

## 北海道空知地方におけるずり山の植生回復と跡地管理の提案

河合 仁美<sup>1\*</sup>・森本 淳子<sup>2</sup>・中根 貴雄<sup>3</sup>・河村 和洋<sup>1,4</sup>・酒井 裕司<sup>5,6</sup>・中村 太士<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北海道大学大学院農学院 〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目

<sup>2</sup>北海道大学大学院農学研究院 〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目

<sup>3</sup>株式会社フォテック 〒007-0836 札幌市東区北36条東26丁目2-37

<sup>4</sup>国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所 野生動物研究領域 〒305-8687

茨城県つくば市松の里1

<sup>5</sup>イメージランドスケーププランニング 〒064-0959 札幌市中央区宮ヶ丘2丁目1-1

<sup>6</sup>NPO 法人炭鉱の記憶推進事業団 〒068-0021 岩見沢市1条西4丁目3

### **Vegetation recovery and management proposal for spoil heaps in Sorachi, Hokkaido**

**Hitomi Kawai<sup>1\*</sup>, Junko Morimoto<sup>2</sup>, Takao Nakane<sup>3</sup>, Kazuhiro Kawamura<sup>1,4</sup>, Yuji Sakai<sup>5,6</sup> and  
Futoshi Nakamura<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Kita 9 Jo, Nishi 9, Kita-ku, Sapporo, 060-8589 Japan

<sup>2</sup>Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Kita 9 Jo, Nishi 9, Kita-ku, Sapporo, 060-8589 Japan

<sup>3</sup>PHOTEC Co.Ltd. 2-37 Kita 36 jo, Higashi 26, Higashi-ku, Sapporo, 007-0836 Japan

<sup>4</sup>Department of Wildlife Biology, Forestry and Forest Products Research Institute, 1 Matsunosato, Tsukuba,

Ibaraki, 305-8687 Japan

<sup>5</sup>Image Landscape Planning, Miyagaoka 2-1-1, Chuo, Sapporo, 064-0959 Japan

<sup>6</sup>Hokkaido Coalmine-Heritage Association, Nishi 4-3, 1 Jo, Iwamizawa, 068-0021 Japan

**Abstract:** Coal mines have long supported industries worldwide. Coal mine spoil heaps are unstable piles of waste coal or lignite that collapse easily. Therefore, to increase the safety of former coal mines, it is important to stabilize spoil-heap slopes. Vegetation recovery stabilizes slopes by preventing soil-surface erosion. This study clarified the effects of various factors on vegetation recovery and provides guidelines for vegetation recovery and its management. The study sites were 15 spoil heaps in Sorachi General Promotion Bureau, Hokkaido, Japan. To investigate factors affecting vegetation recovery, we examined the effects of the percentage of surrounding forest, topographic wetness index, slope, percentage of landform alteration, presence or absence of afforestation, number of years since the coal mine closed, vegetation cover, and average tree height. The results showed that the number of years and slope affected vegetation recovery and implied that the vegetation on a spoil heap is likely to change to woody vegetation over time, after abandonment of the mine. A negative effect of the mean slope on vegetation recovery was prominent for slopes  $> 25^\circ$ . This is likely to be related to the angle of repose of the soil. A greater mean slope leads to loss of seeds and inhibition of plant establishment due to increased surface erosion. The vegetation cover ratio on spoil heaps with an average slope  $\leq 25^\circ$  can reach 75% after 42 years through natural succession, whereas revegetation practices are required to restore vegetation on slopes  $> 25^\circ$ . This serves as a reference angle for a revegetation guideline, for vegetation recovery at coal-mine sites.

**Key Words:** Aerial photographs, Site management, Slope angle, Slope stability, Time since site abandonment

---

\* 連絡先 : jnm\_hokudai@eis.hokudai.ac.jp

受付 : 2021年8月27日 / 受理 : 2022年5月16日

要旨：石炭を採掘する鉱山“炭鉱”の歴史は古く、世界各地で産業を支えてきた。炭鉱跡地に存在するずり山は、石炭又は亜炭に係る捨石が集積されてできた山であり、斜面の安定性に欠け、容易に崩壊する。したがって、炭鉱跡地の管理、安全性の向上のためには、ずり山斜面の安定化はきわめて重要な課題である。植生回復は土壌の表面侵食を防ぐという点から、斜面の安定化に対して一定の効果があると考えられる。本研究の目的は、ずり山における植生回復に影響を及ぼす要因の相対的な影響度を明らかにし、植生回復とその管理のための指針を得ることにある。対象地は北海道空知振興局内のずり山 15 か所とした。ずり山の植生回復に影響する要因を検討するため、ずり山全体の植被率と平均樹高に対する各要因（周辺森林率、TWI (topographic wetness index)、斜度、地形改変割合、植林の有無、閉山してからの経過年数)の影響を調べた。本解析の結果、ずり山の植生回復（植被率、平均樹高）は、閉山からの経過年数と斜度に規定されることが明らかになった。閉山からの年数の経過に伴い、やがて木本中心の植生へ遷移可能であると示唆された。また、平均斜度が大きいずり山では植被率と平均樹高が低く、特に斜度 25° 以上では植被率への平均斜度の負の影響が顕著であった。平均斜度の増大に伴い表面侵食が増大し、種子の消失、植物の定着阻害が生じていると考えられる。平均斜度 25° 以下のずり山では、42 年で 75% の植被率まで回復するため、遷移に任せた回復が見込める一方、25° 以上のずり山では緑化基礎工や緑化資材導入等を用いた植生回復が必要なことが示唆された。本研究を通して得られた基準は、炭鉱地での地域づくりに向けて重要な指針となることが期待される。

