |
| 鉱さいたいダム (Pb, Zn, Ag) (湖南省・中国) | | 77 Oour ar asa Japonisa | As 2050 Cd 47 | 根: As 9 Cd 3 Pb 77 Zn 143 | Environmental Science and Pollution Research 26: 23583–23592. | |
| | | オオカグマ | Pb 12527 Zn 5999 | | | |
| | | | pH 6.9 | | | |
| Baiut 鉱山 Lapus川 (ルーマニア) | シダ植物 | Equisetum fluviatile | 堆積物 mg/kg | 植物体全体: Cd 43 Ni 296 Pb 27 | Popa et al. (2019) Studi UBB Chemia LXIV, 2, | |
| | | | Cd 1.6 Ni 19 | | | |
| | | | ミズドクサ | Pb 43 | | Tom II, 457–469. |

表 2-6 草本類 (海外の研究報告より作成)

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 |
|-------------------------------------------|-------|------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Pb/Zn 鉱山 集積場 (Huangshaping ・ 中国) | 1年生草本 | Setaria viridis | 土壌 mg/kg | 地上部:Pb 277 Zn 250 Cu 19 Cd 1 | Shu et al. (2005) Restoration Ecology 13 49–60. |
| | | | Pb 11558 Zn 10011 | 根: Pb 444 Zn 415 Cu 32 Cd 0.9 | |
| | | エノコログサ | Cu 204 Cd 134 | | |
| | | | pH 7.7 | | |
| Pb/Zn 鉱山 | | Setaria viridis | 土壌 mg/kg | 地上部:Pb 272 Zn 489 Cu 48 Cd 4 | |
| 集積場 | 1年生草本 | | Pb 2462 Zn 1794 | 根: Pb 655 Zn 853 Cu 87 Cd 7 | Shu et al. (2005) |
| (Shuikoushan· 中国) | 1午生早本 | アノコロガル | Cu 106 Cd 21 | | Restoration Ecology 13 49–60. |
| 中国) | | エノコログサ | рН 7.6 | | |
| | 1年生草本 | Catania simidia | 土壌 mg/kg | 地上部: Pb 188 Zn 531 Cu 32 Cd 6 | Shu et al. (2005) Restoration Ecology 13 49–60. |
| Pb/Zn 鉱山 集積場 | | Setaria viridis | Pb 1120 Zn 833 | 根: Pb 254 Zn 741 Cu 51 Cd 9 | |
| 来復物 (Taoling・中国) | | エノコログサ | Cu 197 Cd 5 | | |
| | | | pH 8.2 | | |
| Pingle Mn鉱山 | 1年生草本 | Setaria viridis 1年生草本 エノコログサ | 土壌 mg/kg | 葉: Mn 1191 Cd 11 Pb 189 Zn 71 Cu 27 | Liu et al. (2020) Environmental Science and Pollution Research 27: 19933–19945. |
| 鉱さいたいダム | | | Mn 8363 Cd 12 | 茎: Mn 351 Cd 10 Pb 179 Zn 54 Cu 27 | |
| (広西チワン族自治 区・中国) | | | Pb 164 Zn 287 Cu 136 | 根: Mn 658 Cd 25 Pb 537 Zn 199 Cu 101 | |
| 区 不图) | | | pH 5.0 | | |
| Pb/Zn 鉱山 | 1年生草本 | Eleusine indica | 土壌 mg/kg | 地上部:Pb 136 Zn 446 Cu 28 Cd 1 | Shu et al. (2005) Restoration Ecology 12 49–60. |
| 集積場 | | | Pb 11558 Zn 10011 | 根: Pb 287 Zn 550 Cu 15 Cd 1 | |
| (Huangshaping · 中国) | | オヒシバ | Cu 204 Cd 134 | | |
| | | | pH 7.7 | | |
| Pb/Zn 鉱山 集積場 (Shuikoushan・ 中国) | 1年生草本 | Eleusine indica | 土壌 mg/kg | 地上部: Pb 154 Zn 431 Cu 34 Cd 5 | Shu et al. (2005) Restoration Ecology 13 |
| | | | Pb 2462 Zn 1794 | 根: Pb 212 Zn 816 Cu 62 Cd 9 | |
| | | オヒシバ | Cu 106 Cd 21 | | 49–60. |
| | | | A L 2/1 | рН 7.6 | |

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 | | |
|----------------------------------------------|-------|-----------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------|
| 非鉄金属製鍊所 跡地(中国) | 1年生草本 | Eleusine indica | 土壌 mg/kg | 葉: As 34 Cd 16 Pb 1065 Zn 2471 | | | |
| | | | As 150 Pb 5800 | 根:As 22 Cd 44 Pb 910 Zn 2021 | Sun et al. (2016) Ecological Engineering 86: 60–68. | | |
| | | オヒシバ | Cd 105 Zn 16000 | | | | |
| | | | pH 6.5 | | | | |
| m to Abil. | | Eleusine indica | 土壌 mg/kg | 葉:Mn 2342 Cd 12 Pb 107 Zn 97 Cu 46 | | | |
| Pingle Mn鉱山 鉱さいたいダム | 1年生草本 | Eleusine inaica | Mn 8363 Cd 12 | 茎: Mn 1388 Cd 11 Pb 45 Zn 63 Cu 49 | Liu et al. (2020) Environmental Science | | |
| (広西チワン族自治 区・中国) | 1年生早本 | オヒシバ | Pb 164 Zn 287 Cu 136 | 根: Mn 887 Cd 11 Pb 452 Zn 76 Cu 48 | and Pollution Research 27: 19933–19945. | | |
| | | | pH 5.0 | | | | |
| Pingle Mn鉱山 | 1年生草本 | El marios o im din a | 土壌 mg/kg | 地上部:As 64 Cd 76 Pb 2798 Zn 1133 | Pan et al. (2019) Environmental Science and Pollution Researce 26: 23583–23592. | | |
| 鉱さいたいダム | | Eleusine indica | As 2050 Cd 47 | 根: As 143 Cd 48 Pb 7474 Zn 34 | | | |
| (広西チワン族自治 区・中国) | | オヒシバ | Pb 12527 Zn 5999 | | | | |
| | | | pH 6.9 | | | | |
| Pingle Mn鉱山 | 1年生草本 | Digitaria violascens 1年生草本 アキメヒシバ | 土壌 mg/kg | 葉: Mn 1301 Cd 8 Pb 4 Zn 0.2 Cu 16 | Liu et al. (2020) Environmental Science and Pollution Research 27: 19933–19945. | | |
| 鉱さいたいダム | | | Mn 8363 Cd 12 | 茎: Mn 1117 Cd 9 Pb 39 Zn 0.4 Cu 18 | | | |
| (広西チワン族自治 区・中国) | | | Pb 164 Zn 287 Cu 136 | 根: Mn 434 Cd 9 Pb 33 Zn 0.2 Cu 18 | | | |
| | | | pH 5.0 | | | | |
| Pingle Mn鉱山 | 1年生草本 | | | 44 | 土壌 mg/kg | 葉: Mn 827 Cd 12 Pb 456 Zn 94 Cu 63 | 1 (0000) |
| 鉱さいたいダム | | Ageratum conyzoides | Mn 8363 Cd 12 | 茎: Mn 1254 Cd 26 Pb 400 Zn 80 Cu 50 | Liu et al. (2020) Environmental Scienc and Pollution Researc 27: 19933–19945. | | |
| (広西チワン族自治 区・中国) | | カッコウアザミ | Pb 164 Zn 287 Cu 136 | 根: Mn 375 Cd 10 Pb 338 Zn 39 Cu 38 | | | |
| | | | pH 5.0 | | | | |
| Pingle Mn鉱山 鉱さいたいダム (広西チワン族自治 区・中国) | 1年生草木 | | 土壌 mg/kg | 葉:Mn 446 Cd 13 Pb 651 Zn 129 Cu 58 | | | |
| | | | Mn 8363 Cd 12 | 茎: Mn 181 Cd 6 Pb 232 Zn 61 Cu 30 | Liu et al. (2020) Environmental Science | | |
| | | | Pb 164 Zn 287 Cu 136 | 根: Mn 91 Cd 6 Pb 227 Zn 58 Cu 28 | and Pollution Researce 27: 19933–19945. | | |
| | | ホオキギク | 小々 ヤイ ク | pH 5.0 | | 27. 17733 17743. | |

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 |
|----------------------------------------------|------------------|------------------------|----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Pingle Mn鉱山 鉱さいたいダム (広西チワン族自治 区・中国) | 1年生草本 | Echinochloa crus-galli | 土壌 mg/kg | 葉:Mn 2805 Cd 10 Pb 581 Zn 103 Cu 30 | Liu et al. (2020) Environmental Science and Pollution Researce 27: 19933–19945. |
| | | | Mn 8363 Cd 12 | 茎: Mn 578 Cd 11 Pb 532 Zn 133 Cu 41 | |
| | | イヌビエ | Pb 164 Zn 287 Cu 136 | 根: Mn 165 Cd 7 Pb 473 Zn 53 Cu 60 | |
| | | | pH 5.0 | | 27. 19933 19943. |
| | | Pharbitis nil | 土壌 mg/kg | 葉: As 7 Cd 2 Pb 173 Zn 968 | |
| 非鉄金属製錬所 | 1年生世士 | | As 1200 Pb 3000 | 根: As 9 Cd 3 Pb 146 Zn 635 | Sun et al. (2016) |
| 跡地(中国) | 1年生草本 | アサガオ | Cd 30 Zn 1200 | | Ecological Engineerin 86: 60–68. |
| | | | рН 7.5 | | |
| | | Calustonia hadanaaa | 土壌 mg/kg | 葉: As 27 Cd 9 Pb 1031 Zn 3173 | |
| 非鉄金属製錬所 | 1年生草本 | Calystegia hederacea | As 1200 Pb 3000 | 根: As 21 Cd 6 Pb 690 Zn 1235 | Sun et al. (2016) Ecological Engineeri 86: 60–68. |
| 跡地(中国) | | コヒルガオ | Cd 30 Zn 1200 | | |
| | | | рН 7.5 | | |
| | 1年生もしく は多年生草本 | | 土壌 mg/kg | 葉: As 20 Cd 33 Pb 686 Zn 1690 | Sun et al. (2016) Ecological Engineerin 86: 60–68. |
| 非鉄金属製錬所 | | | As 1200 Pb 3000 | 根: As 20 Cd 23 Pb 1394 Zn 1387 | |
| 跡地(中国) | | | Cd 30 Zn 1200 | | |
| | | | pH 7.5 | | |
| | 1年生草本 | Chenopodium album | 土壌 mg/kg | 葉: As 3 Cd 10 Pb 67 Zn 1219 | Sun et al. (2016) Ecological Engineeri 86: 60–68. |
| 非鉄金属製錬所 | | | As 1200 Pb 3000 | 根: As 7 Cd 5 Pb 218 Zn 600 | |
| 跡地(中国) | | シロザ | Cd 30 Zn 1200 | | |
| | | | pH 7.5 | | |
| 非鉄金属製鍊所 跡地(中国) | 1年生草木 - | Solanum nigrum | 土壌 mg/kg | 葉: As 6 Cd 56 Pb 335 Zn 1036 | Sun et al. (2016) Ecological Engineerir |
| | | | As 150 Pb 5800 | 根: As 47 Cd 53 Pb 1854 Zn 2291 | |
| | | イヌホオズキ | Cd 105 Zn 16000 | | 86: 60–68. |
| | | | pH 6.5 | | |

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 |
|------------------------------|-----------|-------------------------|------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| | | C1-1: | 土壤 mg/kg | 葉:Mn 5000 Pb 75 Cd 4 | |
| Xiantan Mn鉱山 鉱さいたいダム | 1/5 件 共士 | Gnaphalium affine | Mn 151684 | 茎: Mn 2500 Pb 40 Cd 4 | Liu et al. (2006) |
| 郷さいたいタム | 1年生草本 | & 1L | Pb 6005 Cd 68 | 根: Mn 500 Pb 120 Cd 4 | Pedosphere 16: 131-13 |
| | | ハハコグサ | рН 7.5 | | |
| | | G H 1 | 土壤 mg/kg pH 6.9-7.7 As 43-83 | 地上部:As 6 Cd 4 Cu 49 Ni 4 Pb 734 Zn 667 Sb 56 | |
| Oued el Heimer– Touissite | 1 左 仏 北 十 | Capsella bursa-pastoris | Cd 15-36 Cu 328-1405 | 根:As 4 Cd 4 Cu 66 Ni 4 Pb 850 Zn 587 Sb 27 | Hasnaoui et al. (2020) |
| Pb/Zn鉱山地域 (モロッコ北西部) | 1年生草本 | ナズナ | Ni 9-16 Pb 6445-18324 | | Plants 9: 1458. |
| (CD) = 40 pm) | | ラ スラ | Zn 2096-5387 Sb 97-243 | | |
| 0.1111. | | n · . | 土壌 mg/kg pH 6.9-7.7 As 43-83 | 地上部:As 0.3 Cd 2 Cu 10 Ni 0.5 Pb 47 | |
| Oued el Heimer- Touissite | 1/5 件 孝士 | Rapistrum rugosum | Cd 15-36 Cu 328-1405 | Zn 327 Sb 0.5 | Hasnaoui et al. (2020) |
| Pb/Zn鉱山地域 (モロッコ北西部) | 1年生草本 | o de de mo. | Ni 9-16 Pb 6445-18324 | 根: As 1 Cd 2 Cu 14 Ni 1 Pb 455 | Plants 9: 1458. |
| (TD) SALMIN | | ミヤガラシ | Zn 2096-5387 Sb 97-243 | Zn 240 Sb 2 | |
| | | Portulaca oleracea | 土壌 mg/kg | 地上部:Cu 44 Zn 118 Pb 33 Cd 10 | |
| Bir Nehass Zn鉱山 (モロッコ南中央 | 1年生草本 | r ornu aca oteracea | Cu 2201 Zn 21498 | 根: Cu 26 Zn 108 Pb 27 Cd 16 | Midhat et al. (2019) Ecotoxicology and |
| 部) | 1年生早本 | スベリヒユ | Pb 6157 Cd 52 | | Environmental Safety 169: 150–160. |
| | | スペッとユ | pH 2.7 | | 103.130 100. |
| | | II 1 - · | 土壌 mg/kg | 葉: As 20 Cd 33 Pb 686 Zn 1690 | |
| 非鉄金属製錬所 | 1年生もしく | Humulus japonicus | As 1200 Pb 3000 | 根: As 20 Cd 23 Pb 1394 Zn 1387 | Sun et al. (2016) Ecological Engineering |
| 跡地(中国) | は多年生草本 | カナムグラ | Cd 30 Zn 1200 | | 86: 60–68. |
| | | A J A J J | рН 7.5 | | |
| Baoshan錠山 | | Sauran | 土壌 mg/kg | 地上部:As 195 Cd 96 Pb 1255 Zn 639 | D 1 (22:2) |
| 製鍊所周辺 | 9年上古士 | Saussurea japonica | As 931 Cd 395 | 根: As 14 Cd 157 Pb 602 Zn 408 | Pan et al. (2019) Environmental Science |
| (Pb, Zn, Ag etc) (湖南省・中国) | | ヒナヒゴタイ | Pb 14054 Zn 6577 | | and Pollution Research 26: 23583–23592. |
| (明用)有"牛'图) | | レノレコグイ | pH 7.2 | | |

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 |
|--------------------------|-------|------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------|
| 73° 1 3 6 6° 1. | | Miscanthus floridulus | 土壌 mg/kg | 葉: Mn 473 Cd 5 Pb 142 Zn 42 Cu 30 | |
| Pingle Mn鉱山 鉱さいたいダム | 多年生草本 | Miscarunus Jioriau us | Mn 8363 Cd 12 | 茎: Mn 564 Cd 6 Pb 136 Zn 62 Cu 40 | Liu et al. (2020) Environmental Science |
| (広西チワン族自治 区・中国) | 多年生早本 | トキワススキ | Pb 164 Zn 287 Cu 136 | 根: Mn 433 Cd 5 Pb 126 Zn 157 Cu 41 | and Pollution Research 27: 19933–19945. |
| 区•中国) | | トイリススイ | pH 5.0 | | 27. 1333 13343. |
| Pingle Mn鉱山 | | Paspalum orbiculare | 土壌 mg/kg | 葉: Mn 726 Cd 4 Pb 52 Zn 54 Cu 21 | 1. (2020) |
| Mingle Min級山 鉱さいたいダム | 多年生草本 | Pasparum oroicutare | Mn 8363 Cd 12 | 茎: Mn 622 Cd 7 Pb 136 Zn 120 Cu 30 | Liu et al. (2020) Environmental Science |
| (広西チワン族自治 多年生草ス 区・中国) | | スズメノコビエ | Pb 164 Zn 287 Cu 136 | 根: Mn 306 Cd 6 Pb 201 Zn 103 Cu 72 | and Pollution Research 27: 19933–19945. |
| 区 - 中国) | | XXX/3ET | pH 5.0 | | 27. 13333 13313. |
| re1_br_At () | | F | 土壌 mg/kg | 葉: Mn 1422 Cd 21 Pb 280 Zn 148 Cu 73 | |
| Pingle Mn鉱山 鉱さいたいダム | 多年生草本 | Eragrostis bulbillifera | Mn 8363 Cd 12 | 茎: Mn 853 Cd 26 Pb 293 Zn 345 Cu 82 | Liu et al. (2020) Environmental Science |
| (広西チワン族自治 区・中国) | 多平生早平 | イトスズメガヤ | Pb 164 Zn 287 Cu 136 | 根: Mn 1171 Cd 49 Pb 875 Zn 542 Cu 188 | and Pollution Research 27: 19933–19945. |
| 区 - 下国) | | 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 | pH 5.0 | | 27.13365 133161 |
| Pingle Mn鉱山 | | Elephantopus scaber | 土壌 mg/kg | 葉:未分析 | 1 1 (2020) |
| 新さいたいダム | 多年生草本 | Erepnaniopus scaver | Mn 8363 Cd 12 | 茎: Mn 1152 Cd 5 Pb 150 Zn 105 Cu 26 | Liu et al. (2020) Environmental Science |
| (広西チワン族自治 区・中国) | 多十生早平 | ミスミグサ | Pb 164 Zn 287 Cu 136 | 根: Mn 107 Cd 10 Pb 629 Zn 85 Cu 38 | and Pollution Research 27: 19933–19945. |
| 区 - 中国) | | \$\lambda \cdot \dot \dot \dot \dot \dot \dot \dot \ | pH 5.0 | | 2,7,1,7,0,0 |
| | | Phytolacca acinosa | 土壌 mg/kg | 葉: Mn 2369 Pb 41 Cd 2 | |
| Xiantan Mn鉱山 鉱さいたいダム | 多年生草本 | F nyioiacca acinosa | Mn 151684 | 茎: Mn 1575 Pb 32 Cd 1 | Liu et al. (2006) |
| (海南区・中国) | 多十生早平 | ヤマゴボウ | Pb 6005 Cd 68 | 根: Mn 717 Pb 14 Cd 1 | Pedosphere 16: 131–136 |
| | | (4 2 1/1) | pH 7.5 | | |
| | | Imperata cylindrica var. major | 土壌 mg/kg | 地上部: Pb 445 Zn 996 Cu 19 Cd 16 | |
| Pb/Zn 鉱山 集積場 | 多年生草本 | imperata cytinarica var. major | Pb 18423 Zn 16745 | 根: Pb 1303 Zn 1483 Cu 126 Cd 12 | Shu et al. (2005) Restoration Ecology 13: |
| (Fankou, 中国) | 罗十工早平 | チガヤ | Cu 710 Cd 77 | | 49–60. |
| | | 7 % 1 | pH 5.5 | | |

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 |
|----------------------------------|---------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|
| The second second | | Miscanthus floridulus | 土壌 mg/kg | 葉: Mn 473 Cd 5 Pb 142 Zn 42 Cu 30 | |
| Pingle Mn鉱山 鉱さいたいダム | 多年生草本 | wiscarunus jioriau us | Mn 8363 Cd 12 | 茎: Mn 564 Cd 6 Pb 136 Zn 62 Cu 40 | Liu et al. (2020) Environmental Science |
| (広西チワン族自治 区・中国) | 多年生早本 | トキワススキ | Pb 164 Zn 287 Cu 136 | 根: Mn 433 Cd 5 Pb 126 Zn 157 Cu 41 | and Pollution Research 27: 19933–19945. |
| 区 - 平国) | | トインハスイ | pH 5.0 | | 27. 13333 13313. |
| | | Miscanthus sinensis | 土壌 mg/kg | 地上部: Pb 103 Zn 343 Cu 21 Cd 2 | |
| Pb/Zn 鉱山 集積場 | 多年生草本 | Miscanimis sinensis | Pb 11558 Zn 10011 | 根: Pb 796 Zn 960 Cu 86 Cd 3 | Shu et al. (2005) Restoration Ecology 13 |
| (Huangshaping, 中国) | 多平生早平 | ススキ | Cu 204 Cd 134 | | 49–60. |
| | | <i>///</i> | рН 7.7 | | |
| | | Kalimeris indica | 土壌 mg/kg | 葉:As 14 Cd 27 Pb 1060 Zn 1704 | Sun et al. (2016) Ecological Engineering |
| 卡鉄金属製錬所 多年生草本 | | Kanmeris inaica | As 150 Pb 5800 | 根: As 6 Cd 12 Pb 466 Zn 520 | 86: 60–68. |
| 跡地 (中国) | 多十生早平 | コヨナメ | Cd 105 Zn 16000 | | |
| | | 43/7 | pH 6.5 | | |
| | | Metaplexis japonica | 土壌 mg/kg | 葉:As 47 Cd 18 Pb 3967 Zn 5508 | Sun et al. (2016) Ecological Engineering |
| 非鉄金属製錬所 | 多年生草本 | <i>же</i> аргехіз зароніса | As 150 Pb 5800 | 根: As 31 Cd 40 Pb 2772 Zn 4139 | 86: 60–68. |
| 跡地 (中国) | 多十工早平 | ガガイモ | Cd 105 Zn 16000 | | |
| | | »»ነባ ጚ | pH 6.5 | | |
| | | Urtica dioica | 土壌 mg/kg | 葉: Pb 328 Cu 110 Cd 4 Ni 61 Fe 1436 | |
| Kishnica 鉱山 (Hajvali-Kishnica | 多年生草本 | Ortica aioica | Pb 3107 Cu 14 Cd 4 | 茎: Pb 17 Cu 31 Cd 1 Ni 10 Fe 376 | Bislimi et al. (2021) Journal of Ecological |
| (Hajvaii-Kishiiica ・コソボ共和国) | 多十生早平 | イラクサ | Ni 277 Fe 6010 | 根: Pb 108 Cu 67 Cd 1 Ni 23 Fe 1072 | Engineering 22: 1–7. |
| | | 4729 | pH 5以上 (考察から推測) | | |
| O | | Lotus corniculatus | 土壤 mg/kg pH 6.9-7.7 As 43-83 | 地上部:As 3 Cd 2 Cu 40 Ni 3 Pb 832 | |
| Oued el Heimer— Touissite | 多年生草本 | Loius corniculatus | Cd 15-36 Cu 328-1405 | Zn 171 Sb 15 | Hasnaoui et al. (2020) |
| Pb/Zn鉱山地域 (モロッコ北西部) | 夕十工早 个 | ミヤコグサ | Ni 9–16 Pb 6445–18324 | 根: As 5 Cd 3 Cu 117 Ni 4 Pb 1493 | Plants 9: 1458. |
| (>ILEIEN | | ミアコグリ | Zn 2096–5387 Sb 97–243 | Zn 277 Sb 27 | |

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 |
|--------------------------|---------------|--------------------------------|------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|
| an a Atrili | | 4 | 土壤 mg/kg | 地上部:As 87 Cd 54 Pb 539 Zn 444 | |
| Baoshan鉱山 製錬所周辺 | 多年生草本 | Artemisia japonica | As 931 Cd 395 | 根: As 11 Cd 7 Pb 159 Zn 147 | Pan et al. (2019) Environmental Science |
| (Pb, Zn, Ag) (湖南省・中国) | 多年生早年 | オトコヨモギ | Pb 14054 Zn 6577 | | and Pollution Research 26: 23583–23592. |
| (例用有"平国) | | オトココモヤ | pH 7.2 | | 20. 23303 23372. |
| Baoshan鉱山 | | Boehmeria nivea | 土壤 mg/kg | 地上部:As 701 Cd 490 Pb 4462 Zn 992 | Dt -1 (2010) |
| 製鍊所周辺 | 多年生草本 | Boenmeria nivea | As 931 Cd 395 | 根: As 14 Cd 5 Pb 112 Zn 28 | Pan et al. (2019) Environmental Science |
| (Pb, Zn, Ag) (湖南省・中国) | 多十工早平 | ナンバンカラムシ | Pb 14054 Zn 6577 | | and Pollution Research 26: 23583-23592. |
| (明田) (四) | | 70/10/20 | pH 7.2 | | |
| Baoshan鉱山 | | Chrysanthemum indicum | 土壤 mg/kg | 地上部:As 178-251 Cd 9-128 Pb 216-1442 | D (1 (2010) |
| 製鍊所周辺 | 全 在出古士 | Crir ysantnemum triatcum | As 931 Cd 395 | Zn 154-528 | Pan et al. (2019) Environmental Science |
| (Pb, Zn, Ag) 湖南省・中国) | | シマカンギク | Pb 14054 Zn 6577 | 根:As 8-105 Cd 3-99 Pb 112-615 Zn 60-329 | and Pollution Research 26: 23583–23592. |
| | | J 1 2 4 9 | pH 7.2 | | |
| Baoshan鉱山 | | Chrysanthemum indicum | 土壤 mg/kg | 地上部: As 36 Cd 9 Pb 216 Zn 124 | Dt -1 (2010) |
| 鉱さいたいダム | 多年生草本 | Cm ysantnemum intilcum | As 2050 Cd 47 | 根: As 9 Cd 0.4 Pb 49 Zn 59 | Pan et al. (2019) Environmental Science |
| (Pb, Zn, Ag) (湖南省・中国) | 多十工手不 | シマカンギク | Pb 12527 Zn 5999 | | and Pollution Research 26: 23583–23592. |
| | | J 1 2 4 9 | рН 6.9 | | |
| Baoshan鉱山 | | Dianthus superbus | 土壤 mg/kg | 地上部:As 68 Cd 47 Pb 719 Zn 374 | D (1 (2010) |
| 鉱さいたいダム | 多年生草本 | Dianinus superous | As 2050 Cd 47 | 根: As 26 Cd 37 Pb 406 Zn 242 | Pan et al. (2019) Environmental Science |
| (Pb, Zn, Ag) (湖南省・中国) | タヤエチル | エゾカワラナデシコ | Pb 12527 Zn 5999 | | and Pollution Research 26: 23583–23592. |
| (例用名・中国) | | <i>47,877,777</i> | рН 6.9 | | |
| Baoshan鉱山 | | Hydrocotyle sibthorpioides | 土壤 mg/kg | 地上部:As 341 Cd 129 Pb 2328 Zn 477 | Dt -1 (2010) |
| 製鍊所周辺 | 多年生草本 | 11 yai ocoiyie sivinoi piotaes | As 931 Cd 395 | 根: As 49 Cd 19 Pb 436 Zn 106 | Pan et al. (2019) Environmental Science |
| (Pb, Zn, Ag) (湖南省・中国) | タイエ早代 | チドメグサ | Pb 14054 Zn 6577 | | and Pollution Research 26: 23583–23592. |
| | |) rry | pH 7.2 | | |

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 |
|--------------------------|-------|-------------------------|------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------|
| | | Rumex acetosa | 土壤 mg/kg | 地上部:As 429 Cd 215 Pb 2112 Zn 2506 | |
| Baoshan鉱山 製錬所周辺 | 力压业出去 | Rumex aceiosa | As 931 Cd 395 | 根:As 10 Cd 52 Pb 226 Zn 394 | Pan et al. (2019) Environmental Science |
| (Pb, Zn, Ag) (湖南省・中国) | 多年生草本 | 713 | Pb 14054 Zn 6577 | | and Pollution Research 26: 23583–23592. |
| (例用有"中国) | | スイバ | pH 7.2 | | 20. 25505 25572. |
| Baoshan鉱山 | | Ci1#i1i- | 土壤 mg/kg | 地上部:As 174 Cd 41 Pb 896 Zn 345 | D (1 (2010) |
| 製鍊所周辺 | 多年生草本 | Sanguisorba officinalis | As 931 Cd 395 | 根: As 19 Cd 23 Pb 247 Zn 227 | Pan et al. (2019) Environmental Science |
| (Pb, Zn, Ag) (湖南省・中国) | 多十生早平 | ワレモコウ | Pb 14054 Zn 6577 | | and Pollution Research 26: 23583-23592. |
| 例用: 下图/ | | クレモコリ | pH 7.2 | | 20.2000 20072 |
| Baoshan鉱山 | | Valeriana officinalis | 土壤 mg/kg | 地上部:As 308 Cd 82 Pb 1589 Zn 386 | D (2010) |
| 製錬所周辺 | 多年生草本 | vaieriana ojjicinaiis | As 931 Cd 395 | 根: As 16 Cd 8 Pb 236 Zn 103 | Pan et al. (2019) Environmental Science |
| (Pb, Zn, Ag) (湖南省・中国) | 多十生早平 | セイヨウカノコソウ | Pb 14054 Zn 6577 | | and Pollution Research 26: 23583-23592. |
| | | 64 3 9 8 7 3 7 9 | рН 7.2 | | |
| | | Macleaya cordata | 土壤 mg/kg | 地上部:Mo 704 根399 | W |
| Mo 鉱山 鉱さいたいダム | 多年生草本 | тикленуя соғана | Mo 340 Zn 254 | | Wang et al. (2018) Environmental Science |
| (河南省・中国) | 多十工千个 | タケニグサ | Cd 1 Pb 27 Ni 27 | | and Pollution Research 25:26493-26503. |
| | | 99499 | pH 7.6 | | |
| | | .huncus effusus | 土壤 mg/kg | 地上部:As 13 Cd 4 Cr 2 Cu 23 Hg 0.08 | D 4 1 (2018) |
| Zn精錬所周辺 | 多年生草本 | surkus egjusus | As 587 Cd 32 Cr 121 | Pb 211 Zn 1121 | Peng et al. (2018) Ecotoxicology and |
| (貴州省・中国) | 多十生早平 | イグサ | Cu 531 Hg 1215 Pb 6041 | 根: As 49 Cd 15 Cr 5 Cu 41 Hg 0.23 | Environmental Safety 152: 2018) 24–32. |
| | | 1/9 | Zn 22749 pH 6.1 | Pb 862 Zn 1686 | |
| | | Juncus effusus | 堆積物 mg/kg | 植物全体:Cd 135 Ni 1069 Pb 36 | |
| aiut 鉱山 Lapus川 | 多年生草本 | suncus ejjusus | Cd 3 Ni 48 Pb 618 | | Popa et al. (2019) Studi UBB Chemia LXIV, 2, |
| (ルーマニア) | 多十二早平 | イグサ | | | Tom II, 457–469. |

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 |
|-------------------------|------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------|
| | | 14 | 堆積物 mg/kg | 植物全体:Cd 72 Ni 1366 Pb 124 | |
| Baiut 鉱山 Lapus川 | 多年生草本 | Myosoton aquaticum | Cd 2 Ni 19 Pb 43 | | Popa et al. (2019) Studia UBB Chemia LXIV, 2, |
| (ルーマニア) | 多年生早本 | ウシハコベ | | | Tom II, 457–469. |
| | | C11:- | 堆積物 mg/kg | 植物全体:Cd 242 Ni 1865 Pb 27 | |
| Baiut 鉱山 Lapus川 | 多年生草本 | Carex humilis | Cd 2 Ni 51 Pb 652 | | Popa et al. (2019) Studia UBB Chemia LXIV, 2, |
| (ルーマニア) | 多年生早本 | ホソバヒカゲスゲ | | | Tom II, 457–469. |
| | | | 土壤 mg/kg | 地上部: Pb 351 Zn 689 Cu 22 | |
| Lechang Pb/Zn 鉱山 | 友 压 北 世 上 | Cynodon dactylon | Pb 2785 Zn 3562 | 根: Pb 645 Zn 1015 Cu 46 | Shu et al. (2002) |
| (広東省・中国) | 多年生草本 | ادر و مدر باشد | Cu 198 | | Environmental Pollution 120: 445–453. |
| | | ギョウギシバ | pH 6.1 | | |
| | | Verbena bonariensis | 土壌 mg/kg | 地上部: Fe 993 Cu 43 Zn 15 Mn 113 Ni 6 | 15 (2020) |
| Camaquã Cu鉱山 鉱さいたいダム | 多年生草本 | v erbena bonariensis | Fe 未測定 Cu 260 Zn 0.9 | 根: Fe 852 Cu 73 Zn 23 Mn 40 Ni 10 | Afonso et al. (2020) Journal of Environmental |
| (ブラジル南部) | 多十生早平 | ヤナギハナガサ | Mn 11 Ni 9 | | Management 256: 109953. |
| | | ()4/1/29 | рН 6.2 | | |
| Draa Lasfar Cu, Zn, | | Arundo donax | 土壌 mg/kg | 地上部:Cu 24 Zn 20 Pb 0.3 Cd 0.2 | N. T. H. (2010) |
| Pb 鉱山 | 多年生草本 | Aranao aonax | Cu 1191 Zn 1085 | 根: Cu 30 Zn 18 Pb 0 Cd 0.1 | Midhat et al. (2019) Ecotoxicology and |
| (モロッコ南中央 部) | 多十生早平 | ダンチク | Pb 1078 Cd 156 | | Environmental Safety 169: 150–160. |
| ਜ ਼) | | 7477 | рН 3.6 | | |
| Ag, Cu, Pb鉱山 | | Polygonum thunbergii | 土壌 mg/kg | 葉:Cd ND Pb 14-25 Cu 22-37 Zn 165-502 | |
| 下流域 | 1年生草本 | 1 orygonum mumbergu | CdND Pb 4-18 | 茎:Cd ND-7 Pb 4-26 Cu 8-98 Zn 51-444 | Kim et al. (2003) Environmental Pollution |
| (Duckon鉱山・ 韓国) | 水生植物 | ミゾソバ | Cu 4–8 Zn 13–25 | 根:Cu ND-10 Pb 76-270 Cu 271-785 | 126: 235–243. |
| 平年1237 | | \ ///·· | | Zn 440–1866 | |

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 | | |
|------------------------|-------|----------------------|------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|--|--|
| | | Tumbon Latifalia | 堆積物 mg/kg | 葉: Zn 122 Pb 40 Cd 0.6 | | | |
| Pb/Zn 鉱山 | 多年生草本 | Typha latifolia | Zn 3009 Pb 5686 | 地下茎: Zn 456 Pb 354 Cd 1.6 | Ye et al.(1997) New Phytologist 136: 469 | | |
| (Shaoguan· 中国) 水生植物 | | ガマ | Cd 20 | 根: Zn 946 Pb 1108 Cd 1.5 | 480. | | |
| | | nı | 堆積物 mg/kg | 葉: Pb 4 Zn 68 Cu 6 Cd 1 | | | |
| Cu, Zn, Pb, Au鉱山鉱 | 多年生草本 | Phragmites australis | Pb 2040 Zn 14500 | 根: Pb 523 Zn 1310 Cu 80 Cd 5 | Stoltz and Greger (2002 Environmental and | | |
| さいたい積場 水生植物 (スウェーデン) | | ョシ | Cd 52 Cu 1420 | | Experimental Botany 47: 271–280. | | |
| | | 3 <i>y</i> | рН 6.4 | | 1,12,12001 | | |
| Oued el Heimer- | | Dl. | 土壤 mg/kg pH 6.9-7.7 As 43-83 | 地上部:As 5 Cd 2 Cu 66 Ni 3 Pb 720 | | | |
| Touissite | 多年生草本 | Phragmites australis | Cd 15-36 Cu 328-1405 | Zn 433 Sb 26 | Hasnaoui et al. (2020) | | |
| Pb/Zn鉱山地域 (モロッコ北西部) | 水生植物 | ョシ | Ni 9-16 Pb 6445-18324 | 根: As 4 Cd 3 Cu 67 Ni 2 Pb 2306 | Plants 9: 1458. | | |
| | | 3,9 | Zn 2096-5387 Sb 97-243 | Zn 199 Sb 22 | | | |
| | | Dimension materialis | 堆積物 mg/kg | 茎:Fe 0.04 (%) Pb ND Zn 127 Cu 13 Mn 36 Ni ND | | | |
| Rudnik鉱山 堆積物 | 多年生草本 | Phragmites australis | Fe 6.79 (%) Pb 1949 | 地下茎: Fe 0.09 (%) Pb 18 Zn 61 Cu 25 Mn 53 Ni 2 | Prica et al. (2019) Botanica Serbia 43: 85 | | |
| 年刊初 (セルビア) | 水生植物 | ョシ | Zn 1432 Cu 761 Mn 1940 | 根: Fe 1.12 (%) Pb 675 Zn 443 Cu 299 Mn 366 | 95. | | |
| | | 3 2 | Ni 86 | Ni 40 | | | |

表 2-7 樹木 (海外の研究報告より作成)

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 |
|---------------------------|---------------|---------------------------------|-----------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------|
| | | Rhus chinensis | 土壌 mg/kg | 地上部: Pb 104 Zn 174 Cu 9 Cd 5 | |
| Pb/Zn 鉱山 集積場 | 水流 产力 | Krius chinensis | Pb 18423 Zn 16745 | 根: Pb 307 Zn 276 Cu 21 Cd 7 | Shu et al. (2005) |
| (Fankou・中国) | 落葉広葉樹 | ヌルデ | Cu 710 Cd 77 | | Restoration Ecology 13 49–60. |
| | | XIVI | pH 5.5 | | |
| | | Erica arborea | 土壌 mg/kg | 地上部:Cu 30 Mn 400 Zn 20 | (1 |
| San Finx Cu鉱山 集積場 | 落葉広葉樹 - | Erica aroorea | Cu 274–5421 | | Álvarez et al. (2003) The Science of the Total |
| 未付物 (スペイン) | 谷米 丛米伽 | エイジュ | Mn 295–2105 | | Environment 313: 185- 197. |
| | | エイクヨ | Zn 74–895 pH 4.3 | | |
| | | Frangula alnus | 土壌 mg/kg | 葉: Cu 40 Mn 2000 Zn 100 | (1 (2000) III |
| an Finx Cu鉱山 集積場 落葉広葉樹 | | rrangua airus | Cu 274–5421 | 枝: Cu 20 Mn 700 Zn 100 | Álvarez et al. (2003) The Science of the Total |
| 集積場 落 (スペイン) | 谷米 丛米伽 | セイヨウイソノキ | Mn 295–2105 | | Environment 313: 185- 197. |
| | | 64 3 94 7 7 4 | Zn 74–895 pH 4.3 | | 13.1 |
| | | Quercus robur | 土壌 mg/kg | 葉: Cu 30 Mn 1000 Zn 20 | Ál1 (2002) TI- |
| San Finx Cu鉱山 集積場 | 落葉広葉樹 - | Quercus robur | Cu 274–5421 | 枝: Cu 30 Mn 400 Zn 110 | Álvarez et al. (2003) The Science of the Total |
| (スペイン) | 份米瓜米啊 | ヨーロッパナラ | Mn 295–2105 | | Environment 313: 185- 197. |
| | | 1 E 9717 7 | Zn 74–895 pH 4.3 | | |
| | | Salix atrocinerea | 土壤 mg/kg | 葉:Cu 30 Mn 1000 Zn 700 | Álvarez et al. (2003) Tho |
| San Finx Cu鉱山 集積場 | 落葉広葉樹 - | INDIA GO OCINES CO | Cu 274–5421 | 枝: Cu 30 Mn 400 Zn 400 | Science of the Total |
| (スペイン) | 10不从不知 | ヤナギ属植物 | Mn 295–2105 | | Environment 313: 185– 197. |
| | | () - (/p=1 p=120 | Zn 74–895 pH 4.3 | | |
| | | Betula pendula | 土壌 mg/kg | 葉: Pb 14–16 As 46–49 Sb 0.5–0.7 | |
| Au鉱山 集積場 (La Petite | 落葉広葉樹 - | пста регита | Pb 2537–9304 | 枝: Pb 78-84 As 81-87 Sb 2 | Wanat et al. (2014) Environmental Geochen |
| Faye鉱山・フランス) | 田木州木田 | シダレカンバ | As 5465–41900 | 根:Pb 301–311 As 1122–1160 Sb 82–85 | & Health 36: 783–795. |
| | | V / V / V / V | Sb 103-530 pH 3.8-4.5 | | |

| 採取場所 | 種類 | 植物名 | 水・土壌の含有元素濃度 | 植物の含有元素濃度(mg/kg) | 引用文献 | | |
|---------------------------|----------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--|--|
| | | C | 土壤 mg/kg As 49-881 Cd 6-2389 | 葉:Cd 2–18 Cr 2 Cu 8–21 Ni 7–8 Pb 10v599 | | | |
| Trepca 鉱山 | 松華貴華松 | Salix purpurea | Cr 35–169 Cu 59–944 | Zn 195-2950 茎: Cd 3-11 Cr 2-5 Cu 6-15 Ni 5-18 | Zabergja Ferati et al. (2021) Bulletin of Environmental | | |
| (Mitrovica 地域・ コソボ共和国) | 落葉広葉樹 | セイヨウコリヤナギ | Ni 83–282 Pb 359–4662 | Pb 6-387 Zn 109-1876 根: Cd 6-37 Cr 6-10 Cu 18-33 | Contamination and Toxicology 107: 537–543. | | |
| | | 27 3 9 3 9 7 7 7 | Zn 386–4482 pH 3.4-7.2 | Ni 18-61 Pb 22-1986 Zn 222-4748 | 107. 331–343. | | |
| | | Pinus massoniana | 土壌 mg/kg | 葉: As 0.4-5 Cr 0.3-0.9 Cu 4-20 Mn 147-1430 Ni 0.8-6 | | | |
| Machangqing | 游纪和莱姆 | r inus massoniana | As 1–39 Cr 20–385 Cu 25–137 | Pb 1-37 Zn 19-33 茎: As ND-0.2 Cr 0.3-3 Cu 2-7 | Wang et al. (2019) Journal of Geochemical | | |
| Cu鉱山 常緑針葉樹 (雲南省・中国) | | タイワンアカマツ | Mn 195–1580 Ni 12–178 | Mn 45-153 Ni 0.3-4 Pb 0.3-1 Zn 13-20 根: As 0.1-1 | Exploration 200: 159– 166. | | |
| | | 91927A32 | Pb 19–102 Zn 19–185 | Cr 2-5 Cu 5-22 Mn 42-343 Ni 3-71 Pb 0 9-4 Zn 17-36 | 100. | | |
| | | D: | 土壤 mg/kg | 葉: As 1 Cr 0.8 Cu 13 Mn 428 Ni 4 Pb 4 Zn 42 | W 1 (2010) | | |
| Machangqing | 冶石和茶料 | Pinus yunnanensis | As 1–39 Cr 20–385 Cu 25–137 | 茎: As ND Cr 2 Cu 6 Mn 49 Ni 1 Pb 0.5 Zn 18 | Wang et al. (2019) Journal of Geochemical | | |
| Cu鉱山 (雲南省・中国) | 常緑針葉樹 | ウンナンマツ | Mn 195–1580 Ni 12–178 | 根: As 0.3 Cr 4 Cu 8 Mn 43 Ni 10 Pb 2 Zn 21 | Exploration 200: 159– | | |
| | | 927247 | Pb 19–102 Zn 19–185 | | 100 | | |
| | | C4ilii | 土壌 mg/kg | 葉: U 0.3 As 0.2 Cd 0.2 Co 1 Cu 6 | | | |
| Xiazhuang U鉱山 | 游码, 宁蘇梅 | Castanopsis carlesii | U 32 As 10 Cd ND Co 10 | Mn 1600 Mo ND Ni 2 Pb 3 Zn 26 | Wang ct al. (2019) Environ Geochem Health | | |
| (広東省・中国) | 常緑広葉樹 | ツブラジイ | Cu 6 Mn 278 Mo 1 Ni 5 | | 41: 2413–2423 | | |
| | | 77721 | Pb 94 Zn 53 | | | | |

3. 自生植物利用による緑化方法

3.1. はじめに

金属鉱業などでは休廃止後も坑内水の処理や捨て石・鉱さい堆積物の管理が必要となる。長期にわたる堆積物の流出や飛散防止、景観回復の観点などから緑化が現実的かつ有効な手段であるが、たい積場の気候や地形などの自然環境、堆積物自体の性状が複雑に入り組み、緑化に使用できる植物は制限されている(金属鉱業事業団,1983)。たい積場のなかでも山間部の小規模なたい積場では、多年生草本による植生を経て陽性低木林に至っている場合もある。一方、自然緑化によるたい積場の緑化では多年生草本などの下草が欠如したまま陽性低木が侵入・定着していることがしばしばある。しかし、構造的にコケ植物や草本による下草層が欠如した林となり、豪雨や強風などといった環境変化に脆弱な植生となる。そのため、人為的に自然植生遷移を促すためには裸地から草本の侵入段階への促進が最も重要だと考えられる。また、多様な気候条件をもつ日本では、各たい積場の自然環境に合わせた工法への工夫や、用いる生物へのきめ細やかな対応が必要となる。

たい積場の緑化を考えたとき、自然の生態遷移を無視した緑化は一時的な成功を見せるものの、長期的には失敗することがある。そのため、緑化を推進するにあたり、たい積場の環境に適した植物を用いることが重要となる。一方、たい積場緑化の目的の一つに堆積物の流出防止があり、短期間での緑化が求められる。そのような場合、生育基盤を整備し、人為的に先駆植物を播種することで短期的な緑化を行うと共に、在来種の侵入を待つ。また緑化は土木建造物や建築物と異なり、施工後年数が経過するごとに安定化し、効果が発揮される。そのため、たい積場の緑化対策の基本的な考え方としては、緑化計画の作成段階で、後世に生じうる環境的影響(在来種の存続への影響やヒトを含めた周辺動植物の健康への影響など)及び生態遷移を念頭に置き、多様かつ持続する植生が形成されるよう緑化工法を選定し、施工地に合わせて工夫していくことが大切である。

本章ではススキやイタドリなどの遷移初期草本に加え、アカマツやリョウブ、ヤナギ類といった遷移 初期樹種を用いた日本における緑化の事例を紹介すると共に、可能な限り施工地の具体的な場所や工法 などを記載した。植物種は上記 5 種のみの記載としたが、施工地での緑化目的や気候、土壌条件などに 合わせて、他の植物種の導入や緑化工法なども検討していただければと考える。

3.2. 自生植物を利用可能な緑化場所

自生植物の生育する場所には、土壌環境や地形、気候などの要因が大きく影響する。酸性土壌であったり重金属を高濃度に含む場合は植物の生育が制限されたり、崖のように急峻あるいは、土壌が生成されておらず礫や堆積物が主な構成要因となっている地形の場合、植物の種子が流亡しやすい。霜害や積雪などが生じる場合は土壌の剥落や植物体の折損などによって、種子や発芽した植物の生存・定着を困難とする。また、シカなどによる食害が大きい場合、周辺地域の不嗜好性植物も導入対象となる。

3.3. 遷移を意識した自生植物の選択

3.3.1. 施工地の環境の重要性

日本は国土に対して多くの気候区分を有する国であり、亜熱帯気候から亜寒帯気候までの気候区分を有する。気候は植物の成長にとって重要な環境要因の一つであり、植物の分布と生存範囲を規定している(Larcher, 2004)。植物には乾燥した土壌を好む種や、逆に湿潤な土壌を好む種がある。日本に広くみられるイネ科草本のススキは乾燥した土壌を好み、貧栄養や酸性土壌にも耐性を有する。一方、同じイネ科草本でもガマやヨシは湿潤な環境を好む。このような差異は植物の種ごとに異なるため施工地が乾燥状態なのか、あるいは湿潤状態なのかを把握し、適した植物を緑化に用いる必要がある。また、地温は実生の生残、特に夏場の生残に大きく関与しており、温度変動の小さい状況をつくることが実生の定着を促進するとされている(奥村ら、2002)。地温の日較差は植生によって抑制されることが知られている(松中、2018)ため、裸地に植栽する際はまず侵入しやすい植物を導入し、その後徐々に目的の植生へ誘導することが必要となる。表面が乾燥状態であっても、土壌が緻密で空隙がなく含水率が高い場合などは、湿地を好む植物が侵入しやすい場合がある。一見しただけでは判断が難しい場合もあるため、施工地の環境測定や植生の観察が重要となる。

3.3.2. 郷土種の重要性

同じ種類の植物でも、生育している地域ごとに遺伝的な差がみられ、各地域の気候や環境要因に適応 している。特に広範に自生する植物では生理的な差異が確認されており、その地域での定着のしやすさ に影響すると考えられる。例えば、イタドリについては、標高の高い場所に自生するものと低い場所に 自生するものでは、発芽に適した温度が異なることが知られており、標高が高い場所に自生するものは 低温でも発芽できるように適応している(柴田・新井、1970)。また、ススキについても自生する地域 によって生理的な差異があるとされ、気温の高い地域に自生するものを気温の低い地域に移植した場合 は越冬性が低下する可能性が指摘されている(早川ら、2014)。このように国内に生育する同種の植物 同士でも地域差が確認されており、各地域に生育する植物(郷土種)を利用することが重要である。こ のような遺伝的な差異は植物によって大きく異なり、小林・倉本(2006)は進化的重要単位に基づいて 日本を 18 区域へ試作的に区分し、在来木本植物の移動許容範囲として 100~200 km を推奨した。それに 対して、明確な範囲は規定されていないものの、広域分布する草本性先駆植物の研究事例はススキ(早 川ら、2014) やイタドリ (Inamura et al., 2000) などの報告がある。ススキは日本国内での遺伝的な多様性 は比較的低い一方で、中国など国外のものとは明確な遺伝的な差が確認されている(早川ら、2014)。 また草本であるイタドリは、国内であっても採取する場所によって種子の発芽率などが異なる場合があ り、さらに国外のものとは明らかな形態的な違いがあることが確認されている(福永、2007)。これら のことから、一般には樹木と同様に 100~200 km 圏内で、気候や温度などの生育環境が類似している地 域に生育する植物の種子や株を使用するとよいと考えられる。この他の指標として、環境省(2015)は 流域区分による地理的範囲の考え方を提唱しており、施工地である法面が位置する単位流域内に生育す る同種の植物を利用することで地域性系統の保存に有用であるとした。3.4では、ススキ、イタドリ、ア カマツ、リョウブ、ヤナギ類について述べる。

3.4. 自生植物の増殖及び定着方法

3.4.1. ススキ

(1) ススキの特徴

ススキは乾燥や酸性土壌に強く、pH 4.5 の土壌でも生育できる(堀江・根本、1990)。大きく生育するため、被陰によって他の植物の生育を阻害する可能性が示唆されている(山田ら、2019)が、ススキが密生して土壌表面を覆うことで天然のマルチ材として作用し、表土の安定化(養父ら、1999)やシカなどによる食害から他種植物の小さな個体を保護することも確認されている(亀井ら、2017)。種子は風によって拡散される風散布種子であり広範に生育しやすい。種子は光によって発芽しやすくなり、25℃で連続して光を当て続けた結果、発芽率は 15 日程度で 60%とかなり高い発芽率であった(橋詰、1987)。ススキの種子は被覆を嫌い、野外環境で発芽率が低下することが知られている。中村ら(2021)は東京農業大学世田谷キャンパスにおける圃場にて、ススキの発芽試験を行った。その結果、発芽率は最大で 17%となった。発芽速度は被覆する資材のない対照区で最も早く 7 日目に発芽し始め、次いで資材の薄い植生シート区、ワラシート区が発芽を始め、覆土が厚い吹付資材区は発芽開始が遅かった。いずれの試験区でも播種から約 1 ヶ月後に発芽が完了した。また、種子の品質に年変動が大きいこと(中村ら、2021)や不稔種子の多寡、低温による休眠の影響(寺井、2017)があるとされ、それらを考慮した播種や管理が必要とされている。

(2) 実地試験

高橋ら(2008)は原石山跡地(年平均気温 11℃、年平均降水量 1370 mm)の斜面(南東向き、勾配 1:0.8)を施工地とし、施工地周辺に生育するススキの種子を用いた厚層基材吹付工を行ったところ、発芽・生育が良好である一方、樹木などの侵入には施工後3~5年程度を要することを確認した。

荒井ら(1983)は福島県大沼郡金山町大原字三更地内で沼沢湖の東北に発達する火山性の台地の急峻な崖を施工地とした。年平均気温は 10.7℃、年平均降水量は 1910 mm となっている。また、平均積雪は 1.89 m、最深積雪 4.2 m の豪雪地帯である。施工地の土壌は有機物の堆積がほとんど確認されない基岩層とその風化岩石で構成されており、貧栄養状態である。また土壌 pH は 2.6 という強酸性を示した。施工地において周辺に生育するススキを用いて①播種したポットの移植(ポット埋設工)(図 3-1)と②等高線に沿うように掘った溝へのススキの根株の移植(客土式筋工)(図 3-2)の 2 種類の施工を行った。①のポット埋設工では客土の影響も観察するため、客土を行わない対照区及び客土を 5 cm、10 cm、30 cm とした区の 4 区画を設けた(図 3-1)。②の客土式筋工では、等高線に沿うように深さ 40 cm、幅 40 cm の溝と深さ 10 cm、幅 10 cm の溝を掘り、土壌改良などを行った。40 cm × 40 cm の溝には 50 cm 間隔で樹木の苗木を、10 cm × 10 cm の溝には 30 cm 間隔で、施工地周辺から調達した握りこぶし程度のススキの根株を植栽した(図 3-2)。

①のポット埋設工では対照区以外の生育が大きく向上することが確認された。また、②の客土式筋工では、約3か月後には活着率が100%であり、6年後も旺盛に繁茂することを確認した。以上から、荒井ら(1983)はススキが強酸性土壌への導入植生として最も適した草本の1つであると結論した。

大谷ら (2016) は施工地からススキの種子を採取し、室内の植物栽培用のポットで発芽させた後、施工地に移植する手法(ポット苗移植法)と従来の手法である播種法と採取した根株を移植する根株移植法を比較した。ポット苗の栽培、種子を 25℃(昼間 12 時間)/15℃(夜間 12 時間) で発芽させ、約 3 か月栽培した後、6 月に植え付けた。翌年 7 月に生残調査を行ったところ、播種法では発芽が確認されなかった。また、根株移植法では定着が約 40%であったのに対し、ポット苗移植法ではほとんどが定着し、草丈も 155 cm と生育していることが確認された。なお、播種法や根株移植法が著しく低い発芽率や定着率を示したのは試験時期に降雨が少なかったためで、ポット苗移植法は気象の影響を受けにくいとした。