キーワード：空中写真、跡地管理、斜度、斜面の安定性、経過年数

## はじめに

産業革命以後つづく石炭の採掘量はヨーロッパやアメリカが減少傾向であるのに対して、中国は 2000 年以降生産量を大きく伸ばしており、世界全体の生産量は 2000 年から 2019 年に至るまでに 1.7 倍に増加している（世界全体の約 45% : Lin & Liu 2010 ; International Energy Agency 2020）。しかし、中国政府は、2030 年までに炭素排出量を減少に転じさせ、2060 年までにカーボン・ニュートラルを実現することを宣言しており、石炭採掘量のピークが 2025 年と予測されている（Lin & Liu 2010）。また、世界の石炭需要が 2030 年には 2019 年と比較し 45% 低くなることが予測されており（World Energy Outlook 2020）、世界の石炭採掘量も 2030 年以降は減少に転ずると考えられている（Höök *et al.* 2010）。

日本でも最盛期には全国で石炭が採掘されており、全域で採炭が可能な土地である北海道の中でも、良質な石炭層がある空知地方では、炭鉱開発が盛んに行われてきた。現在も採炭は行われているが、輸入炭及び石油貿易の自由化を背景にかつて採掘していた炭鉱の多くは閉山している（北海道炭鉱資料総覧 2006）。現在、日本は石炭のほとんどを輸入に頼っており、国内で採掘を行っているのは坑内採掘では釧路のみ、露天採掘も北海道にあるのみとなっている（日本経済新聞 2012 年 10 月 9 日「写真は語る」日経電子版 <https://www.nikkei.com/article/DGXNZO46991340W2A001C1M11700/> 最終確認 2021 年 8 月 12 日）。パリ協定を受けて近年脱炭素化を目指す日本では、高効率石炭の利用や再生可能エネルギーの主力電源化を加速させていく方針である（資源エネルギー庁 2020）。今後、日本だけでなく世界で炭鉱が閉鎖され、炭鉱跡地が増えると思込まれる。

炭鉱跡地には住宅跡地、廃鉱、ずり山などが含ま

れる。ずり山（ぼた山）は、“石炭又は亜炭に係る捨石が集積されてできた山”（地すべり等防止法）と定義されており、円錐形が多いが、場所や採掘量に応じて形状はさまざまである。実際に、空知地方に存在する 35 年間稼働した北炭赤間炭鉱のずり山（図 1）は標高 197.65 m の地域を一望可能な山となっている（炭鉄港推進協議会編 2021）。ずり山の特徴として、安定性に欠け、容易に崩壊する危険性が挙げられる（古田ほか 2006）。国内ではその危険性から、国土交通省地すべり等防止法（昭和 33 年 3 月 31 日法律第 30 号）に、地すべりと同等にずり山の崩落を防止するための法案が制定されている。また、1966 年にはイギリスで死者 144 人を出したずり山の崩落事故（Aberfan 崩落事故）が発生している（Lacey 1972）。したがって、炭鉱跡地の安全性の確保のためには、ずり山の安定化が必要不可欠である。斜面への植生の侵入は、侵食を防ぐことにより斜面の安定性を高める効果があると考えられる（阿部 1984）。また、攪乱を受けた土地の再生や水質改善といった観点からも植生は必要であり（経済産業省 2019）、ずり山の植生に関する研究は世界各地で行われてきた（Stachowiak *et al.* 2014 ; Šebelíková *et al.* 2019）。

アメリカでは、採掘後の植生回復を伴わない露天



図 1. 北炭赤間炭鉱ズリ山（北海道赤平市）

採掘を規制するとともに、放棄された採掘跡地の回復を推奨する環境法 (Surface Mining Control and Reclamation Act, 1977) が制定されている。この法律の下、採掘後の環境に配慮した土地利用のための手続きが計画時から求められている (Skousen & Zipper 2021)。自然に再生したずり山のほうが植林したずり山よりも草本の密度が高いため、表面侵食が少ないことが確認されており (Hodačová & Prach 2003)、自然侵入による回復が可能ならば跡地の環境の修繕に係る予算を削減することができる。したがって、植生回復を規定する要因を特定し、自然回復に任せて植生がどの程度定着可能かを見極めることは重要である。