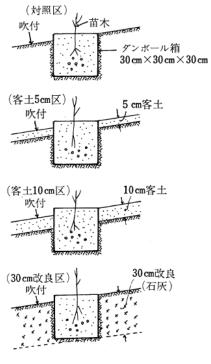


図 3-1 ポット埋設工

荒井ら(1983)より引用した。

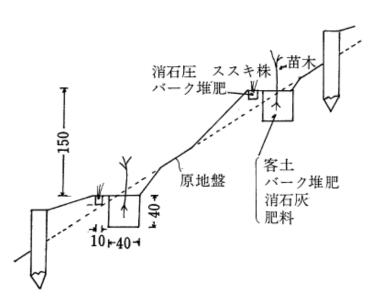


図 3-2 客土式筋工 荒井ら(1983)より引用した。図中の数字の単位は cm。

(3) まとめ

ススキは酸性土壌、乾燥土壌、植生が貧弱などの場所の緑化に適すると考えられた。自然条件下では 種子からの発芽率が低い傾向がある一方、種子は大量に入手しやすい。苗あるいは施工地周辺のススキ からの株分けは、定着すれば翌年から大きく育つ可能性がある。

3.4.2. イタドリ

(1) イタドリの特徴

イタドリは富士山のスコリア地帯など乾燥土壌や貧栄養土壌でも生育することが確認されている(南・渡邊、2007)。また、南・渡邊(2007)はイタドリが生育することで強風などの環境ストレスが抑制され、樹木実生の侵入が促される可能性を示唆しているとした。種子は風によって拡散される風散布種子で、種子の産地によって休眠期間が大きく異なることが示されている(柴田・新井、1970)。例えば、橋詰(1987)は25℃の連続光条件下で10%以下の発芽率だったとした。また、柴田・新井(1970)は長野県蓼科産と同県松本産のイタドリ種子の発芽率を25℃連続光条件下で比較した結果、10日目には蓼科産が100%の発芽率であったのに対し、松本産のイタドリ種子は20%程度にとどまっていた。松本産の種子に対し、5℃で15日間低温処理を行った結果、発芽率は蓼科産のものと同等となった。寺井(2017)はイタドリの種子は20℃以下で発芽しやすい一方、夏の温室内では発芽率が15%以下となり、覆土をするとさらに低下することを報告した。

(2) 実地試験

田中ら(2009)は山梨県山梨市三富上釜口に開設中の林道乾徳山線の斜面緑化を行った。施工地は標高 1300 m で土質は脆弱、傾斜 50~60 度と急峻な斜面である。また、山間部で冬季は土壌凍結による表土の侵食や剥落が生じ、イタドリの種子が流亡すると考えられた。そこで従来法の厚層基材吹付工に加え、表土の保護を目的とした植生マットを用いた施工を 12 月中旬と 5 月下旬に行い、緑化方法の比較を行った。その結果、いずれの工法でも表土の侵食や剥落は確認されなかった一方、イタドリの発芽も確認されなかった。そのため、イタドリの定着は土壌の侵食・剥落だけでなく、イタドリ自体の生理的な特徴も視野に入れた処理(冷温処理など)の検討の必要性を示唆した。

荒井ら(1983)は福島県大沼郡金山町大原字三更地内で沼沢湖の東北に発達する火山性の台地の急峻な崖を施工地とし、イタドリをポット埋設工法(図 3-1)で生育させた。その結果、対照区及び客土 5 cmでは草丈が50 cm程度まで生育したが、客土層が10 cm と30 cmでは生育が著しく低下した。これは、覆土により発芽が困難となったためと考えられ、寺井(2017)の圃場での結果と一致した。

西山 (1997) は岡山県南部のせき悪地における板状植生マットを用いた緑化への応用を目指して、圃場での板状植生マットを用いたイタドリなどの発芽率を評価した。植生マットは 1 月から 3 月にかけて作製され、保存方法や設置月日を変えて設置された。その結果、1 月に作製し、常温暗所で 7~8 日間、5℃暗所で 55 日間保存したマットでのみイタドリの発芽が確認され、発芽率は約 70%であった。本結果はイタドリの発芽には低温処理が必要とした柴田・新井 (1970) の結果と一致した。

(3) まとめ

イタドリは乾燥土壌、貧栄養土壌の緑化に適すると考えられる。生育環境による種子の発芽条件の差が大きいため、施工地付近の地域から種子を採取することや、5℃での低温処理を行う必要があると考えられた。

3.4.3. アカマツ

(1) アカマツの特徴

種子は風によって散布される風散布種子である。球果に羽の付いた種子が 30~40 個程度入っており、成熟すると球果が開き、種子が飛散する。開いた状態の球果は広くマツボックリと呼ばれる。種子を採取する際は、秋に濃緑色のまだ開いていない球果を採取する必要がある。採取後は室温で保管し球果を乾燥させて開かせ、種子を取り出す。マツの場合、充実種子と未成熟種子に重さの差があるため、種子についた羽を除去した後、風選器(風速 4 m/s)で充実種子のみを選別することもできる。保存は気密性の高い容器に乾燥材を入れ、冷暗所で保存する。種子の発芽には低温処理及び光が必要となる。長谷川・古川(1953)はアカマツ種子を1℃暗所で5月間低温処理を行えば、20分間光を照射するだけでもアカマツの発芽率が70%程度になることを示した。Washitani and Saeki (1986) は採取後5か月程度4℃暗所に保存し、発芽試験を行った。その結果8℃から30℃と幅広い温度域で90%程度の発芽率を示し、22℃で最も発芽に要する日数が少ないことを示した。アカマツに植林にはコンテナ苗と呼ばれる集約的に栽培された苗が販売されており、雑草防除などが不要なことから省力化が特徴とされている(米道ら、2021)。その一方で、植栽直後は横へ広がる根が少ないため、薄い土壌や強風などへの耐性は低い可能性がある。

(2) 実地試験

荒井ら(1983)は福島県大沼郡金山町大原字三更地内で沼沢湖の東北に発達する火山性の台地の急峻な崖を施工地とし、アカマツをポット埋設工法(図 3-2)で生育させた。その結果、活着率は約 30%と不良であったが、植栽5年目までは客土の有無やその深さに関わらず良好に生育していた。しかし、7年目には全て枯死していた。これは積雪による幹や枝の折損によるものと考えられ、積雪が厳しい場所ではアカマツの導入は難しいとした。

(3) まとめ

アカマツは貧栄養かつ水はけのよい土壌を好み、有機物が堆積している場所における実生の侵入は難 しいとされる。そのため、植栽初期に草本の種子と混ぜ込み、植生遷移の初期から中期程度の緑化に有 用だと考えられた。また、発芽には低温処理を要すると考えられた。

3.4.4. リョウブ

(1) リョウブの特徴

吉田・杉木(2001)は滋賀県北部の山間部で10月にリョウブ種子を採取した。採取に際し、リョウブには結実状況に年による差があることを示した。発芽試験を行ったところ、5℃暗所で19~29週間の低温処理をすることで発芽率が上昇することを報告した。橋本ら(2011)は長野県伊那市で採取したリョウブ種子を5℃暗所で保存後、鹿沼土に種子を播種し、23℃の恒温で昼間14時間/夜間10時間で発芽試験を28日間行った結果、発芽率は20%程度であった。一方、岩手大学農学部キャンパス内の附属寒冷フィールドサイエンス教育研究センターの圃場において稲わらを敷き詰めた発芽試験を行ったところ、発芽が確認されなかったことを報告した。

(2) 実地試験

稲葉ら (2004) は埼玉県秩父郡の原石山 (年平均気温 10℃、年平均降水量 1200 mm) において播種工を行う際、覆土を 3 cm 以上した場合は発芽を著しく抑制したが、これは種子が小さすぎたため、覆土層を突破できなかったと考察した。この結果は、橋本ら (2011) による稲わらを敷き詰めた際の発芽率と一致するものである。そのため、リョウブの播種の際は覆土を行わない方が良いと考えられる。また、齋藤 (2001) は播種よりも生育苗や山取苗を用いた方が、生育が良好なことを確認した。Yamaji et al. (2016) は鉱山跡地に自生するリョウブは根に生息する内生菌がいることで重金属耐性を獲得し、生残できることを示した。そのため、齋藤 (2001) で生じた実生ごとの生育の差についても内生菌の感染の有無による可能性が考えられた。

荒井ら(1983) は福島県大沼郡金山町大原字三更地内で沼沢湖の東北に発達する火山性の台地の急峻な崖において客土式筋工(図 3-2)を行い、50 cm程度まで栽培したリョウブの苗木を植栽した。その結果、活着率は約70%であった。また、積雪による折損が多く確認されたため生育は良好ではなかった一方で、旺盛な萌芽も観察された。6年経過時でも強酸性土壌による衰退枯死は確認されず、林叢を形成していた。

(3) まとめ

リョウブは貧栄養土壌や乾燥している場所の緑化に適すると考えられた。また、発芽に際しては被覆を嫌う一方で種子は入手しやすく、飛来種子による自然侵入も期待できると考えられた。苗の定着は良いとされるため、苗の移植が緑化に適応しうると考えられた。

3.4.5. ヤナギ類

(1) ヤナギ類の特徴

バッコヤナギやタチヤナギ、オノエヤナギ等多くの種において、一般的には種子は短命である。ナガ バヤナギやイヌコリヤナギ、バッコヤナギなどは、採取後 1 週間程度は発芽率が 100%近いが、それ以 降は急速に低下し 22 日目では 0%となったことが報告されている(東、1979)。また、柳井・菊沢 (1991) はエゾノバッコヤナギ、エゾノカワヤナギ、オノエヤナギの3種のヤナギにおいて発芽条件な どを考察し、いずれのヤナギ類も適した湿潤率では 10~30%程度の発芽率を示す一方、乾燥した場所で は発芽できないとした。ヤナギ類は湿潤や湛水には耐性が高く、石川(1996)はヨシノヤナギの種子を 1か月生育させたのち、2か月間完全に沈水させても生残することを確認した。また挿木も湛水に強く、 約 200 日間沈水しても萌芽能力を有していた(東ら、1991)。東(1965)は、北海道大学天塩地方演習 林より、3月(花期)、7月(結実期)、9月(第2発芽期)にナガバヤナギ、エゾノキヌヤナギ、タチ ヤナギ、バッコヤナギの枝を採取し、挿木の発根及び萌芽を比較した。挿木苗は室温で行った。その結 果、3月(花期)に採取したものが最も発根率及び萌芽率が高かった。ただし、バッコヤナギについて はいずれの時期に採取しても発根率は低かった。一方、菊地ら(1983)は 6 種類のヤナギ類の挿木を行 い、その発根率を確認した。その結果、①発根が良好な種としてコリヤナギ、カワヤナギ、シダレヤナ ギ、②中程度の発根をする種としてセイヨウシロヤナギ、③発根が困難な種としてヤマネコヤナギ、キ ツネヤナギを挙げた。また、発根率に季節変動があるとしながらも、種によってその変動は大きく異な るとし、一般化は難しいとした(菊地ら、1983)。

(2) 実地試験

東(1965)は崩壊地、泥炭地、重粘土地、風衝地などにおける生育状況について観察し、ヤナギ類を緑化の導入樹種として利用できることを確かめた。また、種子よりも挿木の方が、移植までの保管・管理や発芽率の観点から扱いが優れているとした。ヤナギの種類によって挿木に用いる枝の採取時期が異なるが、一般には春先に枝の先端を採取し、そのまま春挿しあるいは夏挿しにすれば活着することを確認した。ただし施工時期の調整が難しく、ヤナギの展葉期などに挿木をすることが明らか、かつ積雪による障害がない場合、秋挿しをすることで、越冬直後からの発根を期待できるとした。

奥村ら(2002) は鳥取県西部の大山主峰の溶岩円頂丘の北側の標高 1000 m 地点の斜面(勾配 1:2.1) の緑化を検討した。施工区は暖候期の降雨量が多く強度も強い。また、冬季には 3 m ほどの積雪が確認される。緑化に際し、植生基材吹付工とむしろ伏せ工を行い、周辺植生からの飛来種子の定着を比較した。その結果、むしろ伏せ工の方が飛来種子の捕捉に優れており、特にヤナギ類の定着数が多いことを報告した。これはむしろ伏せ工の方が表面に凹凸があり、風散布種子であるヤナギの種子を捕捉しやすかったためと考えられた。

(3) まとめ

種子の採取は枝先に綿毛が現れ始めた初夏に行うが、長期保存には不向きである。一方、枝から萌芽する能力が高いため、植栽する際は挿木が候補として挙げられる。多くの種が湛水に対して強い耐性を示すため、湛水しやすい場所の緑化に応用しうると考えられた。飛散種子を扱う場合、基材への混ぜ込みの他に、周辺の自然植生からの飛散種子を捕らえる工法が有用と考えられた。

3.4.6. 覆土を行わない集積場の緑化

近年、植物の重金属耐性を増強する要因として、機能性微生物である内生微生物(根の周囲に生息する微生物)が注目されている。内生微生物は「植物組織に害を与えることなく、生きた植物組織内に生息する微生物」(Wilson, 1995)と定義されている。また共生菌や病原菌の中間に位置する菌としても定義されており、共生菌の植物への影響は「有益(benefit)」、病原菌の植物への影響は「有害(harm)」と示される中で、内生菌の植物への影響は弱い害と有益(weak harm and benefit)」とされている(Brundrett, 2006)。植物の根の内部に生育する機能性微生物はストレス(乾燥・病気・塩類)に対する植物の耐性を増強する(Rodriguez et al., 2009)という報告が多数あり、微生物が重金属耐性を増強させるとの報告(Li et al., 2011; Nagata et al., 2015; Yamaji et al., 2016; Haruma et al., 2018; Haruma et al., 2021)や微生物の耐性増強の可能性を示唆する報告も増えてきた(Doyama et al., 2021; Nakamoto et al., 2021)。鉱山跡地における植物の定着を促進するためには機能性微生物を考慮に入れた植物の重金属耐性機構を解明する必要がある。詳しくは山路・春間(2020)及び山路ら(2021)を参考にされたい。現在、3 箇所の鉱山跡地において、機能性微生物を考慮した緑化の検討を試みているが、ここでは1つの例を提示する。

現在、鉱山跡地の緑化においては遷移初期草本の定着だけでなく森林形成を考慮した樹木実生の定着が望まれており、植物-内生菌共生系を考慮した樹木実生の定着機構の解明が有効であると考えられた。秋田県にある鉱山跡地の集積場を対象とした調査において、ススキの株の内部に生育するアカマツは正常に生育していた一方、ススキの株の外側に生育するアカマツは葉が赤褐色を呈しており、生育阻害を受けていることを発見した(図 3-3)。そこで、鉱山跡地に自生するススキが機能的な内生菌をアカマツ実生に提供することによって、集積場におけるアカマツ実生の初期定着に寄与していると仮説を立てた。本研究では、ススキが機能的な内生菌をアカマツ実生に提供することによる、アカマツの初期定着を促進する機構を解明することを目的として現在実施中である。なお、本集積場は土壌が未発達でFeが高濃度に存在し、表層が乾燥した状態である。

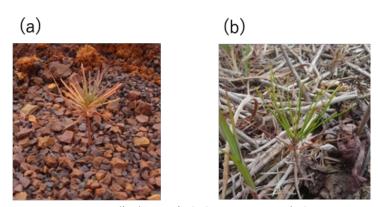


図 3-3 集積場に自生するアカマツ実生

(a) ススキ株の外側に自生するアカマツ実生 (b) ススキ株の内側に自生するアカマツ実生

(1) ススキによるアカマツ実生の生残率の向上

2019年9月から2020年9月までアカマツ実生の生残率を確認したところ、ススキの株の外側のアカマツ実生よりも、内側のアカマツ実生の生残率が高いことが明らかとなった(図 3-4)。また、2019年7月のアカマツ実生の内生菌の感染率を算出したところ内側のアカマツ実生の方が外側のアカマツ実生よりも高い感染率であった(図 3-5)。以上のことから、ススキはアカマツ実生に内生菌が感染しやすい環境を提供し、アカマツ実生の定着を促進している可能性が示唆された。両植物の内生菌については分離・同定をし、その機能を解析中である。

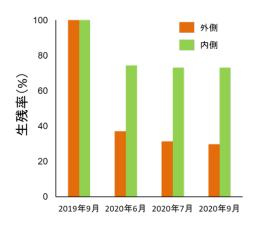


図 3-4 アカマツ実生の生残率

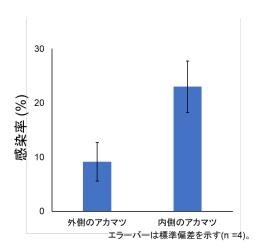


図 3-5 内生菌の感染率

(2) アカマツ及びススキの重金属濃度

アカマツの含有元素濃度の結果を図 3-6 に示した。分析の結果、根と根皮(根の周囲の死細胞)に高濃度の Fe を蓄積することが明らかとなった。ススキの内外に生育することでの重金属濃度の差は確認されなかった。また、採取した根からは catechin が検出されたことから、catechin が重金属の毒性軽減に関与する(Grzesik et al., 2018)と考えられた。

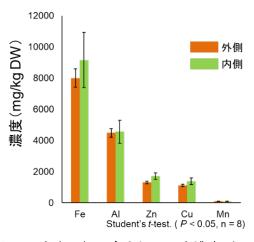
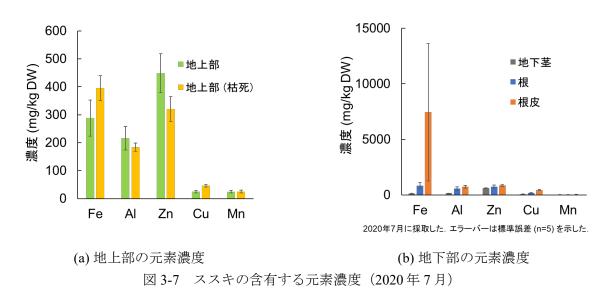


図 3-6 アカマツ実生の根に含まれる元素濃度(2019年7月)

ススキの含有元素濃度の結果を図 3-7 に示した。ススキは、根と根皮(根の周囲の死細胞)に高濃度の Fe を含有していることが明らかとなった。また、採取した根からは chlorogenic acid が検出されたことから、chlorogenic acid が重金属の毒性軽減に関与する(Kısa et al., 2016)と考えられた。ススキは chlorogenic acid による Fe の無毒化と、死細胞である根皮に Fe を排出することで耐性を有していると考えられた。



(3) まとめ

本調査地の集積場に生育するアカマツ実生はススキの株の中で生育することで、生残率が上昇することが明らかとなった。本調査地のような乾燥状態の集積場での緑化を検討する場合は、ススキを先駆植物として利用すると他の樹木実生の侵入・定着を促進する可能性が考えられた。本調査地には既にアカマツ樹木の自然定着が十数個体確認され現在は集積場における種子の供給源になっているが、もともとは周辺森林からのアカマツ種子の飛散があり定着したのが最初だと推測される。以上の結果から、アカマツとススキと共に生育させることで、ススキが初期緑化の役割を果たすと共に、アカマツ実生の定着を促進することで、草本から木本への植生遷移の移り変わりを潤滑に進める可能性が示唆された。

また、アカマツ、ススキは高濃度の重金属を根に蓄積することが判明したため、これらの植物は高濃度の重金属に対して耐性があり、緑化に使用できる植物であると判断された。今後はこれらの植物と機能性微生物である内生菌の影響を考慮に入れ、アカマツ、ススキの集積場での定着要因について経時的解析を実施していく予定である。

4. 緑化によるカーボンニュートラル等の事例について

4.1. 海外における鉱山跡地の緑化の事例概要

前章までに緑化の技術面における解説を記載したが、ここでは実際に緑化が実現することでどういった効果があるのか、特に二酸化炭素固定に伴う鉱害防止事業のカーボンニュートラル等に着目し、事例を紹介する形で解説する。実際に鉱山跡地を緑化(再森林化)した海外事例について、レポート等が何点か公開されており、それらを紹介する。

鉱山跡地の緑化、特に緑化による炭素固定に関する研究事例は2000年以降世界各国で散見され、中国、インド、インドネシアを中心としたアジアで事例が多く、米国、カナダ、さらにはポーランドやドイツ、スペインを中心とした欧州の事例がある。

旧炭鉱跡地については多くの事例があり、緑化前と緑化後の炭素固定能を比較する事例がいくつかある。最近の研究事例では、鉱山跡地の自然回帰により、炭素固定に留まらず生物多様性の確保に言及する例もあり、SDGs(Goal 13、15)への貢献にも言及する例がある。

鉱山跡地の緑化や緑化に伴う二酸化炭素固定に関する具体的な調査レポートとしては、米国農務省 (United States Department of Agriculture) が 2017 年に発行した The Forestry Reclamation Approach: Guide to Successful Reforestation of Mined Lands (https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/54344)や米国環境保護庁 (United States Environmental Protection Agency) が 2012 年に発行した Carbon Sequestration through Reforestation: A LOCAL SOLUTION WITH GLOBAL IMPLICATIONS

(https://semspub.epa.gov/work/HQ/176034.pdf) などが挙げられる。また、その他の鉱山跡地を主とした緑化によるカーボンニュートラル等の事例を抜粋したものを表 4-1 に示す。このように緑化によるカーボンニュートラルに関する研究事例は世界各国で散見され、利用される植物種や二酸化炭素固定に関する研究は特に 2010 年以降多くみられることが分かる。なお、表 4-1 には参考として抄録の日本語訳(一部機械翻訳含む)を記載した。一部正確でないことも考えられるので、あくまで参考として参照されたい。

表 4-1 鉱山跡地を主とした緑化によるカーボンニュートラル等の研究事例

| NG | F (1) | 44.02 | D LEVILLAR (AN LANDING A L.) | Marrian des | *** | 発行 | 244 | - | _ | =/~ | | 備考 |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|-----|----|-----------|-----|------------------------------|--------------------------------|
| NO | タイトル | 抄録 | 日本語抄録(機械翻訳含む) | 資料名 | 著者名 | 年 | 巻 | 号 | 頁 | 言語 | 場所 | 植物他 |
| 1 | Soil Carbon Sequestration in Novel Ecosystems at Post-Mine Sites—A New Insight into the Determination of Key Factors in the Restoration of Terrestrial Ecosystems | Mining activities are one of the main causes of land degradation around the world and reduce the quality of the surrounding ecosystems. Restoration approaches using different wegatations and reclamation methods have been implemented to address this issue. In this review, paper, different studies focusing on the effect of the restoration of mining sites on the accumulation of soil organic carbon (SOC) were analyzed. SOC in reclaimed mining soil (RMS) increased considerably after various restoration efforts were implemented. The amount of SOC accumulated in RMS was mostly influenced by the restoration age, vegetation type, and substrate or type of reclamation used. From the scientific papers analyzed, we found that SOC accumulation increases with restoration age; however, vegetation type and reclamation have varied effects. According to the review, the restoration of mine sites with vegetation resulted in a rate of SOC accumulation ranging from 0.371 to 5.68 Mg SOC har 1 year—1. Climate conditions influenced the type of vegetation used for restoration. Regrading, liming, NPK fertilization, and seeding a mix of legimes and grasses were the most efficient reclamation techniques. Additionally, the use of grass and legime better facilitates the early accumulation of SOC compared with afforestation. Thus, the selection of appropriate tree species composition, reclamation treatments, and restoration age are the key factors for a high SOC accumulation rate. | 鉱業活動は、世界中の土地劣化の主な原因の一つであり、周辺の生態系の質を低下させています。この問題に対処するため、様々な極生や埋立方法を用いた修復アプローチが実施されてきた。この論文では、採掘場の修復が土壌有機が長く気でした。この論文では、採掘場の修復が土壌有機が高くいたが行われた後、再生された鉱山土壌(RMS)中のSOCは大橋に増加した。RMSに蓄積されたさいのの重要は、保証をは、SOCの置は、修復年代、機との機関、使用された基実または埋加して、BMSに蓄積されたさいのでは、単立では、BMSに蓄積されたさいのでは、大きな、SOCの置は、修復年代、機との機関、使用された基実または増加するくいのでは、大きな、SOCの重要は、をの結果、鉱山跡地を植生で修復した場合、SOC蓄積量はの37~5.68 Mg SOC ha-1 year-1 の節囲になった。気候条件は、修復に使用される種生の種類に影響を与えた、再発技術としていた。気候条件は、修復に使用される種生の種類に影響を与えた、再発技術とした場合、SOC蓄積量はの37~5.68 Mg SOC ha-1 year-1 の節囲になった。気候条件は、修復に使用さる種とが表現に影響を与えた。再発技術としているので展開になった。気候条件は、修復に使用さるをは、対策を増やされて、SOCの平開発をより促進することができる。したがって、適切な軽性構成の選択、埋立処理、および修復年代が、高いSOC蓄積率を得るための重要な要素である。 | Forests | Amisalu Milkias Mischo Marcin Pietrzykowski Bartbomiej Wo | 2022 | 13 | 1 | 63(11頁) | EN | レビュー | |
| - | Soil quality changes in an Iberian pyrite mine site 15 years after land reclamation | Reclamation of highly degraded mine lands to a sustainable environmental quality has become a major policy concern in many countries with a long mining tradition. This paper reports the soil quality status of a historical mine site fifteen years after its reclamation, using indicators of chemical reactivity, soil fertility and health, and discusses the progress and effectiveness of the implemented measures by a comparative analysis between pre- and post-reclamation conditions. Twenty composite surface samples (0–20 cm depth) were obtained for physical and chemical characterization from the open pit mine and waste disposit area, using a stratified random sampling approach. Additionally seven sites were selected to collect topsoil samples for microbiological testing. Results showed that soil quality changed noticeably over the study period (2003–2018), with overall improvements in key properties, such as structural stability, cation exchange capacity, degree of base saturation, soil organic earbon, and available phosphorus. Prior to exchange capacity, degree of base saturation, soil organic earbon, and available phosphorus. Prior to exchange capacity, degree of base saturation, soil organic earbon, and available phosphorus. Prior to exchange capacity, degree of base saturation, soil organic earbon, and available phosphorus. Prior to exchange capacity, degree of base saturation, soil organic earbon, and available phosphorus. Prior to exchange capacity, degree of base saturation, soil organic earbon, and available phosphorus. Prior to exchange capacity, degree of base saturation, soil organic earbon, and available phosphorus. Prior to exchange capacity, degree of base saturation, soil organic earbon, and available phosphorus. Prior to exchange capacity, degree of base exchanges the international composed biosoks as a low-cost, locally available, soil ammendment use effective in neutralizing both active and exchangeable acidity, and reducing the mobility, plant uptake and human bioaccessibility of trace elements the | 放業の長い伝統を持つ多くの国々において、高度に劣化した鉱山跡地を持続可能な 環境品質に再生することは、大きな改棄的間心事となっている。本館文では、歴史 分な鉱山跡地の理め立てからい5年後の土壌の品質状況を、化学反応性、土壌肥大 度、投析に大きな変更の関係を表現を表現した対策の型が関係があた。 では、現実に大きな変更のでは、大きなな変更のでは、現実に大きなのでは、現実を がが「こより参照する。原文部)の製造した原業が拠めが動から、影響があたがはであり特性を評価 した。さらに、吸生物を発用の表土サンプルを提取するために八手的特性を評価 した。さらに、吸生物を発用の表土サンプルを提取するために八手が向性と評価 に、展イオン交換容置、塩基砂板は、土壌有機炭素、有効リンなどの主要な性質が 全体的に改善されたことが明らかいになった。埋立前の鉱山土壌は、高温度の有害金 金米養外に加え、通機性により超生を維持することがであるい状態でした。低 コストで地元で入手できる土壌改良材としてテンサイ石灰とコンポスト化した。パ リストで地元で入手できる土壌改良材としてテンサイ石灰とコンポスト化した。 に、コストで地元で入手できる土壌改良材としてデンサイ石灰とコンポストに表に多い は、植物の取り込み、人間の生体への到達性を低減する効果が得られました。ま 、この変更料の添加により、土壌の肥大皮、炭素所産量、栄養利用率、軟生物イイオマス(無菌と真菌)が向上した。Pmus pincaとNerium okanderによる再格材は、 実的に美しく、環境的に関係の未提りの景度に適合した地生をやリ出ずための成功 観路であることが延明されたが、残留金属、特にCd、Cu、Zaの植物者だおよび生体 アクセスレンルを長期にかたって監視するためにさなる受力が必要である方。 の埋め立ての経験から得られた洞察は、世界中の他の放棄された鉱山跡地における 自然減衰を支援するための成功基準を提供するものである。 | CATENA | J.C. Fernández-Caliani M.I. Giráldez W.H. Waken Z.M. Del Río F. Córdoba | 2021 | 206 | | 13頁 | | イベリア 黄鉄鉱鉱山跡地 | Pinus pinea Nerium oleander |
| 3 | Eco-Restoration of Coal Mine Spoil: Biochar Application and Carbon Sequestration for Achieving UN Sustainable Development Goals 13 and 15 | Open cast coal mining causes complete loss of carbon sink due to the destruction of vegetation and soil structure. In order to offset the destruction and to increase sequestration of carbon, afforestation is widely used to restore these mine spoils. The current field study was conducted to assess the ecosystem status, soil quality and C pool in an 8 years old reclaimed mine spoil (RMS), compared to a reference forest (RF) site and unamended mine spoil (RMS). Biochar (BC) prepared from invasive weed Calotropis procera was applied in this 8 year RMS at 30 than 1 (BC3) and 60 than 1 (BC6) oil to study as impact on RMS properties and C pool. Carbon fractionation was also conducted to estimate inorganic, coal and biogenic earbon pools. The C stock of 8 year old RMS was 30.98 Mg C hal -1 and sequestered 113.69 Mg C hard CO2. BC30 and BC60 improved the C-stock of RMS by 31% and 45%, respectively, and increased the recalcifrant carbon by 65% (BC30) and 65% (BC60), Spoil physio-chemical properties such as pIt, eation exchange capacity, moisture content and bulk density were improved by biochar application. The total soil carbon at BC30 (3.63 g C kg-1) and BC60 (40 g C kg-1) was found to be significantly high compared to RMS (21 g C kg-1) and comparable to RF (33 g C kg-1). Thus, eco-restoration of coal mine spoil and biochar application can be effective tools for coal mine reclamation and can help in achieving the UN sustainable development goal 13 (climate action) by increasing carbon sequestration and 15 (biodiversity protection) by promoting ecosystem development. | 爾天石炭採脂は、植生や土壌構造の破壊により、炭素素収源を完全に基失させる。この破壊を補い、炭素の吸収を増加させるために、維林がこれらの強い酸地を権力するために成く行われている。本研究では、条料温した再生組跡地(RMS)において、生態系の妖態、土壌の質、炭素素制量を基準を接通した再生組跡地(RMS)に対いて、生態系の妖態、土壌の質、炭素素制量を基準を接触が、保証のはいまり、大田の大田の大田の大田の大田の大田の大田の大田の大田の大田の大田の大田の大田の大 | Land | Dipita Ghosh Subodh Kumar Maiti | 2021 | 10 | 11 | 1112(16頁) | EN | インド ジャールカンド州 tharia 炭鉱 | Calotropis procera |
| 4 | The development of soil organic carbon under young black locust (Robinia pseudoacaia L.) trees at a post-mining landscape in eastern Germany | The aim of this study was to evaluate the potential of short rotation alley cropping systems (SRACS) to improve the soil fertility of marginal post-mining sites in Brandenburg, Germany. Therefore, we annually investigated the crop alleys (AC) and black locust hedgerows (ABL) of a SRACS field trail under initial soil conditions to identify the short-term effects of tree planting on the storage of soil organic carbon (SOC) and and is degree of stabilization by density fractionation. We detected a significant increase in SOC and hot-water-extractable organic C (HWEOC) at ABL, which was mainly restricted to the uppermost soil layer (0 – 10 cm). After 6 years, the SOC and HWEOC accumulation rates at ABL were 0.6 Mg and 46 kg harly year-1, which were higher than those in the ACI and addition, comparatively high stocks of approximately 4.6 Mg OC and 182 kg HWEOC harl were stored in the ABL litter layer. Density fractionation of the 0-3 cm soil layer at ABL revealed that the majority of the total SOC (47%) was stored in the free particulate organic matter fraction, which was more than twice that of the AC. At the same time, a higher and steadily increasing amount of SOC was stored in the ocaled particulate organic matter fraction at ABL, which indicated a high efficiency for SOC stabilization. Overall, our findings support the suitability of black locust trees for increasing the soil fertility of the reclaimed mining substrate and, consequently, the high potential for SRACS to serve as an effective recultivation measure at marginal sizes. | 本研究の目的は、ドイツ・ブランデンブルク州にある採服後の限界地の土壌肥沃度を改善するための短輪地作付けシステム(SRACS)の可能性を評価することである。そこで、土壌有機炭素の貯蔵量と密度分画による安定化の程度に対する結构な短期的効果を明らかにするために、初期土壌条件下でSRACSフィールドトレイルの件物路地(AC) グラックローカス環様(AB)を毎年期またした。その結果、ABLにおいてSOCと熱水油出生有機炭素(HWEOC)の有意な増加が検出され、それは主に土壌泉上層(Pellem)に限定されたものであった。6年後のABLにおけるSOCおよびHWEOCの書積重はそれぞれのらMsおよび46kghu-1年であり、ACよりも高い値であった。また、ABLのリッター層には関係を密度分割すると、全気のの大部分(47分割)ARLでは開発と大部代制の場合が表別であるた。一方、ABLでは開発に上部すると、全気の大部分(47分割)、ACとりを高い地でカーストリーが鉱地が開かに入いていまり、ACとの大部分(47分割)、ストリーが鉱しが表別では1分割であると、大田のことから、ブラックローカストツリーが鉱山が増や上環形皮を与り上でものたまり、大田の一カストツリーが鉱山が増や上環形皮を与り上でものに表しており、ストリーが鉱山が増や上環形皮を与り上でものに表しており、その結果、SRACSが限界集落における有効な再排作手段として機能する可能性が高いことが示まれた。 | New Forests | Michael Kanzler Christian Böhm Dirk Freese | 2021 | 52 | | 47-68 | EN | ドイツ ブランデンブルク州 鉱山跡地 | Robinia pseudoacacia L |

| | | | | | | | | | Τ | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------|------|-----|----|--------|----|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Assessment of Forest Ecosyste Development in Coal Mine Degraded Land by Using Integrated Mine Soil Quality Index (IMSQI): The Evidence from India | Research highlights: (1) Ecosystem development assessed in an afforested post-mining site. (2) Soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) stock reached close to the reference forest site after 25 years of afforestation. (3) Integrated mine soil quality index is developed to assess the reclamation success. Background and Objectives: Estimation of the mine soil quality is one of the most important criterions for evaluating the reclamation success. Background and Objectives: Estimation of the mine soil quality is one of the most important criterions for evaluating the reclamation success and restoration of novel ecosystems of the post-industrial degraded lands. The aim of this long-term experiment was to investigate the influence of revegetation or Technosol (defined as anthropogenis soil resulted from reclamation or mine spoil materials) as the basic ecosystem development. Materials and Methods: A field study was carried out in the chronosequence afforested post-mining sites (5, 10, 25 years) and compared with natural forest site. We assessed the physicochemical properties and untrient stock of mine soil and estimated general mine soil quality via using an integrated mine soil quality index (MSQI). The studies were fully randomized in the chronosequence of afforested mine soil quality index (MSQI). The studies were fully randomized in the chronosequence of afforested mine soil quality index (MSQI). The studies were fully randomized in the chronosequence of afforested mine soil quality index (MSQI) were recovered with the increase age of reclamation. Soil organic carbon (SOC) stock significantly increased from 1.06 Mg N ha ⁻¹ in 5 years to 4.45 Mg N ha ⁻¹ after 25 years of afforestation. Likewise, total nitrogen (TN) stock significantly increased from 1.06 Mg N ha ⁻¹ in 5 years to 4.45 Mg N ha ⁻¹ after 25 years of afforestation. Likewise, total nitrogen (TN) stock significantly increased from 1.06 Mg N ha ⁻¹ in 5 years to 4.5 Mg N ha ⁻¹ after 25 years of afforestation. Likewise, total nitrogen (TN) st | 研究のハイライト(1) 採掘後に植林された場所での生態系の発達を評価した。(2) 土 壌有機炭素 (SOC) および全窒素 (TN) 蓄積量は、25年間の植林後、基準森林サイ トとほぼ同じになった。(3) 独の立ての成功を評価するための統合的な鉱山は場品質 指標を開発した。背景と目的 鉱山土壌の品質評価は、産業革命後の死廃地における 増立の成功や新規生態系の復元を評価する上で最も重要な基準の一つである。本実 繋では、テクノソル (鉱山廃業物の理立により生じた人場的な土壌)を基本生態系 として、緑化の影響を調査することを目的とした長期的な実験である。材料と方法 を、10年、25年の時系列で組体された鉱山跡地において、自然林と比較した野外期 養を実施した。鉱山土壌の物理化学的性質と栄養分を評価し、統合鉱山土壌品資料 数 (MSQI) を用いて一般的な鉱山土壌の高度を推定した。本研究は、鉱山地・環島資料 割ける植林地の時系列を完全にランダム化した。結果 栄養塩の動態と土壌特性(物 は「会」といる。 選化学的および生物学的) は、埋立年数の増加とともに回復した。土壌有機炭素 (SOC) 蓄積量は、5年後の911 Mg C ha-1から25年後の413 7 Mg C ha-1まで有意に地 加した。同様に、全室業 (TN) 蓄積量も5年間の1.06 Mg N ha-1から25年間の機能し には4.45 Mg N ha-1へと有意に増加した。また、生態系の炭素蓄積量は、6.2 Mg C ha-1 year-1 で増加した。主成分分析 (PCA) に基づく (MSQ)指標を用いて、埋立の成 がを評価した。埋立放血土壌の機全性を支配する最も影響力のある特性は、細粒土 率、含水率、SOC、脱水素酵素活性であった。MSQ (H教園は植生特性によって検証 される。推定されたMSQIは、5年目 (MSQ) 59 (18 数値は植生特性によって検証 本名。推定されたMSQIは、5年目 (MSQ) 50 (MSQ) 59 (18 列間 50 (17 (MSQ) 51 (MSQ) 52 (MSQ) 51 (MSQ) | | Bandyopadhyay Sneha Novo Luis A. B. Pietrzykowski Marcin Maiti Subodh Kumar | 2020 | 11 | 12 | 1310 | EN | インド マディアブラデシュ 州 炭鉱劣化土地 | |
| Effect of Fast-Growing Trees of Soil Properties and Carbon of Storage in an Afforested Coal Mine Land (India) | Surface coal mining activities have numerous consequences on terrestrial ecosystems. Loss of soil and biomass carbon pool due to mining activities is a serious concern in the rapidly changing environment. We investigated the effect of first-growing trees (Albizia lebbeck, Albizia procera, and Dalbergia sissoo) on soil nefrulity and ecosystem carbon pool after eight years of afforestation in the post-mining land of Jharia coalfield, India, and compared with the adjacent natural forest sick. Significant differences in soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) stocks in afforested mine soil and natural forest soils were observed. Greater SOC stock was found under D. sissoo (30.17 Mg·Cha-I) while total N stock was highest under A. lebbeck (4.16 Mg·N·la-I) plantation. Plant biomass accumulated 85% of the natural forest carbon poo after eight years of afforestation. The study concluded that planting fast-growing trees in post-mining lands could produce a promising effect on mine soil fertility and greater carbon storage in a short period. | 表面石炭採掘活動は、地上生態系に多くの影響を及ぼします。鉱山活動による土壌やバイオマスの炭素ブールの喪失は、急速に変化する環境において深刻な懸念事項です。インドのジャリア炭田の採掘後の土地に3年間の植林の後、急速に成長している木(アルビジア・レベック・アルビジア・ブロセラ、ダルバルジア・シスーが土壌形沢度と生態系炭素ブールに及ぼす影響を調査し、隣接する自然林地と比較した。健林された鉱山土壌と天然林土壌における土壌有機炭素(SOC)と総室素(TN)の在庫に有意な差異が認められた。より大きなSOC株はD.シスー(30.7 Mg.C)に由.1)、総以株はムレベック(4.16 Mg.N·ha-l)ブランテーション。植物バイオマスは、8年間の植林後に自然林の炭素ブールのSS%を蓄積しました。この研究は、鉱業後の土地に急速に応長している木を植えることは、短期間で鉱山土壌の肥沃度とより大きな炭素貯蔵に有望な影響を及ぼず可能性があると結論付けた。 | | Jitendra Ahirwal Adarsh Kumar Subodh Kumar Maiti | 2020 | 10 | 10 | | EN | インドジャリア炭田 | Albizia lebbeck Albizia procera Dalbergia sissoo |
| Revegetation type drives rhizosphere arbuscular mycorrhizal fungi and soil organic carbon fractions in the mining subsidence area of northwest China | The rhizosphere arbuscular mycorrhizal fungal (AMF) community and soil organic carbon (SOC) fractions are important in vegetation restoration because they can promote plant growth and environmental improvement in the mining subsidence area of northwest China. However, the effects of revegetation type on SOC fractions and the AMF community remain poorly understood despite their importance in promoting usuatinable environmental development. Here, we have examined the rhizosphere soil AMF community and SOC fractions of five revegetation types comprising Amorpha fruticosa (AF), Hippophae rhammoides (HR), Xanthoceras sorbifolium (XS), Cerasus humils (CH), and Cerasus szechuanica (CS) Revegetation type significantly affected AMF a-diversity, communities and SOC fractions. The contents of soil microbial biomass carbon, dissolved organic carbon, readily oxidized organic carbon and readily extractable glomalin were maximum in HR. We found six genera of AMF (Gomus, Setuellospora, Paraglomus, Claroideoglomus, Ambispora and Diversispora) and Glomus was the most frequently occurring genus in each revegetation type. Nitrogen-fixing plants (AF and HR) may release large amounts of soil nutrients to promote the activity of the soil AMF community. Soil pH, SOC and C:N ratio play key roles in shifting the AMF community. Interactions between the soil AMF community gool organic matter. Our observations may provide fundamental guidelines in the assessment of ecosystem services and sustainable development in vegetation reconstruction in the coal mining subsidence areas | 中国北西部の鉱業沈下地帯において、根圏アーバスキュラー菌根菌(AMF)群集と土壌有機炭素(SOC) 画分は、植物の成長と環境交渉を促進するため、植生回復に重要である。しかし、持続可能な環境開発を促進する上で重要であるにもかかわらず、植生タイプがSOCフラクションおよびAMF群集に与える影響はまだ十分に理解されているいる。 大田 | CATENA | Yinli Bi Li Xiao Chen Guo Peter Christie | 2020 | 195 | | 104791 | EN | 中国北西部 鉱業地盤沈下地帯 | Amorpha fruticosa Hippophae rhamnoides Xanthoceras sorbifolium Cerasus humilis Cerasus szechuanica |
| Carbon Sequestration by 8 Reforesting Legacy Grasslands on Coal Mining Sites | Future carbon management during energy production will rely on carbon capture and sequestration technology and carbon sequestration methods for offsetting non-capturable losses. The present study quantifies carbon sequestration via reforestation using measurements and modeling for recent and legacy surface coal mining grasslands that are re-restored through tree planting. This paper focuses on a case study of legacy coal mining sites in the southern Appalachia the United States. This five million-hectare region has a surface mining footprint of approximately 12% of the land area, and the reclamation method was primarily grassland. The results of the soil carbon sequestration rates for restored forest soils approach 2.0 MgC har-1y-1 initially and average 1.0 MgC har-1 y-1 for the first fifty years after reclamation. Plant, coarse root and litter carbon sequestration rates were 2.8 MgC har-1 y-1 with plant carbon estimated to equilibrate to 110 MgC har-1 after forty years. Plant, root and litter carbon stocks are projected to equilibrate to an order of magnitude greater carbon storage than the existing conditions, highlighting the net carbon gain. Reforestation of legacy mine sites shows carbon sequestration potential several orders of magnitude greater than typical land sequestration strategies for carbon offsets. Projections of future scenarios provide results that show the study region could be carbon neutral or a small sink if widespread reforesting during reclamation was implemented, which is contrary to the business-as-usual projections tha result in a large amount of carbon being released to the atmosphere in this region. | エネルギー生産中の将来の炭素管理は、炭素捕捉と隔離技術および炭素隔離法に依存 し不可燃損失を相殺する。本研究は、樹木植え付けによって再貯蔵される最近のおよ びレガシー表面石炭採環草原の測定値とモデリングを用いて。森林再生による炭素隔 趣を定量化した。本論文は、光関南部の内型はらかしかりで、五炭接縄サイトの多例研 実に焦点を当てた。この5百万-hectare地域は、土地面積の約12%の表面採掘フットブ リントを持ち、そして、再生方法は、主に享原であった。回復森林土に向する土壌炭 素隔離率の結果は、初めはこの以気に加り、てあり、再生後最初の50年間平均10MgChaly1であった。 を持ちました。日本の大きな大きな大きな大きな大きな大きな大きな大きな大きな大きな大きな大きな大きな大 | | Fox James F. Campbell John Elliott Campbell John Elliott | 2020 | 13 | 23 | 6340 | EN | 米国南部 Appalachia 石炭採掘サイト | |

| Restoration of soil carbon with different tree species in a post- | Vegetation restoration tends to enhance soil carbon storage in severely degraded lands, which is of great significance to mitigate climate change. In this study, soil organic carbon, inorganic carbon and soil properties were investigated in a restored post-mining area in Shanxi province, eastern Loess Plateau. Through artificially planting Rhus typhina, Quercus laortugensis and Pinus tabulformis (referred to as RT, QL and PT, respectively), soil water and total nitrogen contents increased significantly. Soil organic carbon in restored sites increased by 101.9% compared with that of a non-restored site. Accumulation of litter and withered root with vegetation succession led to the increases of input of organic matter, which was beneficial to improve soil organic carbon storage. QL had significantly higher organic carbon sequestration arte (1.59 than 1y-y-1) than those of other tree species, which might be attributed to higher nitrogen | (ぶ)の人工種類により、土壌水分量と全窒素量が有意に増加した。土壌有機炭素は、非復元地に比べて101.9%増加した。植生遷移に伴うリターや枯れ根の蓄積が有機物の投入量を増加させ、土壌有機炭素の蓄積を向上させることができた。QLは他の樹種よりも有意に高い有機炭素貯留量 (1.59 tha-l yr-l) を示したが、これは高い | | Meifang Yan | 2020 | 158 | 1 | Null | EN | 中国山西省 採掘跡地 | Rhus typhina Quercus liaotungensis |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----|----|---------|----|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| | content and litter input. Soil inorganic carbon accounted averagely for 70.1% of the total carbon storage. However, re-vegetation had no significant influence on soil inorganic carbon which was closely related with soil parent material and climate. Our results suggested that abandoned mine lands might serve as C sinks through appropriate restoration management. Indigenous QL would be suitable to be recommended as the preferred species for reclamation management of degraded lands. Because of a short duration of restoration, the dynamics of soil inorganic carbon during vegetation succession needs to be further studied to reveal potential C sequestration mechanism in arid and semi-arid regions. | 窒素含有量とリターの投入に起因すると思われる。土壌の無酸炭素は、平均して金 洗素貯蔵量の70½を占めた。 たかし、再植林は土塩無健炭素に大きな影響を与え ず、土壌の母材と気候に密接に関連していた。これらの結果から、廃坑跡地は適切 な移復管理によって炭素吸収源として機能する可能性があることが示唆された。 在 来種のQには、劣化した土地の再生管理に望ましい種として推奨されるのに適してい ると考えられる。また、植生遷移に伴う土壌無機炭素の動態は、乾燥・半乾燥地域 における潜在的女鬼来開致メカニズムを明らかにするために、修復期間が短いため、さらなる研究が必要である。 | engmeering | Lina Fan | | | | | | 床鄉學地 | Pinus tabuliformis |
| Estimation of Above Ground Carbon Sequestration in Trembes (Albizia saman) and Johar (Senna siamea) at PT Multi Harapan Utama, East Kalimantan. | The open-pit mining method has a very large ecological impact. It causes the loss of forest vegetation which decreases CO2 absorption. Measuring the amount of carbon stored in plant biomass can represent the amount of CO2 that can be absorbed in the atmosphere. The objective of this research is to determine the carbon sequestration of Albzia samna and Senna siamea in different age classes at PT MHU Busang Jonggon Block, Kukar, East Kalimantan. Estimation of carbon sequestration in the stands of A. samna S. siamea was carried out by non destructive methods using biomass allometric equations while in understorey and litter using the destruction sampling. The results showed that the highest carbon absorption value of A. saman was 314.28 tons/ha which appear at six years old stands and the lowest value was 19.3.51 tons/ha at three years old stands/while the highest carbon absorption value of S. stands and the papear at nine years old stands and the lowest value was 24.64 tons/ha at three years old stands. A. saman could be more promising plant species than S. siamea according to its higher level of carbon sequestration and their high adaptation level. All data from this study could suggest several information for increasing earbon sequestration level in forest ecosystem as well as achieving forest rehabilitation purpose. | 露天掘り採掘法は、生態学的影響が非常に大きい。これは、COO吸収を減少させる 森林植生の損失を引き起こします。植物、バイオマスに貯蔵される炭素量を測定する ことは、大気中で吸収できるCO2の量を表すことができます。本研究の目的は、東 カリマンタン別クカールのPTMHUプサンジョンプロックで異なる年齢クラスにお けるアルビジア・サマンとセナ・シアメアの炭素隔離を決定することです。ムサマ ンとS.シアメアのスタンドにおける炭素隔値を推定は、砂塊サンプリングを用い て、下踏およびごみ中にバイオマス同種方程式を用いた非破壊法によって行われ た。その結果、ムサマンの最高炭素吸吸値は13.65トン加aであり、9年 がに現れ、長低値は24.64トン加歳であった。ん、サマンは、炭素隔離のあり、9年 がに現れ、長低値は24.64トン加歳であった。ん、サマンは、炭素隔離のあいいぐル とその高い適なレベルに応じて、S.シアメアよりも有望な植物種である可能性があ ります。この研究のすべてのデータは、森林生態系における美工隔離レベルを高 め、森林再生の目的を達成するためのいくつかの情報を示唆する可能性がある。 | Journal of Tropical Biodiversity and Biotechnology | Widya Fajariani Medi Hendra Dwi Susanto | 2020 | 5 | 2 | 115-123 | EN | インドネシア 東カリマンタン州 | Albizia saman Senna siamea |
| Post – Mining soil as carbon 11 storehouse under polish conditions | The main aim of these studies was to determine the potential for carbon sequestration in brown coal open- cast mine by phytoremediation using scots pine (Pinus sylvestris L.) and giant miscanthus (Miscanthus x giganieus) plants. This paper presents relationships between soil organic carbon (SOC) sequestration and carbon phytosequestration in waste dump associated with open-cast lignite mine in Central Poland. The research is the continuation of previously carried out experiments, but was conducted in field conditions. In reclamation of post-mining landscapes, during field experiment, an effect of sewage sludge, compost and lake chalk amendments and in combination of plants was investigated. The impact of soil amendments on carbon stock, CO2 emission reduction, plant biomass production and carbon content in shoots and roots was studied. The highest SOC sock was found in soil treated with sewage sludge (33 Mg*h=1) and compost (45 Mg*h=1) stabilized by lake chalk. These fertilizer combinations also contributed the most in relation to CO2 emission reduction through SOC stock (63 Mg*h=1 and 127 Mg*h=1 respectively). In addition, greater amounts (60–10%) of soil organic matter was converted into humine acids fraction. This phenomenon could be the initial stage of the progressive process of organic matter deposition and carbon in sequestration in post-mining area. Carbon phytosequestration was determined through carbon bound in plant tissues. The highest carbon content (60%) in both plant species was recorded in treatments with sewage sludge and compost with lake chalk. Sublization of compost by lake chalk application was good method to improve the efficiency of carbon sequestration in soil and carbon phytosequestration. Improving the efficiency of these two processes, through skillfully selected soil additives and plant species, may be used on a larger scale in the future as an alternative to the storage of carbon dioxide, especially in degraded areas. | これらの研究の主な目的は、褐炭露天掘り鉱山において、スコッツマツ(Pinus sylvestris L.)とススキ(Miscanthus x giganteus)植物を用いたファイトレメディエーションによる炭肿管間の可能性を明らかにすることであった。本陰文では、ボーランド中央部にある露実想り褐炭鉱山の廃棄物処理場における土壌有機炭素(SOC)所留と炭素ファイトセクステンションの関係について述べる。この研究は、以前に行われた実験の提続であるが、フィールド条件下で実施された。足斑後の景観の再生において、下水汚泥・堀漁、湖泊日亜の改良と植物との組み合わせの別議量、結婚がイマス生産量、新生化の炭素含青量に与る必整について検討した。下水汚泥(33 Mg*ha-1)と堆肥(45 Mg*ha-1)で安定化処理した土壌で、最も高いSOCストックが確認された。また、これらの肥料の組みつかけは、SOCの蓄積によるCO2 採出豊削減に最も貢献した。また、これらの肥料の組みのが確認された。また、これらの肥料の組みの対した土壌で、最も高いSOCストックが確認された。また、これらの肥料の組みの世は、ズストマイニング地域におりたる機構物の60-100%が原植機態向/に変換された。この現象は、ボストマイニング地域におりる有機物の60-100%が原植機態向が上変換された。この現象は、ボストマイニング地域におったが最近に最近り最近に表現方を表示して、大変を表示した炭素によって決定された。下水汚泥と湖河の亜を用いたコンボスト処理には、両植物理を表も高い炭素の方代形式の大変を受け、が記録された。湖沼白亜処理によるコンボストの安全化は、土壌中の炭素料で製造を増加された。湖沼白亜処理によるコンボストの安全化は、土壌中の炭素料で関と炭素・ファイトセクステレーションボストの安全化は、両値物理を表高が皮素含着量(600%)が記録された。湖沼白亜処理によるコンボストの安全化は、土壌中の炭素料を増加されていた。地では、大変では、大変では、大変では、大変では、大変では、大変では、大変では、大変 | Journal of Environmental Management | Agnieszka Placek-Lapaj Anna Grobelak Krzysztof Fijulkowski Bal Ram Singh Asgeir R. Almás Malgorzata Kacprzak | 2019 | 238 | | 307-314 | EN | ポーランド 褐炭露天掘り鉱山 | Pinus sylvestris L Miscanthus x giganteus |
| Soil Reclamation of Abandoned Mine Lands by Revegetation in 12 Northwestern Part of Transybania: A 40-Year | Mining activities for mineral resources over the years have resulted in major soil damage. Due the removal process of desired mineral materials, soil textures have been destroyed, various nutrient cycles have been disturbed, and microbial communities have been altered, affecting vegetation and leading to the distruction of wide areas of land in many countries. Therefore, soil restoration of abandoned mining lands became a very important part of sustainable development strategies and also prescribed by law in several countries. The main aims of this study were to develop an ecological land restoration strategy to the degraded lands the former knoin, quarts sand, and iron mining located in Aghires and Cápsus Mare in Cluji County, in the Northwestern part of Transylvania from Romania and monitor soil quality changes over 40 years. To assess the effectiveness of soil reclamation of mine lands, 30 soil profiles were examined and 450 soil samples were collected from three depths (0–20 cm, 20–50 cm, and 50–80 cm) and subjected to physical and chemical analyses, and compared for their sustainable and beneficial use. All the proposed plant covern featural grassland, pasture cover, black locust, Norway spruce, and scots pine) significantly improved the overall soil quality with the increasing years of reclamation following various patterns. Pasture cover most significantly enhanced the soil's microbial activity, organic arzbon, infrespen, phosphorus, and potassium content followed by natural grassland. The results of this study show that considerable changes in soil quality was reached by revegetation of these abandoned mine lands restoring their ecological integrity and self-dustainabile. | 長年にわたる鉱物資源の採掘活動は、土壌に大きなダメージを与えてきました。目的の鉱物を取り除く過程で、土壌の質感が破壊され、さまざまな栄養循環が乱され、微生物解析が定化し、植生に影響を与え、多くの国で広な女土地の破壊につながったのです。そのため、放棄された鉱山用地の土壌修復は、持続可能な開発機関で、またいくつかの国では法律で規定されている計事。本研究の主な目的は、ルーマニアのトランシルバニア地方北西部に位置するクルージュリアイシンシーと、日本語のでは、後紙石の採掘物に対する生態学的土地修復戦略を開発し、44年間の土壌品質変化をモニターすることである。鉱山跡地の土壌再生の効果を評価するため、30の土壌プロフィールを調査し、3つの深き(0-20cm、20-30cm)から450の土壌プレンイルを採取して物理・化学分析を行い、その特続的かつ者基な利用法を比較検討した。提案したすべつ機物被優(自然東地、女型地被優)のイクダビ、ノルマイスブルース、スコッツマツ)は、様々なパターンで理立年数が増えるにつれて全体的に土壌品質を力を消費を表し振動にしませ、大阪で大阪では、大阪で大阪で大阪で大阪で大阪で大阪で大阪で大阪で大阪で大阪で大阪で大阪で大阪で大 | Sustainability | Mihai Buta Gheorghe Blaga Laura Paulette Ioan Păcurar Mrs. Sanda Rosca Orsolya Borsai Florina Grecu Pauliue Ecaterina Sinziana Cornel Negrușier | 2019 | 11 | 12 | 3393 | EN | ルーマニア トランシルバニア カオリン・珪砂・鉄 鉱石採掘跡地 | natural grassland pasture cover black locust Norway spruce scots pine |