採掘終了後初期のずり山は、水分不足、低栄養、高温、高塩分であり、植物の生育にとって厳しい環境である (Stachowiak *et al.* 2014 ; Bradshaw 1993)。そのため、ずり山の植生回復には、経過年数が重要であることが示されてきた (Šebelíková *et al.* 2016)。植生遷移の初期においては、ずり山の酸性度に耐性のある植物種が侵入してくることがわかっている (Bradshaw 1997)。しかし 60 年以上経過すると、ずり山でも木本類が優占する環境へと遷移していくことが報告されている (Stachowiak *et al.* 2014)。また、植生の遷移に対しては周辺植生が強く影響し、近傍に残存した植生が豊富なほどずり山の植生回復が促進されると指摘されている (Gilardelli *et al.* 2016)。

さらに、炭鉱地において種子供給源からの距離が種構成に影響していることも報告されており、周辺植生は種子供給源として重要な要因となっている (Moreno-de Las Heras *et al.* 2008)。既往研究では、個々の要因は独立に調べられてきた。しかし、各要因の相対的な重要性は明らかにされていない。

本研究では、空知地方における多様な炭鉱跡地を比較することによって、炭鉱跡地を含む地域づくりの一環として貢献することを目指す。空知地方の炭鉱跡地は、小樽市、室蘭市と共に 2019 年に日本遺産として指定されており、地域発展の手がかりとしての活用が見込まれている (炭鉄港推進協議会編 2021)。実際に、赤平に存在する北炭赤間炭鉱ズリ山は日本遺産の構成資産の 1 つとなっており、地域のシンボルとして祭事にも用いられるなど人々に親しまれている (炭鉄港推進協議会編 2021)。このように、ずり山はその大きさから地域景観に与える影響も大きい。ずり山をはじめとする炭鉱跡地の管理指標を得ることは、地域発展の手がかりとしての活用を促進することに繋がると考えられる。本研究では、ずり山の植生回復に影響を及ぼす要因の相対的な影響度合いを明らかにすること、そして、植生回復と環境要因の関係が変わる閾値を探索することで、ずり山の管理、ならびに、ずり山をはじめとした炭鉱跡地の管理を考える指標を得ることを目的とする。