| Dynamic Changes in Carbon Sequestration from Opencast 13 Mining Activities and Land Reclamation in China's Loess Plateau | Opencast coal mining causes serious damage to the natural landscape, resulting in the depletion of the carbon sequestration capacity in the mining activity. There are few studies on the variation of carbon sequestration capabilities caused by land use changes in opencast mining areas. This paper uses six images were used to quantify the changes in land use types from 1986 to 2015 in the Pingshuo mining area in northwest China. At the same time, used statistical analysis and mathematical models to study soil and vegetation carbon sequestration schlists a significant downward trend from 4.58 × 106 Mg in 1986 to 3.78 × 106 Mg in 2015, with the decrease of soil carbon sequestration accounting for the largest proportion. The carbon sequestration of arable land accounted for 51% of the total carbon sequestration in the mining area, followed by grassland (31%) and forestland (18%). Land reclamation contributed to the greatest increase in carbon sequestration of arable land from 17,890. 15 Mg (1986) to 27,837.95 Mg (2015). Additionally, the downward trend in the carbon sequestration capacity of the mining ecosystem was mitigated after 2010 as the positive effects of land reclamation gradually amplified over time and as the mining techniques were greatly optimized in recent years in the Pingshuo mining area. Thus, terrestrial carbon sequestration can be improved through land reclamation gradual and in the future. | オープンキャストの石炭採掘は、自然景観に深刻なダメージを与え、その結果、採品活動における炭素貯留能力が枯渇する。オープンキャスト採服場における土地利用変化による炭素隔離能力の変動に関する研究はほとんどない。本施文では、中国北西部にある平朔鉱区における1986年から2015年までの土地利用形態の変化を定量化するために統計分析と数理モデルを使用した。同時に、土壌と植生の炭素貯留を研究であっために統計分析と数理モデルを使用した。で、その結果、投資を表しの炭素吸収量に1966年の18%を分割を対していることが明らかになった。鉱区の炭素吸収量に必め対象地の大量を大き大量を占めていることが明らかになった。鉱区の炭素吸収量に占める耕地の割割を1596~東 18 18 18 19 18 14 14 14 15 18 18 19 18 14 14 14 15 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 | | Boyu Yang Zhongke Bai Yingui Cao Feng Xie Junjie Zhang Yannan Wang | 2019 | 11 | 5 | 1473(16頁) | EN | 中国北西部 露天石灰採瓶跡地 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----|---|-------------|----|----------------------------------------------|
| Reclamation of coal mine spoil and its effect on Technosol quality and carbon sequestration: a case study from India | A field study was carried out to assess the impact of revegetation on Technosol quality in the post-mining sites (Central Coalfield Limited, India). The study evaluated community structure, biodiversity, Technosol quality, and carbon (C) dynamics in the post-mining ecosystem (PME). The multivariate statistical tool was too identify the key soil properties, and soil quality was evaluated by using Technosol quality index (TQI). One unreclaimed site (0 years) and four chronosequences revegetated coal mine sites (3, 7, 10, and 15 years) were studied and compared with an undisturbed forest as a reference site. Plant biodiversity indices (Shannon index of diversity (2.42) and Piclois' evenness (0.97) and Patric richness (12)) were highest in 15-year-old revegetated sites. Soil physicochemical and biological properties were recovered with the revegetation age. Soil organic (e) (SOC) stock significantly increased from 0.75 Mg C har 1 in 3 years to 7.60 Mg C har-1 and prist of the properties were recovered at a rate of 5.38 Mg C har-1 year-1. Soil CO2 flux was significantly increased from 0.27 µmol CO2 m ⁻² s ⁻¹ In unreclaimed sites to 3.19 µmol CO2 m ⁻² s ⁻¹ in 15-year-old revegetated site. Principal component analysis (PCA) showed that dehydrogenase activity (D1A), available nitrogen (N), and silt content were the key soil parameters that were affected by reclamation. A 15-year-old Technosol had a greater TQI (0.78) compared to the control forest soils (0.64) that indicated the suitability of revegetation to recuperate soil quality in mining-degraded land and to increase C sequestration potential. | 接題後のサイト(Central Coalfield Limited、インド)のテクノソル品質に対する植生 回復の影響を評解するためにフィールド語素が実施されました。この研究では、採 機後の生態系(PME)における野巣構造、生物を様性、テクノソルの品質、および 放素(C)のダイナミクスを評価しました。多変量能計ツールを使用して主要な土壌 物性を特定、テクノソルの品質、おおした。 を変量を計ツールを使用して主要な土壌 物性を特定、テクノソルの品質、おおした 使用して主爆の課度計画化。また1、0の未再生サイト(0年)と4つのクロノシーケンスで精整生された放散サイト(3、7、10、および15年)が設金され、参照サイトとしての乱されていない森林と比較されました。、地物の生物を特性情数(シャノンの多様性情数(242)とビエルーの均一性 (079) およびパトリックの豊富さ(12) [は、15年前の種生地で最も高かった。土壌の物理化学的および生物学的特性は、種生は国産年齢とともに回復しました。 は 場内では、19年間では、19年間で、19年間で、19年間の種生地で最も高かった。土壌の砂理(19年) ストローリー・19年間の種間を強、3年間で、19年間の単一とは、19年間で、19年間の単一とは、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19年間で、19 | Environmental Science and Pollution Research | Jitendra Ahirwal Adarsh Kumar Marcin Pietzykowski Subodh Kumar Mniti | 2018 | 25 | | 27992-28003 | EN | インド探炎 |
| Development of Technosol properties and recovery of 15 earbno stock after 16 years of revegetation on coal mine degraded lands, India | Surface mining is recognized as one of the essential anthropogenic activities which drastically disturbs the ecocystem. To offset the impacts of surface mining, revegetation is widely used to restore the disturbed landscape. The present field study was carried out to assess the status of an ecosystem structure, soil quality and C pool of the 16-years old revegetated post-mining site and compared to an undisturbed forest site. For this, physiocehemical, bloogical and hydrological properties of Technosobs were analyzed, and differences in these parameters were quantified. Vertical distribution of soil nutrients (NPK), soil organic carbon (SIC) were assessed in the upper 100 cm (at an interval of 20 cm) of Technosobs and forest soils. After 16-years of revegetation, autochthonous tree species comprise 17% of the total tree population on the reclimed site. Technosol quality was increased in terms of accumulation of SOC, available nitrogen (N), and available phosphorus (P). SOC and total N stock recovered in Technosol were 70% and 47% of the reference forest soils, respectively. Likewise, after 16-years of revegetation, ecosystem C pool was 33% of the undisturbed forest site. Increase in C pool can be attributed to the development of palnt biomass C, accretion of SOC and litter C pool. The study provides an insight into the magnitude of nutrient content and development of cooxystem C pool in a reconstructed ecosystem and importance of revegetation of post-mining sites to offset CO2 emission. The study concluded that plantation of multipurpose tree (MPT) species will improve Technosol quality, is, dicilitates natural colonization of native tree species and increases ecosystem C pool along the age of revegetation. | 露天掘りは、生態系を劇的に乱す重要な人為的活動の1つとして認識されています。 露天掘りの影響を相殺するために、権住国復は、乱れた風景を復元するために広く 使用されています。現在のフィルト間渡さは、自年前に種と回復した採掘後のサイトの生態系構造、土壌の質、Cブールの状態を評価し、乱されていない森林サイトを 比較するために実施されました。このために、テクノソルの物理化学的、生物が よび水文学的特性が分析され、これらのバラメーターの違いが定量化されました。土壌養分 (NPK)、土壌権機度素 (SGC) はおむては無機機業者 (SGC) に、土壌を分 (NPK)、土壌を構成素 (SGC) はおむては無機機業素の施合分布 (SGC) は、テクソソルと森林土壌の上部100 cm (20 cm間隔) で評価されました。。16年間の緑化の後、自生樹種は、埋め立て地の総材木口の17%を亡めむいます。テクノソルの品質は、SOC、利用可能な窒素(パ)、および利用可能なリン (P)の香精に関して同上しました。テクノソルで回収されたSOCと総が蓄積重は、 マンの開発。SOCの単加、まなリリターでブールの増加は、植物バイオマ スでの開発。SOCの増加、およびリターでブールに起因する可能性があります。この 研究は、再構象された生態系における栄養者含有量と生態系でブールの発達の大き よおよびGOSは指と相様でもための経理機のサイトの再植生の重要性についた 高端とは、再様をされた生態系における栄養者含者と患系でブールの発達の大き よおよびGOSは指と相様でもための経理機のサイトの再植生の重要性についた 高端といて生態系でブールの発達の大き なおは、デクノソルの品質を向上させ、在来樹種の自然植民地化を促進し、植生回復の 郷村に沿って生態系でブールを増加させます。 | CATENA | Jitendra Ahirwal Subodh Kumar Maiti | 2018 | 166 | | 114-123 | EN | インド 炭鉱荒廃地 |
| Long term carbon sequestration potential of biosolids-amended 16 copper and molybdenum mine tailings following mine site reclamation | Management and reclamation of industrial mine sites for carbon (C) sequestration is an emerging technique for offsetting anthropogenic C emissions. Land application of municipal biosolids is an effective method for amending closed tailings storage facilities and providing the nutrients to establish a vegetative cover. Biosolids applications can influence the C sequestration potential of tailings and other mine wastes at the onset of reclamation by initiating soil development processes and enhancing primary productivity, thereby leading to increased accumulation of soil organic carbon (SOC) over time. The short term ecological benefits of biosolids applications are well understood, but the long-term (>10 years) effects of biosolids benefits of biosolids applications are well understood, but the long-term (>10 years) effects of biosolids application in 1998 at increasing rates (0, 150 and 250 dry Mg ha—1) on the C sequestration potential of a copper and molybedrum mine tailings site in the southern interior of British Columbia, Canada that is currently undergoing reclamation to a pasture-based ecosystem. We assessed changes in C pools, plant productivity and select soil physiochemical parameters at an established research site at the Hethlehem Tailings Storage Facility over a 13-year period spanning from 1998 to 2011. Tailings total C and N concentrations increased with time and were highest at the when biosolids were applied at 250 Mg ha—1 after 13 years of reclamation. The net SOC sequestration rates (the C sequestration potential) ranged from 0.72 to 6.3 Mg ha—1 have highest at the 250 Mg ha—1 pupication rate. Aboveground plant biomass was substantially higher on biosolid-amended tailings (6 and 6.7 Mg ha—1 for B150 and B250, respectively) compared to the unamended tailings (0.3 Mg ha—1), which suggests that the increase in C pools was a direct result of organic matter inputs from enhanced tailings (6 and 6.7 Mg ha—1 for B150 and B250, respectively) compared to the unamended tailings (0.3 Mg ha—1), which sugg | 展素管理を目的とした驅血師の管理・再生は、人為的な販素排出を相談するための 動たな手法の一つなる。自治体によるパイオンリットの絶上軟件市は、開鍵尾鉱庁 である。パイオンリットの飲布は、は緑原放フロケの時間がある。 ある。パイオンリットの飲布は、は緑原放フロケの時間が高くないである。パイオンリットの飲布は、は緑原放フロケの のことによって、埋め立て開始時に尾船やその他の艦山廃棄物のの隔離の可能性も影響 響を与え、それによって上場有機炭素(SOC)の時間的書積を増加させることがで 響を与え、それによって上場有機炭素(SOC)の時間的書積を増加させることがで である。パイオンリッド施門は、60別的では一般である場合では、10分割の いては十分に研究されていない。この長期的な研究の目的は、カナダのブリティッ シュ・コロンピア州南部にある銅・モリプテン鉱山尾鉱を牧草地に再生する際に、 パイオソリッドが埋め立てられた鉱山土壌に及ぼす美期的(10年以上)な影響につ いては十分に研究されていない。この長期的な研究の目的は、カナダのブリティッ シュ・コロンピア州南部にある銅・モリプテン鉱山尾鉱を牧草地に再生する際に、 どのような影響を及ぼすが表調べることである。1998年から2011年の13年間、 どのような影響を及ぼすかを調べることである。1998年から2011年の13年間、 といん鉱海平散施設に設置された研究サイトにおいて、炭素ブール、植物生産性、 よりな野産を及ぼすかを調べることである。1998年から2011年の13年間、 といん域海中がランマクの変化を評価した。鉱海の全とN瀬原は時間ともに増加 に、パイオソリッドが20別を加って無している。1998年から2011年の13年間、 はバイオソリッドが20別を加って無している。1998年から155 Mg C は、パイオソリッドが20別を、10分割のとは、1979年の は、1979年のであり、250 Mg hall いまが、1979年の 地域海岸あたりの27 Mg に背間、パイオソリッドの が最上される。パイオソリッドを が開かたり、アイオンリッドを が開かたり、アイオンリッドを は、1980年のままが、1970年のままが、1970年の は、1980年のままが、1970年のままが、1970年の は、1980年のままが、1970年のままが、1970年の は、1980年のままが、1980年のままが、1970年の は、1980年のままが、1970年のままが、1970年の は、1980年のままが、1970年のままが、1970年の は、1980年のままが、1970年の は、1980年のままが、1970年の は、1980年のままが、1970年の は、1980年のままが、1980年の は、1980年のままが、1980年の は、1980年のままが、1980年の は、1980年のままが、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、1980年の は、198 | | Paul M. Antonelli Lauchlan H. Fraser Wendy C. Gardner Klass Broersma John Karakatsoulis Michelle E. Phillips | 2018 | 117 | | 38-49 | | カナダ ブリティッシュ・コ ロンピア州 県・モリブデン鉱山 尾鉱 |

| | 1 | 株式の標準体化性での環境体の大地型 1 での一場社の開発・・・・・・・ | | 1 | 1 | _ | , , | | | Г | T. |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----|-----|-----------|----|----------------------------|---------------------------------------------------|
| Assessment of carbon sequestration potential of revegetated coal mine overburden dumps: A chronosequence study fron tropical climate | Development of secondary forest as post-mining land use in the surface coal mining degraded sites is of high research interest due to its potential to sequester atmospheric carbon (C). The objectives of this study were to assess the improvement in mine soil quality and C sequestration potential of the post-mining reclaimed land with time. Hence, this study was conducted in reclaimed chronosequence sites (young, intermediate and old) of a large open cast coal project (Central Coal Fields Limited, Jharkhand, India) and results were compared to a reference forest site (Sal forest, Shorea robusta). Mine soil quality was assessed in terms of accretion of soil organic carbon (SOC), available nitrogen (N) and soil CO2 flux and with the age of revegetation After 14 years of revegetation. After 14 years of revegetation for SOC stock was estimated from year (Fold, respectively) and found equivalent to the reference site. Accretion of SOC stock was estimated from Mg C har-1 to 90 Mg C har-1 (30-333 Mg CO2 har-1) with an average rate of 6.4 Mg C har-1 year-1. Above ground biomass contributes maximum C sequestrate (Sofs) in revegetation site. CO2 flux increased with age of revegetation and found 11, 33 and 42 Mg CO2 har-1 year-1 in younger, intermediate and older dumps, respectively. Soil respiration in revegetated site is more influenced by the temperature than soil mosisture. Results of the study also showed that trees like, Dalbergian sissoo and Heterophragma adenophyllum should be preferred for revegetation of mine degraded sites. | 地表の採炭氷化地での採掘後の土地利用としての二次株の開発は、大気中の炭素 (C) を隔隔する可能性があるため、研究の関心が高い、この研究の目的は、採掘後 の埋め立て地の鉱山土壌の費とに隔離の可能性の改要を経時的に評価することでし、 たしたがって、この研究は、大規模な露来掘り石炭ブロジェクト(Central Coal Fields Limited、インド、ジャールカンド)の再生されたクロノシーケンスサイト(若 しい、中間、古い)で実施され、結果が多頭者はサイト(Suá莽林、Shora robusta)と 比較されました。 鉱山の土地の質は、土は乗機炭素の悪剤の製成から評価されま した(SOC)、利用可能な窒素(N) および土壌(O2フラックスと植生回復の年齢。 は年間の種生回復後、SOCとNの濃度はそれずれる倍と6倍に増加し、参照サイトと同 等であることがわかりました。SOCストックの増加は1分級で加-1年に入土性変され がた。2~14年の植生回復後、FOEと外の濃度は大の大の大の大の大の大の大の大の大の大の大の大の大の大の大の大の大の大の大の | Journal of | Jätendra Ahirwal Subodh Kumar Maiti | 2017 | 201 | | 369-377 | EN | インド (ジャールカンド州) 採族劣化地 | Dalbergia sissoo Heterophragma adenophyllum |
| Edaphic Conditions, Aboveground Carbon Stocl Plant Diversity on Nickel M Tailings Dump Vegetated v Senegalia polyacantha (Wil Seigler & Ebinger | diversity. The study was conducted on mcket failings dump revegetated with Senegatia polyacantha aged 8 of 10 and 11 years in Zimbabwe. Results showed high bulk densities and pH values; low organic carbon; the study was conducted on mcket failings dump revegetated with Senegatia polyacantha aged 8 of 10 and 11 years in Zimbabwe. Results showed high bulk densities and pH values; low organic carbon; the study was conducted on mcket failings dump revegetated with Senegatia polyacantha aged 8 of 10 and 11 years in Zimbabwe. Results showed high bulk densities and pH values; low organic carbon; the study was conducted on mcket failings dump revegetated with Senegatia polyacantha aged 8 of 10 and 11 years in Zimbabwe. Results showed high bulk densities and pH values; low organic carbon; the study was conducted on mcket failings dump revegetated with Senegatia polyacantha aged 8 of 10 and 11 years in Zimbabwe. Results showed high bulk densities and pH values; low organic carbon; the study was conducted on mcket failings dump revegetated with Senegatia polyacantha aged 8 of 10 and 11 years in Zimbabwe. Results showed high bulk densities and pH values; low organic carbon; the study was conducted on mcket failings dump revegetated with Senegatia polyacantha aged 8 of 10 and 11 years in Zimbabwe. Results showed high bulk densities and pH values; low organic carbon; the study was conducted on mcket failings dump revegetated with Senegatia polyacantha aged 8 of 10 and 11 years in Zimbabwe. Results showed high bulk densities and pH values; low organic carbon; the study was conducted on mcket failings dump revegetated with Senegatia polyacantha aged 8 of 10 and 11 years in Zimbabwe. Results showed high bulk densities and pH values; low organic carbon; the study was conducted on mcket failings dump revegetated with the study was conducted with the study was | 鉱山跡地では、緑化により地力向上が促進され、生物多様性が向上する。本研究の 目的は、地形条件、地上部の炭素蓄積量、および植物の多様性の状況を明らかにす ることである。本研究は、ジンバブエの5年、9年、10年、11年経過したSenegnlia polyacantha で緑化したニッケル鉱滓堆積場において実施された。その結果、高い端 比重とpti値、低い有機炭素、Kの欠乏、Nic Asの有毒レベルが示され、鉱滓が植生 左定常させるにはまだ限界であることが示唆された。また、本質種の生息数が少な いことから、このような種が生息できるような環境ではないことが示唆された。 | Land Degradation & Development | Mukaro Edeth Nyakudya Innocent Wadzanayi Jimu Luke | 2017 | 28 | 5 | 1641-1651 | EN | ジンパブエ ニッケル鉱山 | Senegaliapolyacantha |
| Soil organic carbon and nit pools in reclaimed mine so 19 under forest and cropland ecosystems in the Loess PI China | N pools differed significantly among forest RMSs, ranging from 11.66 to 69.10 Mg ha-1 and 945.14 to 3145.83 kg ha-1, respectively, among which R. pseudoacacia-P. tabulaeformis forest had the greatest | 選天圏リ炭鉱の埋立ては、多化した地料料を大幅に改善する。中国関土高原の埋立鉱山土壌に計ら産業(ごりまむ写業 代)ブールの長期的な変化については、 ・ 大学に解明されたとは言えない、本研究では、山西省平陽震天圏り増設において、6 ・ 機関の埋立体(独立年数22~5年)と建陽の毎年代別地立場や(独立年数2、7、8 ・ 年間で、日本の大学には、日本の大学には、一般では、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、一般ないのでは、日本の大学には、一般ないでは、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の大学には、日本の | | Ye Yuan Zhongqiu Zhao Pengfei Zhang Luming Chen Ting Hu Shuye Niu Zhongke Bai | 2017 | 102 | | 137-144 | EN | 中国山西省需天掘り炭鉱 | R. pseudoncacia P. tabulae formis |
| The effects of tree species substrate on carbon seques 20 and chemical and biological properties in reforested pos mining soils | The effects of tree species, parent material (substrate), and faunal bioturbation on carbon sequestration an chemical and microbial properties in soil were studied at three post-mining sites (Piaseczno, Szezakowa, and Beckhatów) in Poland that were reforested with pine, birch, oak, and adder. The samples were taken from the 0-5-cm mineral soil horizons beneath the litter layer. The samples were analyzed for pH, organic C and total N content, texture and based exchange cations. Microbial analyses included determination of carbon states of the content of th | 位、様、便、ハンノキで再接体されたボーランドの3つの鉱山勝地(Piaseczno、 Szczakowa、Bekhatów)で、機種、母材(基盤)、動物群の生物残乱が土壌中の炭末所留と化学・機生物特性に与える影響について研究した。サンブルはリター層の下にある0-5cmの鉱物質土壌層から寝取された。試料は、plt、有機と全分量、テクスチャー、および塩基交換解インについて分析された。機生物分析には、エルゴステロールとリン脂質脂肪酸(PLFA)プロファイルの測定が含まれる。土壌薄片は、土壌体間のうちミズの安や大型動物の連動物が占める場合で動物相の活性度を表すために行われた。土壌の同は4歳のから6、駐土は15から16%であり、土壌の質は場所によって大きく異なっている。CNUセヤその他の土壌特性は、樹種と基質単体よりも、樹種と基質の組み合わせに依存することが明らかとなった。 炭素量とCストックは、土壌大動物相による生物機乱と正の相関があった。テた、柴素量は真菌とバクテリアの比率(FBE)と負の相関があった。で、炭素素は直貫度にクトラリアの比率(FBE)と負の相関を手化また、生物産と微生物量には正の相関があり、FB比には食の相関を手化た。また、生物産上後生物生物量には正の相関があり、FB比には食の相関があった。 大き、生物産と微生物生がよりまた。 | | Agnieszka Józefowska Marcin Pietrzykowski Bartłomiej Woś Tomáš Cajthaml Jan Frouz | 2017 | 292 | | 9-16 | EN | ボーランド鉱山跡地 | pine birch oak akler |
| 21 Biosolids Enhance Mine Si Rehabilitation and Revegets | Globally, around 10 × 107 tons year—1 of biosolids is generated from wastewater treatment facilities. Biosolids contain significant amounts of organic matters and nutrients. Therefore, biosolids can be used to improve infertile and degraded soils in certain mine sites. Shortfalls in topsoil, heavy metal-rich tailings an drainage, residual soils with poor physical properties, and low-organic matter soils are common consequences of degraded mine soils. These issues adversely affect soil health including microbial activity, flora, and fauna, thereby hindering reestablishment of the lost ecological integrity. Rehabilitation has been achieved in a number of mine sites by incorporating biosolids, which demonstratec | 世界では、排水処理施設から到10・10下ンボーのパイオソリッドが発生しています。 バイオソリッドには、大量の有機物や来接が含まれています。そのため、バイオ ソリッドを利用することで、起い跡地の不も立場や劣化したは単な密性とは要な密もすることができます。表土の不足、重金属を今を含む鉱洋や排水、物理的性質の悪い疾留土 域、低有機動・環は、劣化した鉱山土壌の一般的な結果です。これらの問題は、微 生物の活動、植物材、動物相を含む土壌の健全性に悪影響を及ぼし、失われた生態 系の健全性の回径を妨げている。 バイオソリッドを使用することで、多くの鉱山跡地が修復され、持続可能な修復が 実現しました。このような再生事例では、劣化した土地の生物学的、化学的、物理 が特性が改善ともることが確認されている。さらに、これらの改善は、発養環境 水質浄化、植物の回復を促進し、土地のレクリエーション価値を高めることで、新 しい生態系の出現に寄与している。 本章では、さまざまな種類のバイオソリッドの組成とその生成、利点、使用に関す る現行の規制、特に鉱山跡の修復と人間の健康への懸きを含む環境汚染問題につい で説明する。最後に、環境問題を参り収集り用、バイオソリッドを特検的に利用す | Environmental Materials and Waste | H. Wijesekara N.S. Bolan P. Kumarathilaka N. Geekiyanage A. Kunhikrishnan B. Seshadri C. Saint A. Surapaneni M. Vithanage | 2016 | | | 45-71 | | 鉱山跡地 | バイオソリッド |