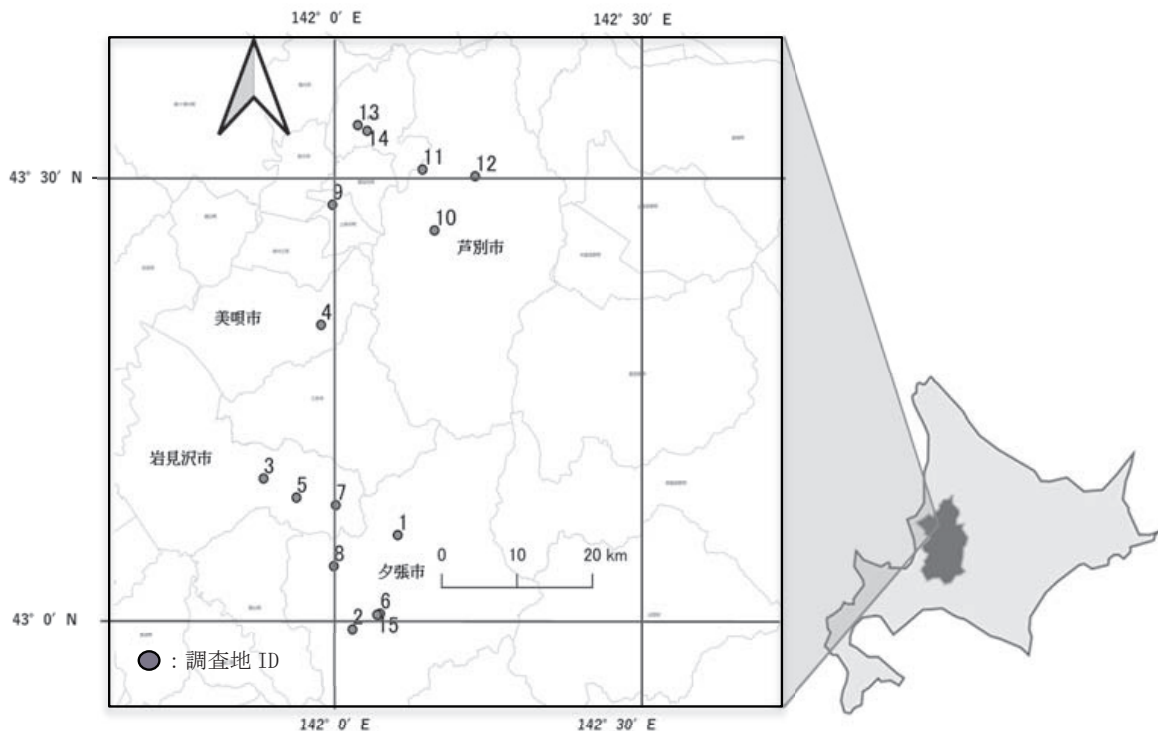


図 2. 調査地分布

表 1. 炭鉱名と炭鉱情報、空中写真情報

調査地ID	炭鉱名	閉山年	高度 (m)	縮尺	解像度 (dpi)	計画機関	最新写真撮影年	参考写真撮影年
1	三菱大夕張炭鉱	1990	3200	12500	2116	林野庁	2016	1977
2	清水沢炭鉱	1980	5583	20000	1270	国土地理院	2015	1977
3	朝日炭鉱	1974	5583	20000	1270	国土地理院	2015	1976
4	三菱美唄炭鉱	1972	3160	12500	2116	林野庁	2016	1962
5	美流渡炭鉱	1988	5583	20000	1270	国土地理院	2015	1966
6	北夕炭鉱	1970	3200	12500	2116	林野庁	2016	1977
7	万字炭鉱	1976	3200	12500	2116	林野庁	2016	1976
8	北炭夕張炭鉱	1977	3200	12500	2116	林野庁	2016	1977
9	三井砂川炭鉱	1987	2792	10000	1270	国土地理院	2015	1977
10	三井芦別炭鉱	1992	3100	12500	2116	林野庁	2016	1984
11	高根炭鉱	1967	3100	12500	2116	林野庁	2016	1966
12	明治炭業上芦別炭鉱	1963	3100	12500	2116	林野庁	2016	1967
13	赤間炭鉱	1973	2792	10000	1270	国土地理院	2015	1973
14	赤平炭鉱	1994	2792	10000	1270	国土地理院	2015	1987
15	北菱鹿島炭鉱	1972	3200	12500	2116	林野庁	2016	1977

## 調査地および方法

### 1. 調査地

本研究では、気候条件を同一にするため、北海道空知総合振興局内に限定して調査を行った(図2)。調査地域内の4地点(芦別, 美唄, 岩見沢, 夕張)では、1991 - 2020年までの平年値より最高気温は26.8℃, 最低気温は-11.7℃, 年降水量は1087 ~ 1390 mm (平均1130 mm)であった。空知総合振興局内に存在する炭鉱を北海道炭鉱資料総覧と廃墟検索地図(廃墟検索地図 <https://haikyo.info/> 最終確認2021月8月12日)にて調べ、ずり山の位置を特定した。ずり山の植生回復の広域的要因を検討するために空中写真を用いた。直近5年以内(2015年以降)の空中写真が入手可能な炭鉱地を厳選した結果、15か所が対象となった(表1)。

### 2. 調査項目

本研究では、植生回復を評価する指標として平均樹高と植被率を選定した。ずり山の植生発達に影響を及ぼしている要因としては、周辺植生, 斜度, TWI (Topographic wetness index), 植生の有無, 地形変化割合, 経過年数を考慮した。周辺植生は、種子供給源として、採掘跡地の植物相を決定する主要な要因であること (Kopeć *et al.* 2011), 最後の採掘からの経過年数が植生発達に影響を及ぼすこと (Gilardelli *et al.* 2016 ; Tischew *et al.* 2014 ; Šebelíková *et al.* 2019) が明らかとなっていることから選定した。植生の有無に関しては、空知地域においては露天掘り跡地において植林が行われており(新村ほか

1981), ずり山においても植林による影響が考えられることから選定した。地形的な要因として、斜度とTWIを選定した。TWIは、地形的な湿潤指標であり、基盤地図情報などの地形情報から算出することが可能な指標である。TWIは維管束植物と種多様性の空間分布に影響する要因であることから選定した (Sørensen *et al.* 2006)。また、ずり山内で崩壊や再採掘が生じていることが空中写真から確認されたため、これらの影響を考慮すべく地形変化割合を選定した。

#### (1) 立体視による調査

ずり山に生育するすべての樹木の平均樹高, 植被率, 周辺森林率の測定を、Stereo Viewer pro (電子実体鏡:株式会社フォテック, 以下SVpro)を用いて行った。SVproは、空中写真をPC上で立体視するソフトウェアである。立体視を行う際には、撮影時に隣り合った2枚の空中写真と外部標定要素・空中三角測量成果を用いた。空中写真(表1)は2015年以降に撮影されたものを国土地理院・林野庁より入手して行った。測定の際、地表面の基準となる基盤地図情報数値標高モデル (DEM: Digital Elevation Model) は国土地理院より入手した。より正確な樹高を算出するために数値標高モデル (5mDEM) を用いることとした。公共データの数値標高モデル (5mDEM) が存在していなかった箇所ではSVproで空中写真を基に地表面をプロットし、ArcGIS Desktop ArcMap 10.7.1 (ESRI, Inc. USA) で作成した数値標高モデル (5mDEM) を代替として用いた。