| | I | ************************************** | 1 | | | _ | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------|-----|---|---------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Reclamation patterns vary carbon sequestration by trees and soils in an opencast coal mine, China | Reforestation is often recommended for ecological restoration in mining areas because of tree's high stand-level productivity and satisfied carbon (C) and other nutrient sequestration objectives. However, the C sequestration efficiency of different plantation patterns or different tree species is rarely understood. In order to get insight of the C sequestration efficiency of different plantation patterns or different tree precise is rarely understood. In Pingshuo openeast coal mine, Shanxi Province, China, three different reclamation patterns in Pingshuo openeast coal mine, Shanxi Province, China, three different reclamation patterns in Pingshuo openeast coal mine, Shanxi Province, China, three different reclamation patterns (developed for Y years) and Pingshuo openeast coal mine, Shanxi Province, China, three different reclamation patterns (developed for broadleaf monoculture forest R. pseudoacacia P. tubulaeformis (Plot code: BN, understand) and the standard of the results showed that tree volumes and biomass differed significantly after 17 years' succession, from 21.58m3 and 36.02Mgha—1 of the broadleaf monoculture forest (BR) to 37.20 m3 and 48.73Mgha—1 of broadleaf conifer mixed forest (BC). Accordingly, tree C and liter C were observed higher in BC (24.37 and vandard) and BR (18.01 and 1.31Mgha—1). Herb C, however, was observed hower in BC (0.42Mgha—1) and BR (18.01 and 1.31Mgha—1). Herb C, however, was organic matter varied in the order BC (172.16Mgha—1) BM (73.79Mgha—1) BM (73.79Mgha—1) and BR (71.6Mgha—1) and BR (71.6Mgha—1). In regard to the total C distribution, a major portion of the total C consisted of soil C varied from 72.49% in BR to 86.69% in BM) of the total soil C. Consequently, BC sequestrated the highest total C (198.81Mgha—1) by plant, litter and soil, followed by BM (94.43Mgha—1) and BR (71.6Mgha—1). In regard to the total C distribution, a major portion of the total C consisted of soil C varied from 72.49% in BR to 86.69% in BM) of the total soil C. Consequently, BC sequestrated the hig | 全した。その結果、17年後の関係機とハイオマスは、仏楽舞単年後、IBK)の 21.58m2と36.00%pa.1からた成業樹計業機器を終 (BC)の37.20m3と48.73Mgha-1と大きく異なることが明らかとなった。その結果、樹木のCとリターのCはBC (24.37と 2.26Mgha-1)でBM (19.25と1.15Mgha-1)およびBR (18.01と1.31Mgha-1)より高い トが翻究された。ナーカープのCHB (70.00Mgha-1, BPT 3.75Mgha-1) | CATENA | Ye Yuan Zhongqiu Zhao Zhongke Bai Huaiquan Wang Yingzhe Wang Shuye Niu | 2016 | 147 | | 404-410 | 中国山西省 郷天郷り炭鉱 | R. pseudoacacia U. pumila A. altissima P. tabulaeformis |
| Assessing the carbon sequestration potential of poplar and black locust short rotation 23 coppiess on mine reclamation sites in Eastern Germany – Model development and application | In the temperate zone short rotation coppice systems for the production of woody biomass (SRC) have gained great interest as they offer a pathway to both sustainable bioenergy production and the potential sequestration of CO2 within the biomass and the soil. This study used the carbon model SHORTCAR to assess the carbon cycle of a poplar (Populus susvelones Fisch. N populus trichocarpa Torr, et Grey, ex. Androscoggin) and a black locust (Robinia pseudoacacia L.) SRC. The model was calibrated using data from established SRC plantations on reclaimed mine sites in northeast Germany and validated through the determination of uncertainty ranges of selected model parameters and a sensitivity analysis. In addition to reference scenario', representing the actual site conditions, 7 hypothetical scenarios, which varied in climate conditions, rotation intervals, nutnines, and mittal soil organic carbon (SOC) stocks, were defined for each species. Estimates of carbon accumulation within the biomass, the liter layer, and the soil were compared to field data and previously published results. The model was sensitive to annual stem growth and initial soil organic carbon stocks. In the reference scenario net biome production for SRC on reclaimes testically and the state of th | 温帯地域では、持続可能なバイオエネルギー生産とバイオマスや土壌へのCO2吸収の両方を可能にする水質パイオマス生産システム(SRC)が大きな注目を集めています。本研究では、炭素モデルSHORICARを用いて、ボブラ(Populus suaveotens Fisch、X Populus trichocarpa Torr. et Gray ev. Androscoggin とクロイナゴ(Robinia pseudoacacia L)のSRCを用いた。このモデルは、ドイツ北東部の埋立地におけるSRC 植林のデータを用いて松正され、モデルバラメータの不確実性範囲と感度分析により検証された。実際のサイト条件を表す「参照シナリオ」に加え、気候条件、輪作間隔、経働時間、土壌有機炭素(SRC)初期蓄積量を変えた7つの仮想シナリオを、料理とした実施した。バイオマス、リター際、土壌内の炭末積量の模型とは変した。「株団の茎の伸びと土壌有機炭の利用素積量(整度であった。参照シナリオでは、ドイツのルサティア地方の埋立地におけるSRCのバイオーム枠生産量は、36年間でL pseudoacaciaが645 Mg C laより、ボブラが8.9 Mg C ha-l となった。これらの結果は、少なくとも限界的な土地において、SRCが炭末貯留に大きな可能性を持っていることを示唆しているといて、SRCが炭末貯留に大きな可能性を持っていることを示唆している | Journal of Environmental Management | A. Quinkenstein H. Joehheim | 2016 | 168 | | 53-66 | 東ドイツ鉱山跡地 | poplar black locust |
| Rhizosphere soil indicators for 24 carbon sequestration in a reclaimed coal mine spoil | Re-vegetation of mine spoil enhances carbon storage in both above-ground plant biomass and mine soil. The current study was conducted at the coalmine overburden dumps of Jharia Coalfield (India), with the aim to evaluate the effect of different tree species on the rhizosphere soil properties and to identify key rhizosphere soil indicators that influence tree biomass and carbon density. Rhizosphere soil samples were collected from five tree species (Acacia auriculformis, Abbizia lebbeck, Cassia siamea, Delonix regia, and Dalbergia sissoo) of the same age. An area without ground vegetation was selected as a non-rhizosphere soil. The carbon density was higher for D. sissoo and A. auriculformis (39.6–43.7 kg C/tree) and lowest for A. lebbeck (20.7 kg C/tree). Except for C. siamea (4.38%), the total C (TC) content was lower in the rhizosphere than the non-rhizosphere soil. About 50% reduction in TC was observed for A. auriculformis and A. lebbeck and 75% for D. sissoo. Labile C and microbial biomass carbon (MBC) were significantly higher in the rhizosphere soils with the maximum activity under C. siamea (88.48 µg/TF/g/24 h) and D. sissoo (T.195 µg/TF/g/24 h). Three types of carbon accumulation indices (CAI) were calculated: CAI-1, based on TC and labile C; CAI-2, TC, and MBC; and CAI-3, TC, labile C, and MBC. CAIs depending on throsphere effect were generally higher for D. sissoo and C. siamea. Principal component analysis showe that the tree carbon density is closely associated with CAI-3, CAI-2, carbon lability index (CLI), available N, and MBC. Thus, an integrated rhizosphere carbon accumulation index (CAI-3, toda-6, and mne spoils. | 塩山原薬物の再植料は、地上部の植物パイテマスと鉱山土壌の両方において炭素貯蔵を促進する。本研究は、haria成田 (インド)の炭鉱族土ダンブにおいて、異なる 情種が視している。本研究は、haria成田 (インド)の炭鉱族土ダンブにおいて、異なる情種が視囲土壌特性に及ぼす多を多を育好し、樹木バイオマスおよび炭素密度と影響をみばす主要な根間土壌指標を特定することを目的として実施された。根間土壌制料、同した動物の建類の相外、(Acacia auriculformis, Albris hebbeck, Cassia saimea, Debonk regia, Dalbergia sissoo)から採取された。地上槽生がない場所を非規圏土壌として選択した。炭素密度は入ちssooとA、auriculformisで含く、(39-6437)を使っていて、人。 Lebbeckで最も低かった(20.7 kg Clrec)。C、siamea(43 8%)を除き、相圏では非規圏の土壌よりも全で(ICC)含量が低かった。A、auriculformisとA lebbeckでは約50%。D、sissooでは約17%のTCの液少が観察された。また、可溶性炭素と微生物量炭素(MBC)は、非根圏土壌で高く、C、Saimea(88.4 kg PTFig/24 h)と D、sissoo (71.95 pg/TPFig/24 h)で最大の活性となった。3種類の炭素蓄精指数(CAI)を算出した。CAI-litでとlable C、ACI-litでとlable C、ACI-litでLable ACI-lite A | | Sangeeta Mukhopadhyay Reginald E. Masto A. Cerdà Lal C. Ram | 2016 | 141 | | 100-108 | インド Jharin炭田 | Acacia auriculiformis Albizia lebbeck Cassia siamea Delonix regia Dalbergia sissoo |
| VARIABILITY OF SOIL ORGANIC CARBON 25 STORAGE IN DUMP SLOPE OF OPENCAST COAL MINE UNDER REVEGETATION | Vegetation reconstruction is the most direct biological measure and the most effective one as well to control soil and water losses from dump slopes of an opencast coal mine. The knowledge of spatial distribution variability of soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) contents in the dump slope as affected by revegetation patterns is essential to selection of proper vegetation patterns that fit the dump slope. The study area was set in the Heidagiou opencast coal mine in Inner Mongolia Autonomous Region, where the dump slopes had been under management for 15 years, using 4 revegetation patterns (or 100 cm) were collected as samples for analysis of variability of SOC storage as affected by revegetation pattern. Results show as follows: (1) Revegetation patterns significantly affected SOC and TN contents and their distribution in the soil profile ($p < 0.05$). In terms of SOC and TN contents in the 0 10 cm and 10 20 cn soil alyers, the four revegetation patterns displayed an order of grassland > shrub land > woordland > nature recovery land, while in terms of SOC and TN contents in the soil algors below 20 cm, a similar trend could be found, but the differences between the four narrowed with increasing soil depth. (2) In terms of SOC and TN contents in the officence of the soil of th | 露天掘り炭鉱のダンブ斜面からの土壌と水の損失を抑制するためには、植生の復元 が最も直接的な生物学的対策であり、最も効果的である。土壌有機炭素(SOC)の 空間分布のほうっきに関する知見を得ることができた。と空寒素(TN)の含有量 は、植生パターンに影響されるため、ダンブ斜面に適した植生パターンを選択する ために不可欠である。本研究では、内景古自沽区の平大清陽次振り炭鉱を対象に、4 の機生パターン(自然回復地、草地、低本地、森林)を用して、15年間におたり ダンブ斜面の管理を行った。土壌ブロファイル(0 100 cm) 270枝を採取し、緑化パ ターンによるSOC蓄積量の変動を分析した。その結果、以下のことが明らかとなっ た。植生パターンはSOCとTNの含有量および土壌ブロファイルの分布に有意な影響 と与えた(p<0.05) 土壌の~10cm層および10c~20cm層のSOCおよびTN含量では、 4つの緑化パターンが草地と低木料~自然の遺地の順となり、20cm以下の土壌層の SOCおよびTN含量では、同様の傾向が見られたが、土壌深度の増加とともに4者の | Turang Xuebao | Li Junchao Dang Tinghui Xuo Jiang Guo Shengli Jin Jingjing | 2015 | 52 | 2 | 453-460 | 中国 中国 石火ゴル自治区 石炭鉱山 | |

| 2 | Revegetation of artificial grassland improve soil organic and inorganic carbon and water of abandoned mine | Mining and related activities caused plant productivity and soil carbon content reduced in arid and semi- arid ecosystems. Soil carbon plays an essential role in ecosystem stability. Soil carbon and associated changes in soil property were important drivers and indicators of ecosystem recovery at post-mining areas. We selected 5, 10 and 20 years of restoration lands to examine the effect of artificial grassland on vegetation community and soil property. Results showed that artificial grassland markedly increased the biomass, canopy coverage and soil carbon content, but decreased soil bulk density and soil water content. After 10-year of restoration, both the biomass and soil organic carbon (SOC) content reached the peak, however, soil bulk density and soil water content arrived the lowest at depth of 0-20 cm and got the highes at depth of 20-30 cm. At 20-year of restoration land, the biomass (above- and belowground) and SOC content (0-30 cm) significantly decreased by 14.6 % and 67.0 % with compared to 10-year of restoration land, while soil bulk density of 0-10 cm and 10-20 cm depths increased by 17.8 % and 21.4 %, respectively soil water content (0-30 cm) increased by 11.6 %. It was evident that artificial grassland as an effective ecological restoration approach could improve soil physic-chemical property, while properly anthropogenic perturbations were also needed to stimulate plant growth. | 乾燥・単乾燥仕販系では、採掘やそれに関連する活動により、植物の生産性や土壌 放業量が減少しています。土壌放素は、生態系の安定に不可欠な役割を担ってい る。土壌疾患くそれに伴う土壌特性の度化は、採掘砂の生態系回の要なドライ バーであり指揮である。安々は、5年、10年、20年の修復地を選び、人工単地が橋生 群巣と土壌特性に及ぼす影響を調査した。その結果、人工単地はバイオマス、樹朮 車、土壌疾患を書しく増加させたが、土壌から密度と土壌水分量は減少させた。 10年後にバイオマスを生土壌有機疾素量(SOO)はビークに達したが、土壌から自 療生地では、10年目の修復地と比較して、バイオマス基(地上部・地下部)および SOO量(0-30cm浸食で78%と14%と14%と14%と14%と14%と15%と15%と15%と15%と15%と15%と15%と15%と15%と15 | Journal of Soil Science and Plant Nutrition | Z. Yang H.M. Hao D. Wang X.F. Chang Y.J. Zhu G.L. Wu | 2015 | 15 | 3 | 629-638 | 中国モンゴル自治区 炭鉱跡地 | Stipa capillata Lin Agropyron cristatum |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------|-------------|---|-----------|----------------------------|--------------------------------------------|
| 2 | Mine spoil acts as a sink of carbon dioxide in Indian dry tropical environment | Economically important mining operations have adverse environmental impacts: top soil, subsoil and overburden are relocated; resulting mine spoils constitute an unaesthetic landscape and biologically sterile | と機算される。また、縁化した鉱山跡地の放棄貯留置は、大気中の二酸化炭素 (CO2) を2539らトン加設即することに相当する。このことは、鉱山跡地が大気中 の二酸化炭素の重要な吸収源として機能することを示している。年間に収支は8.40 t (Cha lyr-Iの蓄積を上し、そのうち2.14 vhaが増上パイマス、0.31 huが地下パイ マス、2.88 thaがリター、1.35 thaが境内代土に配分されていることがわかった。こ | Science of the Total Environment | Nimisha Tripathi Raj Shekhar Singh C Paul Nathanail | 2014 | 468- 469 | | 1162-1171 | インド シングラウリ 鉱山跡地 | |
| 2 | Estimation of carbon sequestration by pine (Pinus sylvestris L.) ecosystems developed on reforested postmining sites in Poland on differing mine soil substrates | This paper presents an estimation of C-sequestration and relationships between vegetation biomass and reclaimed mine solis in pine (Pinus sylvestris L) ecosystems in Poland. The study sites were arranged on 8 different geologic/mine sol substrates on waste dumps and surface mine spoils associated with open-cast lignite, sulfur, sand, and hard coal mine spoils. We combined soil and plant biomass data for C and other parameters via a range of site-specific measurements and lab analyses of soil and plant materials for these sites and coupled them with previously derived empirical formulae for biomass estimation. Based on this, we estimated the potential for C-sequestration in post-mining ecosystems and associated internal relationships between soil and plant C-sequestration. Our results indicate significant potentials for development of total ecosystem C stocks (taken as total aboveground biomsas + soil + roots) of approximately 50 Mg C harl for even the most oligotrophic habitats in Quaternary sand mine spoils and over 102 Mg C harl for spoil heaps on a sulfur mine in mixed Quaternary sands and Tertiary formation clays, both of which were similar to C stocks in adjacent natural forest pine ecosystems. Litter layer C stocks ranged from 5.9 to 12.7 Mg C harl and total soil C stocks (litter + soil organic carbon (SOC) ranged from 16.8 to 65.0 Mg C harl. However, on coal refuse wastes, total soil C stocks were above 2900 Mg C harl, which was derived primarily from fossil C. The estimated annual soil C-sequestration rate (in litter + SOC) ranged from 0.7 Mg C harl yr-1 to 5.2 Mg C harl yr-1 for the 8 sites in this study. Associated C-sequestration rates in organic horizon (litter O + to Q were estimated between -0.2 and 0.8 Mg C harl yr-1. The estimated range of total annual C-sequestration in post-mine ecosystems (laken as SOC+ vegetation biomsass across and flow rime is sites) of this region is 1.6-5.6 Mg C harl yr-1. | 本論文では、ボーランドのマツ (Pinus sylvestris L.) 生態系におけるC-吸収置と植生バイオマスおよび埋立地土壌の関係を推定した。調査地は、褐炭、破壊、砂、石炭の露来振り返師に付随する原果や第ツンフを展施は助めるの異なる地質・鉱山球基盤に配置された。我々は、これらのサイトの土壌と植物が材料の様々な測定とうで、イオマス権定のために以前に導き出した経験式と結合させた。これに基づいて、兵揺後の毛髪系における性素が関の高性と、土壌と植物のパオマス権定のために以前に導き出した経験式と結合させた。これに基づいて、兵揺後の毛髪系における性素計留の高能と、土壌と植物の炭素等の間の美術の場所の機能を推定した。その結果、第四紀の砂岩の鉱山跡地では、最も寛文表な生息地でも50 Mg C hai-1 を超える生態系を体のこれトック、他上バイオマス土土壌・積として)の形成に大きな可能性があり、いずれも損後する自然林の社林生態系のにストックと同程度であることが明らかにさんが良い、上壌全様のご審積量(50 Vg C hai-1 以今を一般のご審積量は50 Mg C hai-2 は、0 不 Mg C hai-1 に 北線 高精量 120 90 Mg C hai-2 収金 仁 に 土壌 全務 世紀 200 Mg C hai-2 以今 一条 1 大き 1 大 | Ecological engineering | Marcin Pietrzykowski W.Lee Daniels | 2014 | 73 | | 209-218 | ボーランド鉱山跡地 | Pinus sylvestris L. |
| 2 | Factors controlling carbon distribution on reforested minelands and regenerating clearcuts in Appalachia, USA | Increasing carbon (C) storage in soils of degraded lands, such as surface coal mines, is of interest because of its potential role in mitigating increases in atmospheric CO2. While it has been shown that reforesting degraded lands can significantly increase C storage in soils, there are limited studies addressing what processes control soil C in these systems. A study was initiated with the following objectives: 1) quantify the amount of soil C accumulating on reforested mine lands; and 2) examine several biological processes that govern the amount of C sequestered into soil (decomposition, soil respiration and microbial dynamics). A chronosequence approach was used to examine C changes with time in reforested mine lands (years 1, 3, and 8) and unminor regnerating clear-cuts (years 4, 12 and 20). From a C perspective, our results indicated that the young reforested mines (ages 1 and 3) differed significantly from the older mines (age in and all regenerating clear-cuts for all parameters examined. However, after 8 years litterfall, microbial biomass C and nitrogen (N), microbial activity, litter decomposition and CO2 efflux were similar on the mine as that flound on the 12-year-old naturally regnerating clear-cuts found on the 15-year-old naturally regnerating clear-cuts found on the 15-year-old naturally regnerating clear-cuts for or ganies (SOC) content was lower on the reforested mines than the regenerating flower cut. Although soil organic C (SOC) content was lower on the reforested mines than the regenerating flower in this properties of the content of the properties of the properties of the content was lower on the reforested mines than the regenerating flower in the nines attended to rapid the content was lower on the reforested mines than the regenerating flower cut. Although soil organic C (SOC) content was lower on the reforested mines than the regenerating flower in the nines attended to the properties of the pr | 展鉱跡地などの劣化した土地の土壌に炭素 (C) を貯蔵することは、大気中のCO2増加を緩和するために重要な投稿を果たすと考えられています。劣化した土地で森林を高井すると、北壌中の炭焼内蔵置が大幅に増加することが示されているが、の研究は限られている。木材では、以下の自りが開始された。)。身林再生されたに加川地に蓄積された工壌の要素がどのようなプロセスで制御されているのかについている。本体質がは、以下の自りが開始された、1) 美林再生されたに加川地に蓄積されたにの重を定量化する、2) 土壌に隔離されたの重を支配はいくつかの土地学のブロセス (分解、土壌甲級、機生物制御、を検証する、クロノシーケンスアプローチを用いて、森林再生地(1、3、8年目) と未採掘の再生物技地(4、12、20年日) におけるの毎年変化を関連とし、その発集、(の製血からは、調金したすべてのバラメータにおいて、表い森林化鉱山(1、3年日) は古い鉱山(8年日) およびすべての再生物状地で大きな産があることが示された。しかし、8年後のリターフォール、微生物・バイオマスとと響素(N)、微生物活性、リターの分解と(O)流山は、12年目の自然再生クリアカットで見られたものと鉱山では類似していた。土壌有機(SOC) 含量は再生林より再生協工で振りて係り、SOCの蓄積速度は鉱山路地で大きかった。これは、若い鉱山地には当初SOCがなく、急速に隔離するのに適した条件であったためと思われる。 | Science of the Total Environment | Tarn Littlefield Chris Barton Mary Arthur Mark Coyne | 2013 | 465 | 1 | 240-247 | 米国南部 Appalachia 改鉱跡地 | |

| 30 | Carbon sequestration potential of post-mining reforestation activities on the KwaZulu-Natal coast, South Africa | Restoration of former mined land can potentially capture large quantities of atmospheric carbon dioxide if appropriate reclamation techniques and post-reclamation management strategies are applied. The objectives of the current study were: to quantify carbon stocks in five pools; to develop empirical relationships between stand age and carbon stocks; to compare the carbon sequestration potential of relabilisated land under different land uses and to recommend management practices to maximize carbon sequestration. The carbon stocks in five pools (aboveground, bletw-ground, litter, debris and soil), of the rehabilitated vegetation were quantified. For this purpose, 18 sites were selected including both commercial plantations and rehabilitated indigenous forests. The relationship between total, aboveground and belowground carbon stocks in the Casuarina equisettiolia plantation and stand age was sigmoidal, whereas the relationship was linear for the rehabilitation diagenous forest in the rehabilitated indigenous forest reached the mean net carbon storage of C. equisettifolia plantations after 19 years. Maximum carbon accumulation in the rehabilitated indigenous forest compared well with values reported for reclaimed ecosystems in the USA and Europe. Carbon sequestration potential of the mined land could be optimized and natural cantaln restored through reforestation of harvested C. caussicifialio plantations with indiaenous | 鉱山跡地の再生は、適切な再生技術と再生後の管理戦略を適用すれば、大量の大気中の二酸化炭素を指定できる可能性がある。本研究の目的は、5つのブールにおける 炭素蓄積型の変性化、林酔と炭素蓄積型の経験的関係の情楽、異なる土地利用下に おける再生地の炭素蓄積能の比較、炭素蓄積量を最大化するための管理手法の推奨 である。再生地における5つのブール(地上部、地下部、リター、デブリ、土壌) の炭素蓄積量を定量化した。この目的のために、商業植林地と原生林の両方を含む お別所を選択した。Casuraria cquisttifile 維料をの地上・地下の炭末蓄積量と林齢の 関係は、シグモイト型であったが、原生林の場合は直線的であった。また、原生林 の炭素蓄積量は、約10年後にC cquisutfiloは樹林地の炭素・指量の平均値を上回っ た。また、原生林の炭素蓄積量は、米国や欧州の再生生態系で報告されている値と よく比較された、伐援されたエクセテファリア植林地に原本株を再生することで、 採掘地の炭素貯留量を最適化し、自然資本を回復させることができる可能性があ | Forestry | M. W. van Rooyen N. van Rooyen G. H. Stoffberg | 2013 | 86 | | 211-223 | EN ク | アフリカ ワズール・ナタール ⁽ 山跡地 | Casuarina equisetifolia |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----|----|-----------|-------|---------------------------------------|-------------------------|
| 31 | Carbon Sequestration Through Reforestation in Reclaimed Coal Mine Sites in East Kalimantan, Indonesia. | into natural capital resoroeu inrough resorestation to harvesteed C. equisectionia plantations with mougenous forest. Forests absorb CO2 during photosynthesis and store it as organic matter in biomass plants. The amount of organic matter stored in forest biomass per unit area and per unit time is the subject of forest productivity. Forest productivity is a picture of the ability of forests to reduce CO2 emissions in the atmosphere through physiological activity. Measuring productivity of forests in the context of this study is relevant to biomass measurements. Forest biomass provides important information in the assumed magnitude of potential CO2 sequestration and biomass in a certain age that can be used to estimate forest productivity. Reclamation of former coal mine is an attempt to repair or restore the land and vegetation in forest areas damaged as a result of mining activities, in order to function optimally as intended. Measurement of forest productivity in vegetation of areas mined coal is the purpose of this study. Tree biomass accumulations and age-related changes of P. falcataria plantations were determined using a destructive sampling technique. These data were used to estimate optimum harvesting time. Tree biomass samples were collected in 3, 5, and 7 year old plantations in mined area. About 10 trees were sampled from each stand. Tree growth characteristics were evaluated for both sites. Allometric equations were developed for each site to estimate voot, stem, branch, leaf, abovegound and total biomass and stem volume. Using these equations, the stem volume and biomass of each component for each stand age were estimated. A single allometric relationship for all sites was found just for estimation of biomass and stem volume. Using these equations, the | で 最林は光合成でCO2を吸収し、バイオマス植物に有機物の量が、森林生産性の対象で 単位時間あたりし森林バイオマスに蓄えられた有機物の量が、森林生産性の対象で ず。森林の生産性とは、森林が生理的活動によって大気中のCO2排出量を削減する 能力を示すものである。本研究でいう森林の生産性の測定は、バイオマスの測定に 関連するものである。森林のバイオマスから森林生産性の性定には、潜在的なCO2 吸収量の想定や、ある年数でのバイオマスから森林生産性の性定には、潜在的なCO2 吸収量の想定や、ある年数でのバイオマスをど、重要な情報が必要です。旧校施 の理め立ては、採用活動によって傷ついた場外の土地や地をを修復・復元し、本来 の最適な機能を発揮させる試みである。そこで本研究では、石炭採掘跡地の植生を が繋に、森林の生産性を測することを目的とした。PLもには市植林地の植生へ が実に、森林の生産性を測することを目的とした。PLもにま市植林地の植土を では、最適な位保時期を推定するために使用された。このような状況下において、 Pファルカタリアの植林地の樹木のバイオマス蓄積量と軽年変化を破壊サンブリン がにより測定し、最適な伎保時期を推定した。それぞれの林から別は本の成長特性を評価した。根、幹、様、葉、地上部、総パイオ マス、対体積を推定するために関した。根、幹、様、葉、地上部、総パイオ マス、対体積を推定するために関した。名様、幹、成、準、地上部、総パイオ マス、対体積を推定するためのアロメトリック方程式が各サイトで開発された。 それた。両地域の地木の成長特性を評価した。根、幹、様、葉、地上部、総パイオ マス、対体程を推定するためのアロメトリック方程式が各サイトで開発された。 それた。石水の樹脂におる各構成要素の幹容積とパイオマスが 推定された。その結果、パイオマス重生整容積の推定に限っては、すべての都位で 単一のアロメトリック関係が見出された。 | Journal of Environment and Earth Science | Sadeli Ilyas | 2012 | 2 | 10 | 27-35 | EN 東 | ンドネシア カリマンタン 炭採掘跡地 | fakataria |
| 32 | Agroforestry for Mine-Land Reclamation in Germany: Capitalizing on Carbon Sequestration and Bioenergy Production | Surface mining operations generate significant and large-scale landscape disturbances. As a consequence, effective reclamation management is required to ensure the establishment of a sustamably productive, ecologically valuable, and economically attractive post-mining landscape. In the post-surface-mining landscape of Lower Lusatia (northeast Germany), a new land-use option during reclamation is the establishment of alley cropping systems (ACSs) producing food and woody biomass for obtaining bioenergy. The established multi-row tree strips are typically managed as short rotation coppices (SRC), for which black locust (Robinia pseudoaccia L.) is the most frequently used tree species. The alley cropping systems are promising land-use systems for mine-site reclamation because they provide a | 単一のアロント・ソの側体が現立された。 地表での採掘作業は、大規模な景報破壊を引き起こします。その結果、持続可能な 生度性、生態学的価値、経済的に魅力的な採掘砂の景報を確立するために、効果的 な埋め立て管理が必要となる。ドイツ北東部ニーダー・ルザンアの地表採掘役のラ ンドスケーブでは、再生利用における新しい土地利用の選択肢として、食料とパイ オエネルギーを得るための木質バイオマスを生産する器体件がシステム(ACS)の 確立がある。この樹林帯は、通常、短期輪作(SRC)として管理され、その樹種と してクロイナゴ(Robhimi pseudoacnia」)が最も多く利用されている。路地栽培 は、多くの生態学的・経済的知益をもたりすことから、鉱地砂の再生に有量な土 地利用システムである。さらに、これらの植林地は、パイオマスや土壌に相当量 の表素(C)を蓄積することができる。ルサンチマン地域の鉱血跡地における配。 pseudoacaciaのが開催に関する現地調査の結果、R. pseudoacaciaの新精乾物(DM)を 産量は平均3-10 Mg DM har Jear-1で、植林年数と輸役時間とあて果なることが 売された。栗面バイオマスの DM 収重は、梯盤2年および4年の樹木でシュートパ イオマスの12 から 32%の間であった。土壌中のC貯蔵量は、深さ0-60cmで最大7Mg C ha-1 year-1と推定される。以上の結果から、R. pseudoacaciaののACSは、多くの点で 鉱山跡地における有金な土地利用システムであり、地上都および地下部に大きなC貯 鉱山跡地における有金な土地利用システムであり、地上都および地下部に大きなC貯 の可能性を持っているという仮設が美計をわる。 | Agroforestry (本)の一部 | Ansgar Quinkenstein Dirk Freese Christian Böhm Penka Tsonkova Penka Tsonkova Reinhard F. Hüttl | 2012 | | | 313-339 | F si | イツ北東部山跡地 | Robinia pseudoacacia L. |
| 33 | 海外鉱山におけるパイオ燃料 導入プロジェクト | | インドネシアのカリマンタン島の鉱山跡地に栽培したジャトロファの種から、現地 に建設した精製ブラントで、バイオディーゼル燃料(以下、BDF)を作る。この BDF は軽速の代替燃料となり、当鉱山で複雑でる精動量のトンのダンプトラック に使用する。当事間では、鉱山跡地熔板電影と BDF 推進義務があること、ジャトロ ファは乾燥した戦争戦地でも栽培可能であること。食用に適ます食料と設合しない こと等のメリットがあることから、この話が進んだ。このプロジェクトは、カーボ シュートラルな BDF を、越山で移働する建設機械に用することで、温暖化対策 に買献しようと立ち上げた地産地消の新たなビジネスモデルの一例である。 | 建設の施工企画 | 1 坪田靖弘 | 2010 | | 11 | 24-28 | JA († | ンドネシア コリマンタン島) 炭採掘跡地 | ジャトロファ |
| 34 | Potential for carbon sequestration in reclaimed mine soil on reforested surface mining areas in Poland | Reclaimed mine soils (RMS) which develop on post-mining sites play significant role in Carbon sequestration in new ecosystems, especially in local range on areas disturbed by human activity. This study presents the potential for Carbon sequestration in RMS developing on 3 post surface mining areas in Poland (Central Europe) reforested with Scots pine (Pinus sylvestris L). Research was conducted on waste heaps and quarry which accompany open cast lignic, sulfur, and sand mining. Control plots were arranged in managed pine forests on natural sites in the surrounding area. The results shows high Carbon accumulation in RMS, estimated on 16.77 Mg·ha-1 in poor (oligotrofice) soils on Quaternary sands on sand quarry and up to 65.03 Mg·ha-1 on external waste heap after Sulfur surface mining exploitation on Quaternary sands mixed with Tertiary clays. These results were very similar to natural forest soils on control plots. Potential rate of Carbon sequestration in RMS was estimated on 0.73 (on the poorest sanday soils on quarry to 2.17 Mg·ha-1-yr-1 (no potentially abundant sandy-clayish soils on Sulfir waste heap), and 5.26 Mg·ha-1-yr-1 (no Tertiary sands substrate soils on lignite mining waste heap). In consulsion the average Carbon accumulation in RMS was estimated on 41 Mg·ha-1 and Carbon sequestration rate was 1.45 Mg·ha-1-yr-1. According to the result of this study and range of post-mining areas reclaimed to forestry in Poland (ca 15000 ha) total Carbon accumulation in RMS was estimated on 61× 103 Mg and potential Carbon sequestration rate in new ecosystems on 21.75× 103 Mg·ha-1-yr-1. However, the main factors affecting Carbon sequestration rate in new forestry in Poland (carbon sequestration and role formulate guidelines for sustainable management of postmining ecosystem, further study must be continue for better understanding. | は、基質、粘土とシルトの割合であり、採掘後の生態系の持続可能な管理のための | Natural Science | Marcin Pietrzykowski Wojciech Krzaklewski | 2010 | 2 | | 1015-1021 | | ーランド 山跡地 | Pinus sylvestris L |

| Carbon sequestration in a chronosequence of Scots pine stands in a reclaimed opencast of shale mine | Ecosystems that develop on mine spoil can serve as significant sinks for CO2. The aim of this study was to estimate the rate of earbon accumulation and its distribution along forest ecosystem partitions in young Scots pine (Pinus sylvestris L.) plantations in the Narva oil shale opencast, Estonia. The tree layer was measured in 2004 in 13 stands afforested with 2-year-old seedlings during 1968 to 1994. Three stands (afforested in 1990, 1983, and 1968) were selected for detailed analysis of the carbon sequestration. Soil profiles were sampled in these stands in 2005. Radiocarbon analysis combined with a simple model of fitte production was used to differentiate between plant-derived recent carbon and carbon stemming from fragments of oil shale. Total carbon accumulated since afforestation in vegetation, forest floor, and A horizon was 7.8 t-ha-1 in the stand established in 1983, and 13.4 t-ha-1 in that established in 1988, and 13.4 t-ha-1 in that established in 1988, and 13.4 t-ha-1 in that established in 1988. Most of the sequestered carbon was allocated to tree stems; their production increasing with age from 28% to 51%. The portion of recent soil organic carbon increased from 5% to a degraded land. | 本研究の目的は、エストニアのナルバオイルシェールオーブンキャストにある苦いスコットバイン (Pinus sylvestris L.) の植林地における炭素蓄積率を推定し、森林生態系の仕切りに沿った分布を明らかにすることであった。1990年、1983年、1983年、1983年、1983年、1983年、1983年、1983年、1983年、1983年、1983年、1983年、1983年、1983年、1983年、1983年、1983年の春林の土壌は、2005年にナンブリングされた。放射性無差分析とリター生品の母素がモデルの組み合わせにより、植物由来の最近の検集さイルシェール片由来の炭素を区別した。植生、林床、ルボリンンに蓄積された植林後の総炭素量は、1990年の植林地が7.8-1-ta-1、1983年の植林地が3.4-5-ta-1、1983年の植林地が3.5-ta-1、1983年の植林地が3.5-ta-1、1983年の植林地が1.33-4-th-2-1-7-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1 | Canadian Journal of Forest Research | Helen Karu Robert Szava-Kovats Margus Pensa Olevi Kull | 2009 | 39 | 8 | 1421-1615 | EN エストニア オイルシェール鉱山 | Pinus sylvestris L. |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------|----|---|-----------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Carbon storage in post-mining 36 forest soil, the role of tree biomass and soil bioturbation | Carbon storage in aboveground tree biomass and soil organic matter (in depth of A layer development i.e., up to 20 cm) was studied in 22–32 year-old post-mining sites in the northwest of the Czech Republic. Four replicated sites afforested with different tree species (spruce, pine, lanch, oak, lime or alder) were compared with sites left to natural regeneration which were dominated by aspen, birch and willow. No topsoil was applied at the sites; bence carbon accumulation resulted from in situ soil development on alkaline tertiary clays that were dumped on the heaps. In aboveground tree biomass, carbon storage range from 17.0 \pm 59 (mean a SEM) to 67.6 \pm 5.9 t har—1 and the rate of C accumulation increased from 0.60 \pm 0.09 to 2.31 \pm 0.23 t har—1 year—1 (natural regeneration $<$ pine $<$ spruce $<$ oak $<$ lime $<$ alder $<$ larger (and the rate of C accumulation in soil organic matter varied from 4.5 \pm 3.7 to 38.0 \pm 7.1 tha—1 and the rate of C accumulation in soil organic matter varied from 0.15 \pm 0.05 to 1.28 \pm 0.34 tha—1 year—1 at sites in the order. natural regeneration $<$ spruce $<$ oak $<$ larger 1 year of the soil was positively correlated with aboveground tree biomass. Soil carbon was equivalent to 98.1% of the carbon found in aboveground tree biomass at lime dominated sites, but only 21.3% at sites with natural regeneration. No significant correlation was found between C storage in soil and aboveground liter input. Total soil carbon storage was correlated positively and significantly with earthworm density, and occurrence of earthworm cast in topsoil, which indicated that bioturbation could play an important role in soil carbon is only and approximation of the carbon and arbon storage was correlated positively one wood production, but also restoring of soil community is critical for C storage in soil and whole ecosystem. | 複製サイトと、アスペン、カバノキ、ヤナギが優占する自然再生に任されたサイト とが比較された。表土を施さなかったため、炭素蓄積はアルカリ性第三次粘土の原 位置での土壌形成に起因する。地上部の樹木パイオマスでは、炭素蓄積量は170± | Biogeochemistry | Jan Frouz Václav Pižl Emil Cienciala Jiří Kalčík | 2009 | 94 | | 111-121 | EN チェコ共和国 鉱山跡地 | spruce pine larch oak lime alder |
| Soil Properties and Carbon Sequestration of Afforested Pastures in Reclaimed Minesoils of Ohio | Land-use change affects many soil properties, including soil organic carbon (SOC) pool, and the transfer of atmospheric CO2 to terrestrial landscapes. The objective of this study was to evaluate the effects of converting pastureland to Australian pine (Casuarina spp) and Black locust (Robinia pseudoacacia L) fores on selected soil physical and chemical properties and SOC sequestration in reclaimed minesoils (RMS) of southeastern Ohio. The study sites were surface mined for coal, reclaimed and managed as pasture, and then converted into woodland 10 yr before the present study. Soil plf and electrical conductivity (EC) wer higher in the RMS than in a nearby undisturbed hardwood forest. Conversion to Australian pine decreased soil plf and EC in the top 20 cm. Bulk densities of the RMS ranged from 1.24 to 1.32 Mg m²-3, and only minor changes were observed in soil bulk density after land-use conversion. Mean weight diameter (MWD and roto biomass increased significantly (P = 0.05) with conversion of pasture to Australian pine of Black locust. In addition, aggregate stability was greater in RMS under hardwood forest than under pasture. Conversion to the Australian pine forest increased the SOC pool in the top 30 cm by 6 Mg harl (11%) in 10 yr. However, the Np pool in the top 50 cm ms on a affected by the land-use conversion from pasture to Australian pine. Conversion to Black locust increased the SOC pool in the top 50 cm by 24 Mg harl (42%), while the Np pool increased by 10% under Black locust in 10 yr. The increase in the SOC pool was accompanied by an increase in the CN ratios and root biomass in both Australian pine and Black locust sites in the 20 - to 50-cm depth. Establishment of tree plantation has a greater potential for SOC sequestration than pastures in the RMS. | 土地利用の変化は、土壌有機炭素(SOC)プールや、大気中のCO 2の陰域景観への 「移動など、タくの土壌特性に影響を与えます。この研究の目的は、牧草地をオース トラリアの松(Casuarina spp)とニセアカシア(Robinia pseudoacacia)に変換する効 現を容格両することでした。し、カイルオ人病事態の再生能出土壌(RMS)における、 選択された土壌の物理的および化学的特性とSOC隔離に関する森林。調査地は石炭 のために露天掘りされ、牧草地として埋め立てられ管理され、そして現在の調査の 10年前に森林に転換された。土壌の内は密域伝導率(EC)は、近くの乱されていな い広葉樹林よりもRMSの方が高かった。オーストラリアの松に変換すると、上部 20cmの土壌のpt1をECが低下しました。RMSのかさ密度は124~18.2 Mg m-3の範囲 | Soil Science | D. A. N. Ussiri R. Lal P. A. Jacinthe | 2006 | 70 | 5 | 1797-1806 | EN オハイオ州南東部再 生鉱山 | Casuarina spp Robinia pseudoacacia |
| Enhancing Soil Carbon Sequestration on Phosphate Min Lands in Florida by Planting Short-Rotation Bioenergy Crops | Phosphate mines in northern and central Florida provide a valuable resource for the national and international production of agricultural fertilizers. However, separating phosphate-rich ore from the underlying sand and clay matrix creates large containment ponds or clay settling areas (CSA). The physical and chemical characteristics of CSAs make restoration a critical priority for post-mining activities, and chemical characteristics of CSAs make restoration a critical priority for post-mining activities. Therefore, to demonstrate the potential use of these areas for bioenergy crop production and carbon sequestration, a 50-ha demonstration planting consisting of Eucalyptus grandis, E. amplifolia, cottonwood, cypress, and slash pine hybrid trees was established on a CSA beginning in 2000 near Lakeland, Florida. Establishment costs may be as high as \$1,250 per acre, including costs of site preparation and planting. Yield estimates for 2.5-year-old E. grandis planted in single rows varied from 10 to 16 dry tons of biomase per aree. In addition to providing a carbon-neutral opion for mitigating rising CO2 in the atmosphere, an important opportunity exists for promoting soil carbon sequestration as a result of restoration. Our analysis using a simple model that describes the soil carbon dynamics indicates the potential for long-term increase in soil carbon under bioenergy crop plantations. Science in support of these observations will require investigations aimed at (1) selecting tree species for site restoration, (2) identifying management practices to ensure plant survival and maximize growth, (3) improved characterization of below-ground biomass and determining inputs of roots to soil organic matter pools, (4) documenting the colonization of bulk and rhizosphere soils with micro-organisms beneficial to carbon and nitrogen cycling, and (5) quantifying changes in soil carbon and nitrogen stocks over time. | プロリダ北部と中央部のリン酸鉱山は、農棄用肥料の国内および国際的な生産に貴 重な資源を提供します。ただし、リン酸性に富む鉱石を下にある砂と粘とのマト リックスから分離すると、大きな封じ込め患または粘土沈降領域(CSA)が作成さ ルます。CSAの物理的および化学的特性により、採掘後の活動では修復が重要な優 先事項になります。したかって、バイオエナジー作物生産と炭素隔離のためのこれ らの地域の潜在的な使用を実証するために、ユーカリブタスクジーディス、E、ア ブリフォリア、コットンウッド、ヒノキ、スラッシュバインハイブリッドリーで 構成される50ヘクタールの実証植敷が2000年からCSAに放立されました。フロリダ 州レイクランドの近く、設置費用は、敷地の生傷と植数の費用を含むて、エーカー あたり1,250ドルにもなる可能性があります。2.5歳のEの収量推定・一列に植えられ たグランディスは、エーカーあたり10から16効像トンのバイオマスまで見たしまし たまります。これでは、アーカースは、アーカースは、アーカースは、アーカーあたり10から16効像トンのバイオマスまで見たしまし 、地域サることに加えて、回便が禁果としては炭素高機を促進するための重要な 機会が存在します。土壌炭素物態を設明する単純なモデルを使用した私たちの分析 は、バイオードジーを増生の大田ので | conference on carbon capture and sequestration | Stan D. Wullschleger Steve A. Segrest Donald L. Rockwood Charles T. Garten, Jr. | 2004 | | | 1-7 | EN フロリダ リン酸鉱山 | Eucalyptus grandis E.amplifolia cottonwood cypress slash pine hybrid |

| | The overall purpose of this project is to evaluate the biological and economic feasibility of restoring high- | | | | | | | | |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------|----|---|---------|---------|-----------|
| | quality forests on mined land, and to measure carbon sequestration and wood production benefits that | このプロジェクトの全体的な目的は、鉱山跡地に高品質の森林を復元することの生 | | | | | | | |
| | would be achieved from forest restoration procedures. In this segment of work, our goal was to review | 物学的および経済的実現可能性を評価し、森林復元手順によって得られるであろう | | | | | | | |
| | methods for estimating tree survival, growth, yield and value of forests growing on surface mined land in | 炭素隔離と木材生産の利益を測定することである。この作業区分では、米国東部炭 | | | | | | | |
| | the eastern coalfields of the USA, and to determine the extent to which carbon sequestration is influenced | 田の地表採掘地に生育する森林の樹木の生存、成長、収量、価値を推定する方法を | | | | | | | |
| RESTORING SUSTAINABLE | by these factors. Public Law 95-87, the Surface Mining Control and Reclamation Act of 1977 (SMCRA), | 検討し、炭素固定がこれらの要因にどの程度影響されるかを明らかにすることを目 | | | | | | | |
| FORESTS ON APPALACHIAN | mandates that mined land be reclaimed in a fashion that renders the land at least as productive after mining | 標としました。公法95-87、1977年表面採掘管理・再生法 (SMCRA) は、採掘され | | | | | | | |
| | as it was before mining. In the central Appalachian region, where prime farmland and economic | た土地は少なくとも採掘前と同等の生産性を持つように再生されることを義務づけ | | | | | | | |
| MINED LANDS FOR WOOD | development opportunities for mined land are scarce, the most practical land use choices are | ている アパラチア地方内央部でけ 採掘された土地に係良た農地や経済発展の機 | | | | | | 米国 | |
| 20 PRODUCTS, RENEWABLE | hayland/pasture, wildlife habitat, or forest land. Since 1977, the majority of mined land has been reclaimed | 会が少ないため、最も現実的な土地利用の選択時は、干し草地/教草地、野生生物の lechnical | Aggett, Jonathan | 2003 | | | 1-18 E | N アパラチア | |
| ENERGY, CARBON | as hayland/pasture or wildlife habitat, which is less expensive to reclaim than forest land, since there are no | | | | | | | 鉱山跡地 | |
| SEQUESTRATION, AND | tree planting costs. As a result, there are now hundreds of thousands of hectares of grasslands and | らないため、林地よりも再生コストの低い干草地・牧草地や野生生物の生息地とし | | | | | | | |
| OTHER ECOSYSTEM | scrublands in various stages of natural succession located throughout otherwise forested mountains in the | て再生されてきた。その結果、現在、米国の森林地帯の山間部には、様々な自然遷 | | | | | | | |
| | U.S. A literature review was done to develop the basis for an economic feasibility study of a range of land- | 移の段階にある数十万ヘクタールの草原や低木林が存在することになった。低製品 | | | | | | | |
| | use conversion scenarios. Procedures were developed for both mixed hardwoods and white pine under a | 価格と高製品価格の下で、広葉樹とホワイトパインの両方について手順を開発し | | | | | | | |
| | set of low product prices and under a set of high product prices. Economic feasibility is based on land | た。経済的実現可能性は、土地の期待値に基づいている。さらに、3種類のインセン | | | | | | | |
| | expectation values. Further, our review shows that three types of incentive schemes might be important: (1) | ティブ・スキームが重要であることが示された:(1)植林時の一括払い(および同等 | | | | | | | |
| | lump sum payment at planting (and equivalent series of annual payments); (2) revenue incentive at harvest; | | | | | | | | |
| | and (3) benefit based on carbon volume. | | | | | | | | |
| | and (3) benefit based on carbon volume. The present state of forestry post mining land uses has prompted concern among researchers, landowners, | | 1 | | | | | | |
| 1 1 | | MADE TO THE COLUMN TO THE COLU | 1 | | | | | | |
| | and the public. Surface mines reclaimed to forests under the provision of the Surface Mining Control and | る。地表採掘管理・再生法(SMCRA)の規定に基づいて森林に再生された地表鉱山 | | | | | | | |
| | Reclamation Act (SMCRA) may not achieve site productivity levels required by the law. Anecdotal | は、法律で要求されるサイトの生産性レベルを達成できない可能性があります。し | | | | | | | |
| | evidence suggests that many pre-law reforested mined sites are growing productive forests. The purpose of | | | | | | | | |
| | this study was to characterize these forests and the mine soils in which they are growing, and use them to | いることを示す逸話的証拠がある。この研究の目的は、これらの森林と森林が生育 | | | | | | | |
| | benchmark forest development on mined land. Using 14 mined and 8 non-mined sites in the midwestern | している鉱山土壌の特徴を明らかにし、鉱山跡地における森林開発のベンチマーク修士論文 | | | | | | 米国 | |
| 40 of Forests on Mined Lands | and eastern coalfields research to address the following objectives was undertaken: (i) characterize the | に利用することであった。中西部と東部の炭鉱地帯にある14の採掘場と8つの非採掘 バージニアエ科 | Rodrigue, Jason Adam | 2001 | | | 299頁 | 中西部. 東部 | |
| | development, composition, and diversity of woody species on pre-SMCRA, forested surface mined land; | 場を使って、以下の目的のための研究を行った。(i) SMCRA以前の森林地表採掘地に大学 | | | | | | 炭鉱跡地 | |
| of the Surface Mining Control | (ii) estimate forest and site productivity on surface mined land and determine the soil and site properties | おける木質種の発生、構成、多様性の特徴 (ii) 地表採掘地における森林と敷地の生産 | | | | | | | |
| | most influencing forest growth; (iii) estimate projected rotation-age timber product value; (iv) quantify | 性の推定、森林の成長に最も影響を与える土壌と敷地の特性の特定 (iii) 輪伐期木材 | | | | | | | |
| | current carbon sequestration pools associated with the developing woody plant biomass, the forest floor, | 製品の予想価値の推定。(iv) 発育中の木質植物パイオマス、林床、土壌培地に関連す | | | | | | | |
| | and developing soil medium; (v) compare the diversity, forest and site productivity, commercial value, and | る現在の炭素隔離プールを定量化する。 (v) 再生鉱区の多様性、森林とサイトの生産 | | | | | | | |
| | carbon capture of reclaimed mined sites to that of regional non-mined forest systems. | 性、商業価値、炭素吸収を地域の非鉱区森林システムと比較する。 | | | | | | | |
| · · | Soils are an effective sink for carbon storage and immobilization through biomass productivity and | 土壌は、バイオマスの生産性と土壌有機炭素 (SOC) プールの強化を通じて、炭素 | 1 | | | | | | |
| | enhancement of soil organic carbon (SOC) pool. The SOC sink capacity depends on land use and | 工壌は、ハイオマスの生産性と工壌有機灰素(SOC)プールの強化を通じて、灰素 の貯蔵と固定化のための効果的なシンクである。土壌有機炭素の吸収能力は、土地 | 1 | | | | | | |
| | management. Degraded lands lose large amounts of C through SOC decomposition, erosion, and leaching. | の対威と固定化のための効果的なシングである。工場有機炭素の吸収能力は、土地 の利用や管理によって異なります。劣化した土地では、土壌有機炭素の分解、浸 | 1 | | | | | | |
| | Thus, restoration of disturbed and degraded mine lands can lead to increase in biomass productivity, | の利用や管理によって異なります。 第110に工地では、工場有機灰素の分解、浸 食、浸出によって大量の炭素が失われます。したがって、荒廃した鉱山跡地の修復 | | | | | | | |
| | improved soil quality and SOC enhancement and sequestration. Reclamation of mined lands is an aggrading | 技、浸田によって入重の炭素が失われます。したかって、元廃した脳山跡地の修復 は、バイオマス生産性の向上、土壌品質の改善、土壌有機炭素の増加と吸収につな | | | | | | | |
| | process and offers significant potential to sequester C. A chronosequence study consisting of 0-, 5-, 10-, | がる可能性があります。オハイオ州の0-,5-,10-,15-,20-,25歳の再生鉱山土壌を対象 | | | | | | | |
| | 15-, 20- and 25-year-old reclaimed mine soils in Ohio was initiated to assess the rate of C sequestration by | に、牧草地と森林の確立によるCの吸収速度を評価するためのクロノシーケンス研究 Land | | | | | | | 44 100 14 |
| 41 reclamation for soil organic | pasture and forest establishment. Undisturbed pasture and forest were used as controls. The SOC pool of | が開始された。対照として、未撹乱の牧草地と森林が使用された。25年の間に、埋Degradation & | V. A. Akala | 2000 | 11 | 3 | 289-297 | 米国オハイオ州 | 牧草地 |
| | reclaimed pasture sites increased from 15·3 Mg ha-1 to 44·4 Mg ha-1 for 0-15 cm depth and from 10·8 | か開始された。対照として、未提配の牧草地と採林が使用された。25年の間に、埋 立牧草地のSOCプールは深さ0-15 cmで15-3 Mg ha-1から44-4 Mg ha-1に、深さ15-30 Development | R. Lal | "" | | - | | 鉱山跡地 | 森林 |
| | Mg ha-1 to 18:3 Mg ha-1 for 15-30 cm depth over the period of 25 years. The SOC pool of reclaimed | 立枚早地のSOC ノールは休さ0-13 cm で13-3 Mg na-1から44-4 Mg na-1に、休さ13-30 | 1 | | | | | | |
| | forest sites increased from 12.7 Mg ha-1 to 45:3 Mg ha-1 for 0-15 cm depth and from 9:1 Mg ha-1 to 13 | cmで10-8 Mg ha-1から18-3 Mg ha-1に増加した。森林再生地のSOCプールは、同じ期 | 1 | | | | | | |
| | 6 Mg ha-1 for 15-30 cm depth over the same time period. The SOC pool of the pasture site stabilized | 間に深さ0-15cmで12-7 Mg ha-1から45-3 Mg ha-1へ、深さ15-30cmで9-1 Mg ha-1から | 1 | | | | | | |
| | earlier than that of the forest site which had not yet attained equilibrium. The SOC sequestered in 0–30 cm | 13-6 Mg ha-1へ増加した。牧草地のSOCプールは、まだ平衡に達していない森林地の | 1 | | | | | | |
| | depth over 25 years was 36·7 Mg ha−1 for pasture and 37·1 Mg ha−1 for forest. Copyright © 2000 John | プールよりも早く安定化した。25年間に深さ0-30 cmに貯留されたSOCは、牧草地で | 1 | | | | | | |
| | Wiley & Sons, Ltd. | 36-7 Mg ha-1、森林で37-1 Mg ha-1であった。 | 1 | | | | | | |
| | wiley & John, Ed. | I . | 1 | 1 | | | | 1 | 1 |

4.2. 緑化による二酸化炭素固定能の事例について

鉱山跡地の緑化による二酸化炭素固定について研究した事例の中には、鉱山跡地の利用形態として、森林、牧場、農耕地などに整理し、さらに土壌に関しては深度別に炭素固定について整理した事例もある。例えば Nimisha Tripathi 他 "Mine spoil acts as a sink of carbon dioxide in Indian dry tropical environment"では、図 4-1 に示すように利用形態ごとに二酸化炭素の固定について整理されている。同様に、Jitendra Ahirwal 他 "Assessment of carbon sequestration potential of revegetated coal mine overburden dumps: A chronosequence study from dry tropical climate"でも図 4-2 に示すように各国の研究事例をレビューし、鉱山跡地の緑化による二酸化炭素の固定能について整理している。

| Potential lan | d uses | Potential CO ₂ offset rate (Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹) | References |
|--------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Forest | Biomass Soil | 6.35 2.28 ^a 5.45 ^a 8.81 ^b | Kant and Kreps (2004) Sperow (2006) Akala and Lal (2000) Ussiri and Lal (2006) |
| | Total ^d Biomass Soil | 8.75 ^c 9.40 4.59 ^e 1.35 ^a | Singh et al. (2006) Sperow (2006) |
| Pasture | Soil Soil | 5.25 ^a 5.39 ^a | Sperow (2006) Akala and Lal (2000) |
| Cropland Forest | Soil Soil Biomass Total ^d | 3.56 ^a 1.20 ^a 8.7 9.36 | Sperow (2006) Present study Present study Present study |

^a 0–30 cm depth.