### (1-1) 植被率

まず、SVpro を用いてずり山のポリゴンを作成した。この際、植生の発達していない閉山年付近の空中写真と照らし合わせながら、ずり山の形状を確認した。つぎに、各ずり山ポリゴンを 10 m × 10 m グリッドセルに区切り、セル内の 8 割が植生で占められている箇所を植被ありと判定した。植被ありのグリッドセルをずり山ごとに集計することで、植被ポリゴンを作成した。これらのポリゴンデータを、ArcMap に取り込み、その面積を算出した（ずり山面積：1.3 ~ 15 ha）。最終的には、式 1 を用いて植被率を算出した。

$$\text{植被率(\%)} = \frac{\text{植被面積}}{\text{ずり山面積}} \times 100 \quad \text{：式 1}$$

### (1-2) 平均樹高

平均樹高について、ずり山上に生育しているすべての樹木の樹頂点を SVpro で打ち、Shape ファイルを ArcMap (ver.10.7.1) に取り込んだ。樹頂点の計測時は、空中写真を最大に拡大して行った。その後、数値標高モデル (5mDEM) との差分から個々の樹木の樹高データを算出した。樹高データを平均して、ずり山単位で樹高の平均値を得た。

### (1-3) 周辺森林率

木本の種子散布距離を考慮し、シードソースとして機能すると考えられるずり山の周囲 100 m の森林率を測定した (Masaki *et al.* 2019)。まず、ArcMap によりずり山周囲から 100 m のバッファを発生させた。その後空中写真を基に SVpro にて、バッファ内に森林のポリゴンを作成した。作成したポリゴンを ArcMap 上に取り込み、面積を求め、式 2 より周辺森林率を算出した。

$$\text{周辺森林率(\%)} = \frac{100\text{m バッファ内森林面積}}{100\text{m バッファ面積}} \times 100 \quad \text{：式 2}$$

### (2) 基盤地図情報の画像解析による地形の測定

国土地理院より入手した数値標高モデル (5mDEM) を基に、ずり山のポリゴン内の斜度と TWI の平均値を ArcMap で算出した。斜度については、ArcMap 上の Slope ツールを用いて算出した。TWI は、ArcMap 上で式 3 を用いて求め、その後平均値を算出した。

$$TWI = \ln\left(\frac{a}{\tan\beta}\right) \quad \text{：式 3}$$

a : 等高線長辺りの寄与集水域面積,  $\beta$  : 斜度

### (3) 空中写真判読

地形改変割合と植生の有無は、国土地理院の空中写真の判読により調査した。

地形改変割合は、ずり山のうち崩壊・再採掘等によって形状が変化した面積割合と定義した。閉山年に最も近いずり山の空中写真から立体視に使用した空中写真 (最新) までに存在する空中写真すべてを比較し、閉山から現在に至るまでに形状が変化した面積の割合 (%) を垂直投影により調査した。変化が見られない場合において変化率は 0 とした。

植生の有無は、各炭鉱地の閉山年付近から 2020 年までの空中写真を比較し、ずり山内において植林が行われているかを判読した。

### (4) 閉山年の文献調査

ずり山の経過年数は、炭鉱閉山年から 2020 年までをずり山が成立してから経過した年数とし、閉山年は北海道炭鉱総覧 (北海道炭鉱資料総覧 2006)、廃墟検索地図 (廃墟検索地図 <https://haikyo.info/> 最終確認 2021 年 8 月 12 日) より決定した。

## 3. 統計解析

すべての解析は、R version 4.0.3 (R Core Team 2020) を用いて行った。

ずり山の植生回復に対する各環境要因の相対的な影響を明らかにするため、一般化線形モデル (GLM, 誤差構造 : 正規分布, リンク関数 : identity) を用いて解析した。応答変数を植被面積, 平均樹高とし, 説明変数は平均斜度, TWI, 地形改変割合, 植生の有無, 経過年数, 周辺森林率とした。植被面積では, ずり山の大きさによる影響を考慮して, 応答変数は植被面積, オフセット項にずり山面積とした (以降植被率とする)。平均樹高の解析では, 説明変数から周辺森林率のみ除外した。各応答変数に対して, 総当たり法でモデルを構築し, ベストモデル (AIC が最小のモデル) との AIC の差 ( $\Delta AICc$ ) が 2 以下のモデルがなかった場合には, ベストモデルを選択した。 $\Delta AICc$  が 2 以下のモデルが複数あった場合には, モデル平均を行った。

GLM の応答変数と説明変数の関係を散布図で確認したところ, 斜度が小さいときには植被率がそれほど変化しないが, 斜度が高いときに植被率が低下するパターンがみられた。この閾値を調べ, ずり山の植生回復を目指した管理指標を提示するため segmented 回帰を用いて解析した [パッケージ

“segmented” version 1.3-0 (Muggeo 2020)]. 応答変数に植被率, 閾値を探索する変数を斜度とし, その他の説明変数は AICc 最小の GLM と同様のものを用いた. 斜度の閾値とその 90%信頼区間を算出した.

### 結果

調査による測定結果は表 2 の通りになった.

表 2. 植生回復の指標と影響する要因の測定結果(植生の有無は植生有を 1, 無を 0 と示す.)

調査地ID	植被率 (%)	平均樹高 (m)	経過年数 (年)	斜度 (°)	TWI	周辺森林率 (%)	植生	地形改変割合 (%)
1	36.19	7.18	30	26.89	3.70	80.27	0	0
2	46.37	5.70	40	26.58	4.16	47.95	1	0
3	100.00	23.49	48	23.95	3.95	71.32	1	0
4	96.31	8.33	47	23.52	3.91	79.39	0	70
5	90.36	18.87	32	14.45	5.10	56.84	0	100
6	66.00	9.42	50	24.49	3.55	58.65	0	50
7	60.82	12.11	44	26.08	3.81	94.47	1	0
8	15.57	2.44	43	29.29	3.66	49.14	0	30
9	49.99	4.55	33	27.23	3.75	39.95	0	0
10	85.02	8.08	28	17.81	4.47	37.22	0	80
11	82.26	13.63	53	24.08	5.10	97.00	0	30
12	100.00	11.33	57	25.32	4.06	11.87	0	0
13	96.29	10.94	47	22.45	4.63	81.45	1	0
14	80.38	8.71	26	18.10	5.02	84.95	1	20
15	47.13	7.25	48	22.34	3.78	70.95	0	30

表 3. 応答変数を植被率 (植被面積) とした場合の GLM モデル一覧

	説明変数						AICc	ΔAICc
	斜度	年数	地形改変割合	植生	TWI	周辺森林率		
1	-5780	2228					342.4	0
2	-6532	2251	-130.5				346.4	3.97
3	-5788	2248		6437			346.4	4.01
4	-6579	2254			-7882		346.5	4.08
5	-5816	2234				-74.86	346.9	4.46

AICcが低い5つのモデル. 各説明変数の値は係数を, 空欄はモデルに含まれないことを示す.

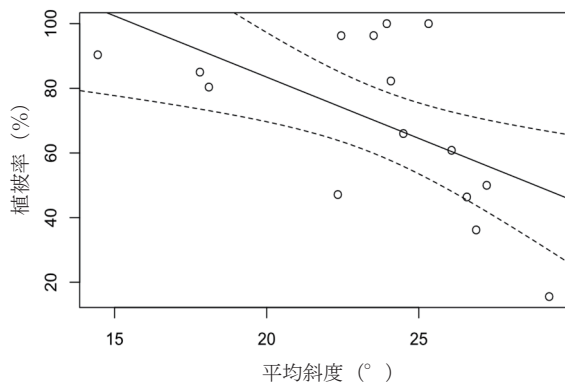


図 3. 斜度と植被率の関係 (点線は 90%信頼区間を表す.)

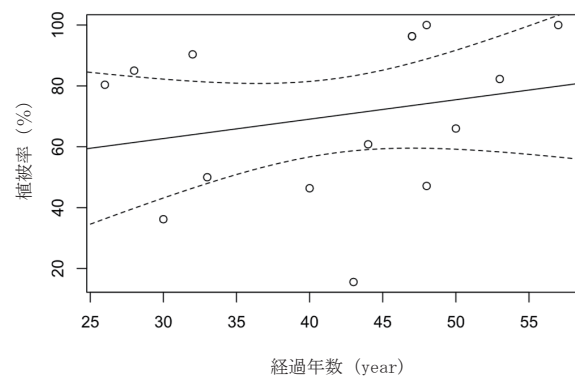


図 4. 経過年数と植被率の関係 (点線は 90%信頼区間を表す.)