図 4-1 鉱山跡地の利用形態ごとの二酸化炭素固定率の整理

Mine spoil acts as a sink of carbon dioxide in Indian dry tropical environment より引用

| Land use (Location) | Climatic condition | Age (years) | Total C pool (Mg C ha ⁻¹) | C sequestration rate (Mg C ha ⁻¹ yr ⁻¹) | References |
|--------------------------------|-----------------------|-------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Reclaimed land (India) | Dry tropical | 11 | 57.16 | 5.20 | Ahirwal et al. (2017) |
| Reclaimed land (India) | Dry tropical | 4 | 30.30 | 7.60 ^a | Das and Maiti (2016a) |
| Reforested mined lands (USA) | Humid continental | 30 | 83.53 | 2.78 | Avera et al. (2015) |
| Reforested mined land (Poland) | Temperate | 24 | 69.40 | 3.35 ^a | Pietrzykowski and Daniels (2014) |
| Revegetated mine spoil (India) | Dry tropical | 19 | 69.23 | 3.64 | Tripathi et al. (2014) |
| Reclaimed forest (USA) | Temperate continental | 25 | 107.0 | 5.10 | Shrestha and Lal (2010) |
| Reclaimed forest (USA) | Humid continental | 35 | 132.0 | 3.77 ^a | Amichev et al. (2008) |
| Revegetated mined land (India) | Dry tropical | 14 | 89.62 | 6.40 | Present study |

a Average values.

図 4-2 各国の鉱山跡地の緑化事例における二酸化炭素固定率の整理

Assessment of carbon sequestration potential of revegetated coal mine overburden dumps: A chronosequence study from dry tropical climate より引用

これらによると多くの文献で、鉱山跡地を緑化することによる二酸化炭素の固定率は跡地の利用形態や植生の種類にもよるものの、概ね $2\sim7~{
m Mg~C/ha}$ / year であることが分かる。

また、Nimisha Tripathi 他 "Mine spoil acts as a sink of carbon dioxide in Indian dry tropical environment"では、鉱山跡地に限らず緑化に関する様々な研究フィールドにおける炭素の収支を図 4-3 のように整理している。これによれば炭素の収支がプラス、つまり炭素固定が進むものとマイナス、つまり炭素放出が

^b Black locust forest for 0–50 cm depth.

^c 0–20 cm depth under 5 year old *Albizia lebbeck*, and *A. procera* plantation.

^d Total includes soil, biomass and litter.

^e Total includes aboveground, belowground and litter mass.

進むものとが半々程度の割合となっていることが分かる。つまり、単に緑化されれば必ず二酸化炭素削減に寄与するということではなく、植生の種類や環境によっては、土壌や植物体自体の呼吸の影響が大きくなり、二酸化炭素削減に繋がらないことがあると示唆される。

| Type of ecosystem | Location | Method of budget estimation | C budget (g C $\mathrm{m}^{-2}\mathrm{yr}^{-1}$) | References |
|------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------|
| Grassland ecosystem Miscanthus sinensis | Nagano, Japan | Ecological method | −100 to −56 | Yazaki et al. (2004) |
| Pasture | New Zealand | Mass balance and modeling | -414 | Tate et al. (2000) |
| Grassland | Cork, Ireland | Eddy covariance | +236 | Leahy et al. (2004) |
| Grass (200 kg N ha ⁻¹) | Uppsala, Sweden | Ecological method | +140 | Paustian et al. (1998) |
| Tall-grass prairie | Texas, USA | Bowen ratio/energy balance | +50 to +80 | Dugas et al. (1999) |
| | Oklahoma, USA | Eddy covariance | -8 | Suyker and Verma (2001) |
| | Wisconsin, USA | Difference method2 | -410 to +70 | Brye et al. (2002) |
| Mixed-grass prairie | North Dakota, USA | Bowen ratio/energy balance (soil flux) | +31 | Frank and Dugas (2001) |
| Moist-mixed prairie | Alberta, Canada | Eddy covariance | -18 to + 21 | Flanagan et al. (2002) |
| Meadow | Moscow, Russia | Ecological method | +387 | Larionova et al. (1998) |
| Forest ecosystem | | | | |
| Aspen-lime-birch | Moscow, Russia | Ecological method | +135 | Larionova et al. (1998) |
| Scots pine forest, 40 y old (Pinus sylvestris) | Southern Finland | Eddy covariance | +228 | Kolari et al. (2004) |
| French pine forest (Pinus pinaster) | Les Landes, France | Eddy covariance | -200 to -340 | Kowalski et al. (2003) |
| Boreal and temperate forest of Ontario | Ontario, Canada | Model: CBM-CFS2 | -40 | Liu et al. (2002) |
| Ontario's forest ecosystem | Ontario, Canada | Model: CBM-CFS2 | -43 | Peng et al. (2000) |
| Indigenous forest | New Zealand | Mass balance and modeling | -136 | Tate et al. (2000) |
| Agricultural ecosystem | | | | |
| Mix agricultural crops | Denmark | Eddy covariance | -31 | Soegaard et al. (2003) |
| Barley—no fertilizer | Uppsala, Sweden | Difference method2 | -20 | Paustian et al. (1998) |
| -120 kg N | Uppsala, Sweden | Difference method2 | +10 | Paustian et al. (1998) |
| Corn-continuous | Ohio, USA | Cropland ecosystem model C (CEM) | +26 | Evrendilek and Wali (2004) |
| -chisel plowed, fertilized | Wisconsin, USA | Difference method2 | -90 to +590 | Brye et al. (2002) |
| -no till, fertilized | Wisconsin, USA | Difference method2 | -210 to +430 | Brye et al. (2002) |
| No till corn-soybean | North Central USA | Eddy covariance | +90 | Hollinger et al. (2005) |
| Revegetated mine waste land | Dry tropical ecosystems, India | Ecological method | 354.79 | Present study |

図 4-3 様々な研究事例における炭素収支の整理

Mine spoil acts as a sink of carbon dioxide in Indian dry tropical environment $\c L \c P \c F/\c H$

4.3. 海外における鉱山跡地緑化とカーボンニュートラルに関する研究具体例の紹介

4.3.1. 米国の炭鉱跡地の事例

ここでは、実際に鉱山跡地の緑化について研究された事例について紹介する。James F. Fox 他 "Carbon Sequestration by Reforesting Legacy Grasslands on Coal Mining Sites" では炭鉱跡地について開発済エリアを再森林化しながら開発を進める場合、森林化に伴う炭素吸収量は 40 年後には 110 Mg/ha/year となる予測がなされている。二酸化炭素に換算すると 13.9 Mg/ha/year となるとしている。また、開発済エリアを低木の草原のように修復していくやり方では、修復に関するコストは抑えられるが二酸化炭素の吸収能が低く、逆に二酸化炭素発生源になるが、森林として再生することで 2100 年には二酸化炭素の吸収源になりえる、という予測がされている。詳細は文献を入手し参照されたい(https://www.mdpi.com/1996-1073/13/23/6340)。



a) Southern Appalachian Forest Region



b) Reclaimed Mountaintop Mining Site



図 4-4 本研究事例の研究対象地域

Carbon Sequestration by Reforesting Legacy Grasslands on Coal Mining Sites より引用

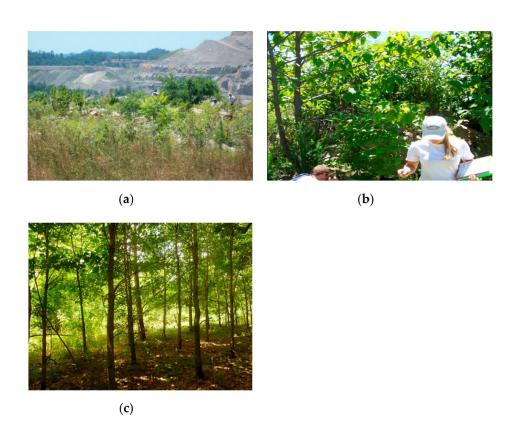
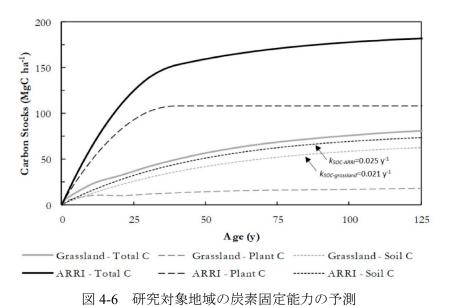


図 4-5 研究対象地域の緑化の様子(植林から a:2 年後、b:5 年後、c:13 年後)

Carbon Sequestration by Reforesting Legacy Grasslands on Coal Mining Sites より引用



Carbon Sequestration by Reforesting Legacy Grasslands on Coal Mining Sites より引用

4.3.2. インドネシアの炭鉱跡地の事例

次に、インドネシアの炭鉱跡地における重機メーカーによるカーボンニュートラルの検討事例を紹介する。坪田晴弘 "海外鉱山におけるバイオ燃料導入プロジェクト"は、インドネシアの炭鉱において開発に使用される重機の燃料をバイオディーゼルに代替し、カーボンニュートラル実現を目指すプロジェクトである。ここでは、図 4-7 及び表 4-2 に示す熱帯の乾燥地域でも育成可能なジャトロファ(別名ナンョウアブラギリ)に着目し検討が進められた。検討結果としては、図 4-8 に示すように 100 台規模のダンプトラックがバイオディーゼル 20%含有の軽油を使用すれば、消費燃料の 20%分の二酸化炭素を削減できることになるとされ、換算すると 1 年間で二酸化炭素相当で約 2 万トンとなり、自社の国内生産工場の排出する 1 年間分の約 10 分の 1 となるという試算がなされた。





図 4-7 ジャトロファの育床(左)と栽培風景(右) 海外鉱山におけるバイオ燃料導入プロジェクトより引用

表 4-2 バイオディーゼル原料としてのジャトロファと他種との比較

| | 項目 | 菜種 | 大豆 | パーム | ジャトロファ |
|-------------|---------------|---------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| | 収穫量 | × 0.5トン/ha | × 0.3トン/ha | ⊚ 4トン/ha | ○ 2 トン/ha |
| 原 | 収穫効率 | ○ 機械での収穫可能 | ◎ 大規模機械 での収穫可能 | ○ 手作業での収穫だ が、油含む果実密 集し効率よい | △ 現状目視選別の上、 手作業での収穫 |
| 料油 | 食物との競合 | × 食用油用途と競合 | × 食物・食用油用途と 競合 | × 食用油用途と競合 | ⊚ 食用に適さず競合し ない |
| | 栽培地 | ○ 丈夫で育ちやすい | △ 連作障害発生しや すぐ消毒や土嚢改 善が必要 | △ 湿潤、肥沃な土地 (こ限る | ◎ 乾燥地、貧栄養地 でも栽培可能 |
| B D F | 低温特性 (流動点) | ⊚ -13℃ 寒冷地に強い | ○ -2° | × 12℃ | △ 2 °C |

海外鉱山におけるバイオ燃料導入プロジェクトより引用

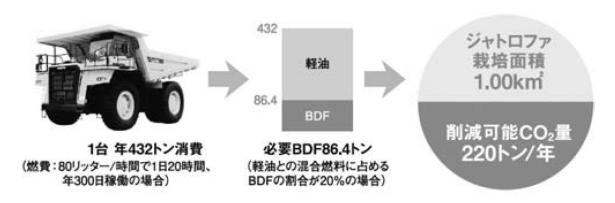


図 4-8 バイオディーゼル消費と二酸化炭素吸収の関係 *海外鉱山におけるバイオ燃料導入プロジェクトより引用*

4.4. 緑化に伴う二酸化炭素固定量の算出について

緑化に伴う鉱山跡地の森林化において、二酸化炭素固定量の試算は、林野庁によれば以下の計算式に て可能であるとされている。

吸収量(炭素トン/年)=幹の体積の増加量(m3/年)×拡大係数×(1+地上部・地下部比)×容積密度(トン/<math>m3)×炭素含有率

詳細は林野庁の HP(https://www.rinya.maff.go.jp/j/sin_riyou/ondanka/con_5.html)や、国交省国土技術政策総合研究所社会資本マネジメント研究センター緑化生態研究室の HP(http://www.nilim.go.jp/lab/ddg/naiyo/co2/co2.html)を参照されたい。同 HP では、図 4-9 に示すとおり、樹木の種類、樹齢ごとに年間の二酸化炭素固定量を試算することができるため、鉱山跡地の緑化計画において将来的にどの程度二酸化炭素固定に寄与することができるのかが試算可能となっている。

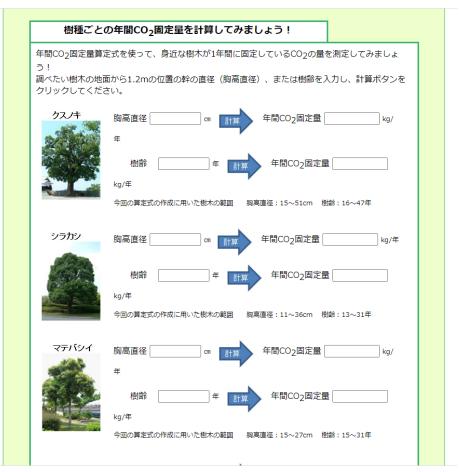


図 4-9 樹種ごとの二酸化炭素固定量の試算ページ

国土交通省国土技術政策総合研究所HP より引用

4.5. 鉱山の集積場の法面の樹木管理について

前章までで述べたように休廃止鉱山の緑化が進むことで、発生源対策に寄与できると考えられるが、 集積場については法面の樹木の繁茂については適切な管理が重要であるとされている。1983 年に金属鉱 業事業団 (現在の JOGMEC) が発行した「捨石・鉱さい堆積場緑化の手引」においては堆積場の法面管 理について図 4-10 に示すような記載がある。

なお,次のような理由で,たい積場のり面における樹木の管理が重要である。

- ① のり面の樹木が大きくなると、その重量がのり面の安定性に影響する。
- ② 高木が点在すると風倒の恐れがあり、かつ、強風のため、根のまわりの土がゆるみ、雨水が浸透しやすくなる。
 - ③ 樹木の根によるいわゆる「岩割り現象」が生じ、風化が促進される。
- ④ 樹木が繁茂するに従い地表面に腐植層が形成され、雨水が浸透しやすくなる。
 - ⑤ 樹木が密生しうっ閉すると下草が枯れ、侵食が再発する恐れがある。
- ⑥ 樹木の繁茂は、立入りの障害となり、のり面の変状や崩壊前兆の発見が遅れる。

図 4-10 集積場の法面管理について

4.6. 海外におけるファイトマイニング (phytomining) の事例紹介

ファイトマイニングとは、鉱山跡地など金属を多量に含む土壌に対し、図 4-11 に示すように金属の超 集積植物を活用し、土壌から植物体に金属を移行させ、さらに植物体から金属を回収する考え方である。 金属鉱床とするには金属元素の濃度が低い場合にも、「資源」とみなすことが可能な考え方で、汚染さ れた土壌の浄化に留まらず、金属を回収することにも着目した技術である。

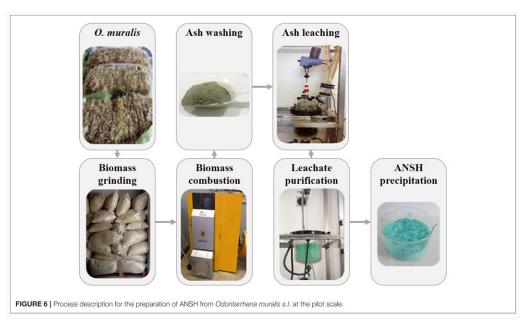


図 4-11 ファイトマイニングの概要

通常の鉱山開発では商業的に採掘にみあわない現場であっても、商業的に金属回収が可能になる可能性があるとされ、低コスト、低エネルギーで金属を回収可能であることや、金属回収のプロセスで SOx 発生が抑制できること、鉱山跡地などの修復に繋がること、植物体の成長過程で炭素固定が期待できること、エネルギーを生成できること(燃焼の際に)、生物多様性確保に繋がることなどが利点として挙げられている。また、将来的には C クレジット取引に繋がる可能性も示唆されている。

ファイトマイニングの研究事例としては、文献検索の結果、過去 20 年程度では図 4-12 のように文献 数が推移していた。年々文献数が増加していることが分かる。特に 2013 年に事例が多くなっているが、これは東日本大地震の津波堆積物を研究対象としたものが多くなっていることに起因すると考えられる。

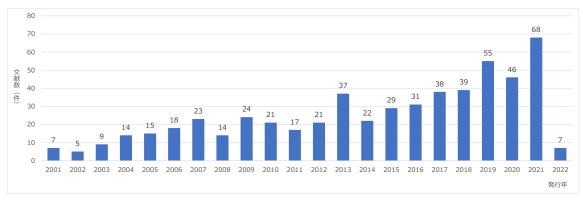


図 4-12 ファイトマイニング関連文献の発表数推移

JOGMEC 調べ (2022 年 2 月)

次に図 4-13 にファイトマイニングに関する文献において、処理対象とされる金属を整理した。これによれば Cd、Zn、As、Ni、Pb、Cu に関する研究が多くベースメタルを対象としていたり、As のような汚染の影響が強い元素を対象としたりする研究が実施されていることが分かる。文献調査によれば、ファイトマイニングの研究ステージとしては、実際のフィールドでの数年オーダーの試験が実施されるようになっている状況とのことであり、特に Ni に関しては技術確立に近いレベルまで達しており、長期に亘るフィールドテストも実施されている。また、実際に植物体からの回収技術も進展しており、パイロットテストも実施されているということである。また、他の金属、特にレアメタルについては今後の技術開発の余地があるとされている。

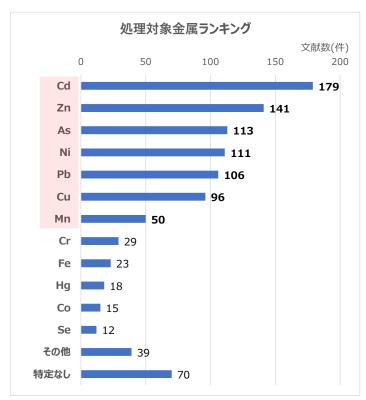


図 4-13 ファイトマイニングの処理対象となる金属種

JOGMEC 調べ (2022 年 2 月)

次に、ファイトマイニングの対象となる土地の利用状況を調査した結果を図 4-14 に示す。これによればやはり対象となるのは鉱山跡地が多く、また工場跡地や自然由来で金属濃度が高いエリアなども研究の対象とされている。



図 4-14 ファイトマイニングの研究が実施されている土地の利用状況

JOGMEC 調べ (2022 年 2 月)

また、ファイトマイニングに関する文献を発行した著者の所属国を調査した結果を図 4-15 に示す。世界各国で研究が進展していることが分かるが、特に日本、中国を始めとしたアジアで研究が盛んに行われていることが分かる。



図 4-15 研究文献発行国

JOGMEC 調べ (2022 年 2 月)

ファイトマイニングについては、上述のように各国で様々な研究が進展しているが商業ベースで実用 化には至っていないのが現状である。商業利用のための課題として、以下が考えられている。

- ✔ 金属の回収範囲が植物の根圏に制限されること
- ✓ 汚染土壌を対象とする技術ではあるが、物理的・化学的ストレスが強い場所では、植物の生長が阻害される可能性があること
- ✓ 植物の生長に適した環境で実現可能で、気候的に厳しい環境では難しいこと
- ✓ 土壌中の金属濃度が高くても、植物への移行量に限界があることや、超集積植物と呼ばれるものは 植物体があまり大きくならないことがあること
- ✓ 発酵、燃焼によりバイオエネルギーを得ることができ経済的なリターンを高めることができるが、 バイオマスの収量が低いこと

今後、さらに研究が進展することで上記の課題が解消されることが期待されている。

5. 引用文献

Ali et al. (2013) Chemosphere 91: 869-881.

Arnon and Stout (1939) Plant Physiology 14: 371-375.

Bowen (1966) Trace Elements in Biochemistry, Academic Press.

Brooks et al. (1988a) Trends in Plant Science 3: 359-362.

Brooks et al. (1988b) Nature 395: 553-554.

Brundrett (2006) Microbial root endophytes, Springer-Verlag, pp. 281–298.

Doyama et al. (2021) PLoS ONE 16(9): e0257690.

Epstein (1999) Plant Molecular Biology 50: 641-664.

Ernst (2006) Forest Snow and Landscape Research 80: 251-274.

Grzesik et al. (2018) Food chemistry. 241. 480–492.

Haruma et al. (2018) Plant Species Biology 33: 109-122.

Haruma et al. (2019) PloS one 14: e0212644.

Haruma et al. (2021) Letters in Applied Microbiology doi:10.1111/lam.13514

Inamura et al. (2000) Journal of Plant Research 113: 419-426.

Kabata-Pendias A. 2010 Trace elements in soils and plants. Florida: CRC press, pp. 93-121.

Kısa et al. (2016) Applied Biological Chemistry 59: 813–820.

Kruckeberg (1954) Ecology 35: 267–274.

Larcher (2004) 植物生態生理学, シュプリンガー・フェアラーク東京.

Li et al. (2011) Science of the Total Environment 409: 1069–1074.

Ma et al. (2011) Biotechnology Advances 29: 248-258.

Marshner (1993) Mineral nutrition of higher plants. Academic press.

Mizuno et al. (2009) A World View Northeastern Naturalist 16 (Special Issue 5): 65-80.

Nagata et al. (2014) Plant Species Biology 30: 116-125.

Nakamoto et al. (2021) Minerals 11, 1337. https://doi.org/10.3390/min11121337

Proctor (1971) Journal of Ecology 59: 827-842.

Rodriguez et al. (2009) New Phytologist 182:314-330.

Tagawa (1964) Memoirs of the Faculty of Science Kyushu University, Series E 3: 165–228.

Washitani and Saeki (1986) Journal of Experimental Botany 37: 1376–1387.

Wang et al. (2017) Chemosphere 184: 594-600.

Wilson (1995) Oikos 73: 274-276.

Yamaji et al. (2016) PloS ONE 11: e0169089.

Zhang et al. (2017) Plant and Soil 418: 165–176.

荒井賛ら (1983) 緑化工技術 9:1-10.

石井実ら(1993)里山の自然をまもる. 築地書館.

石川慎吾 (1996) 河川植物の特徴 ソフトサイエンス社 pp. 116-139.

井藤賀ら (2010) 植物の生体調節 45: 64-72.

稲葉悦雄ら (2004) 日本緑化工学会誌 29: 477-481.

大谷一郎 (2016).日本草地学会誌 62: 75-78.

奥村武信ら (2002) 日本緑化工学会誌 28:67-72.

上條隆志ら(2015)地球環境 21: 21-32.

亀井碧ら (2017) 日本緑化工学会誌 43: 195-198.

茅野充夫・斎藤寛 (編) (1988) 重金属と生物. 博友社.

環境省 (2015) 自然公園における法面緑化指針解説編.

菊地秀喜ら (1983) 園芸学会雑誌 51: 435-442.

金属鉱業事業団 (1983) 捨石・鉱さいたい積場緑化の手引.

小林達明・倉本宣(2006)生物多様性緑化ハンドブック-豊かな環境と生態系を保全・創出するための計画と技

術 地人書館 pp. 13-57.

齋藤与司二(2001)日本緑化工学会誌 27: 235-238.

柴田治・新井澄 (1970) 日本生態学会誌 20:9-13.

菅原玲子ら(2011) フジタ技術研究報告 47: 27-32.

高橋陽一ら (2008) 日本緑化工学会誌 34: 164-167.

田中涼子ら (2009) 山梨県森林総合研究所研究報告 28: 11-18.

テイツ・ザイガー (2014) 植物生理学 第3版. 培風館.

寺井学 (2017)日本緑化工学会誌 43: 318-319.

中静透 (2012) サイエンスネット 42: 2-5.

中村華子ら (2021) 日本緑化工学会誌 47: 203-206.

中坪孝之 (1997) 日本生態学会誌 47: 43-54.

西山嘉寛 (1997) 森林応用研究 6: 163-166.

沼田真 (1974) 図説植物生態学 第8版. 朝倉書店.

橋詰隼人(1987) 広葉樹研究 4: 75-83.

橋本良二ら (2011) 岩手大学農学部演習林報告 42: 111-118.

長谷川正男・古川忠 (1953) 日本林學會誌 35: 382-384.

早川宗志ら (2014) 日本草地学会誌 60: 124-131.

東三郎 (1965) 北海道大學農學部 演習林研究報告 23: 151-228.

東三郎 (1979) 地表変動論-植生判別による環境把握-北海道大学図書刊行会.

東三郎ら (1991) 日本林学会北海道支部論文集 39: 150-152.

広井敏男 (1974) 東京経済大学人文自然科学論文集 38: 177-226.

広井敏男 (1980) 東京経済大学人文自然科学論文集 55: 63-98.

福永健司 (2007) 日本緑化工学会誌 33: 459-462.

堀江秀樹・根本正之 (1990) 雑草研究 35: 292-295.

松中照夫 (2018) 土壌学の基礎: 生成・機能・肥沃度・環境 農山漁村文化協会 pp.97-107.

水野直治・水野隆文(2007)フィールドの基礎化学その応用と展開への道しるべ.産業図書株式会社、東京.

南佳典・渡邊功 (2007) 日本森林学会誌 89: 183-189.

森敏ら(編)(2001)植物栄養学.文永堂.

柳井清治・菊沢喜八郎 (1991) 日本生態学会誌 41: 145-148.

山路恵子ら (2021) 用水と廃水 63: 738-742.

山路恵子・春間俊克 (2020) 土壌の物理性 144: 33-37.

山田晋ら (2019) ランドスケープ研究 82: 691-696.

養父志乃夫ら (1999) ランドスケープ研究 63: 447-450.

吉田和男・杉木修一(2001)日本緑化工学会誌 27: 231-234.

米山忠克ら (2010) 新植物栄養・肥料学. 朝倉書店.

米道学ら (2021) 日本緑化工学会誌 46: 334-336.

【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

【ガイダンス内容に関する問い合わせ先】

・独立行政法人石油天然ガス・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

・筑波大学・生命環境系 山路恵子 メール: mine-plant-request@ml.cc.tsukuba.ac.jp