## 2. 平均樹高に対する各要因の影響

植被率の解析結果と同様に、斜度、経過年数を説明変数とするモデルの AICc が最小となった (表 4)。 $\Delta AICc$  が 2 以下のモデルを対象としたモデル平均の結果、斜度と経過年数において有意差がみられた ( $p < 0.1$ , 表 5)。斜度は平均樹高に対して負の影響を及ぼしていた (図 5)。一方、経過年数は平均樹高に対して正の影響を及ぼしていた (図 6)。TWI の影響は有意ではなかった ( $p > 0.1$ , 表 5)。平均樹高に対する地形改変割合、植林の有無の影響は見られなかった。

## 3. 閾値解析

斜度と植被率の関係の変化に関しては、変曲点は  $25.3^\circ$  (90%信頼区間:  $23.32^\circ \sim 27.32^\circ$ ) となった (図 7)。斜度の係数の推定値は変曲点を境に -1.9 から -13.7 に変化した。経過年数の最大値 (57 年)、平均値 (41.7 年)、最小値 (26 年) 別に予測した結果、 $25^\circ$  以下であればずり山は採掘後 26 年経過で植被率は 65% 以上に、57 年の経過では 85% 以上に回復することが予測された (図 7)。一方、斜度が  $25^\circ$  以上になると斜度の負の影響が大きくなり、平均斜度  $28^\circ$  では 57 年経過しても植被率は 40% 程度の回復にとどまると予測された。

## 考 察

GLM による解析の結果、植被率と平均樹高は炭鉱閉山からの経過年数と斜度に規定されることが分かった。

経過年数は、植被率と平均樹高に対して正の影響を及ぼしていた。この結果は、ずり山の植生発達に経過年数が影響を及ぼすとする従来の研究結果と合致する。ドイツにある炭鉱跡地での研究では、自然に植生が回復した地点においても、緑化工事によって植生を回復させた地点でも 30 ~ 40 年あたりまで年数の増加と共に植被率が増加していることが明らかとなっている (Tischew *et al.* 2014)。Šebelíková *et al.* (2019) もチェコ共和国の採掘跡地で、樹木の種数や植被率が継続的に増加していることを報告している。年数の経過に伴う植被率の増加には、構成する植物の生活型の変化も要因として考えられる。ポーランドにある炭鉱跡地のずり山で行われた研究では、30 年経過時には一年生植物・地中・半地中植物が優占していたが、30 年 ~ 60 年経過すると木本も出現し、60 年以上経過すれば樹木の優占する環境へと遷移していくことが明らかとなっている (Stachowiak *et al.* 2014)。採掘放棄地のような生産性の低い環境は希少であるため、そうした環境を好む種にとって採掘放棄地が重要な生息地となりうるこ

表 4. 応答変数を平均樹高とした場合の GLM モデル一覧

	説明変数				AICc	$\Delta AICc$
	斜度	年数	TWI	植林		
1	-0.8400	0.2642			97.1	0.00
2	NULL				97.2	0.05
3	-0.5833				97.3	0.12
4			3.7620		98.0	0.89
5				3.0840	99.2	2.03

$\Delta AICc$  が低い 5 つのモデル、各説明変数の値は係数を、空欄はモデルに含まれないことを示す。説明変数は 5 つのモデルに含まれたものを示す。

表 5.  $\Delta AICc$  が 2 以下を抽出して行ったモデル平均 (応答変数は平均樹高)

説明変数	推定値	標準偏差	90%信頼区間		
斜度	-0.39	0.44	-1.35	to	-0.08*
経過年数	0.07	0.14	0.02	to	0.51*
TWI	0.68	1.80	-0.73	to	8.25

(\*:  $p < 0.1$ ) を示す。

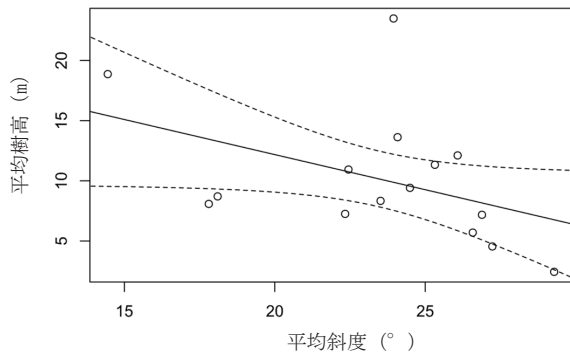


図 5. 斜度と平均樹高の関係 (点線は 90%信頼区間を示す.)

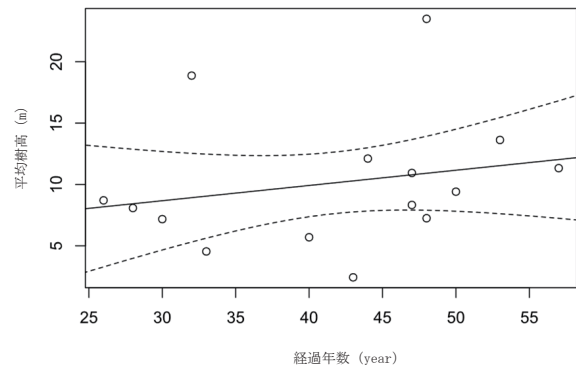


図 6. 斜度と経過年数の関係 (点線は 90%信頼区間を示す.)

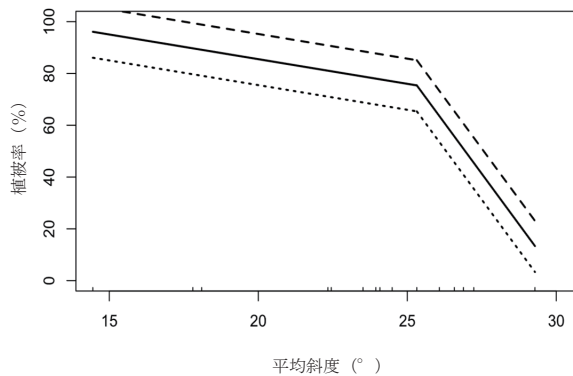


図 7. 斜度と植被率の関係 (Segmented 回帰)  
(点線が経過年数 57 年 (最大値) を示し, 実線は経過年数 41.7 年 (平均値), ドット線は経過年数 26 年 (最小値) を示す.)



図 8. 清水沢炭鉱ずり山整備の様子 (北海道夕張市)

とが明らかとなっている (Kirmer *et al.* 2008). たとえば, チェコ共和国全域におけるずり山を含む炭鉱跡地での調査では, 生育する植物種の約 1 割が絶滅危惧種であったずり山も確認されている (Řehounková *et al.* 2020). 本研究では種構成の変化や遷移の過程は不明だが, 上記の研究例のように, 日本でもずり山が様々な生物種の重要な生息地となって地域の生物多様性の保全に貢献する可能性があるため, 今後はいつ, どのような植生が発達するのか, 周囲の天然林との種構成の違いなどの調査が必要である.

斜度は植被率と平均樹高に対して, 負の影響を及ぼしていた. 斜度の増大に伴い, 斜面からの土砂の流出量は増大することが知られている (Huat *et al.* 2006). そして, 植生がない場所においてはこの傾向は顕著であることが明らかとなっている (Cerdá & García-Fayos 1997). 以上より, 斜度が大きくなるにつれ, 表面侵食も増大していると推察される. 一方, 土壌侵食は, 種子の流出や表層からの養分流出, 直接的な植物の流亡, 水の地表流出による水分の欠乏等により植物の成長に対し負の影響を及ぼす (Espigares *et al.* 2011). これらのことから, ずり山の

斜度の大きさが土壌の表面侵食に影響し, 植物の活着や成長が阻害され, さらなる表面侵食に繋がるという悪循環が生じていると考えられる. 空知地方のずり山において植被率と斜度の関係性は 25° で変化することがわかった. ずり山の粒径にも依存するが, 土壌の安息角が影響していると考えられる (Metcalf 1966 ; Guo *et al.* 2014). 本研究の結果は, 25° 以下のずり山において植被率が 60%まで回復するには 26 年を要し, 75%まで回復するためには 42 年を要することも明らかになった. 一方, 25° 以上になると斜度の増加に伴い植被率は急激に減少することから, 植生の発達は難しいことを示唆している. 斜度と植被率と年数の関係性は本研究において新たに得られた知見であると考えられ, 植生回復を検討する際の指針として利用できる. しかしながら, 各炭鉱跡地での地域づくりを推進し, 持続可能な管理をより詳細に計画していくためには, 各ずり山における種構成の変化や遷移の過程を解明し, 方位などの局所要因が植生回復に及ぼす影響を調べる必要がある.



## 管理への提言

本研究の結果から、斜度と年数経過を考慮した植生回復計画を行うことが重要であると考えられた。まず斜度を 25° 以下に保つことで植被率は 42 年経過すれば 75% まで回復することが示唆された。また、平均樹高も斜度が緩いほど高くなることが予測された。自然に植生が侵入して回復した地点は植林した地点と比較して種多様性が高いことがわかっている (Šebelíková *et al.* 2019)。このような地域で斜度の緩い箇所においては、人為的な介入をせずに自然回復を待つ方が種多様性の観点からはより効率的な管理方針といえる。一方で、25° 以上の斜度を持つずり山において植被率の回復が遅くなり、また斜度の増加に伴い平均樹高は低くなる傾向がみられたことから、25° 以上のずり山では年数の経過を待つだけでは十分な植生の発達が見込めないと予測できる。よって、25° 以上の斜度を持つずり山で、植被率や平均樹高を高めるためには、斜度を下げる施工や緑化工等が必要だと考えられる。また、本研究より斜面斜度の閾値指標として示された斜度 25° は数値標高モデル (DEM) や空中写真より得られた値であり、現地計測による結果とは異なることに留意する必要がある。しかしながら、本研究も含めずり山に関する知見や管理指針は、炭鉱地での地域づくりを検討する際の 1 つの判断材料としての機能することが期待できる。近年、炭鉱跡地等の産業遺産の歴史的な価値を再認識し、文化的・観光的な用途へ転換する試みが実施されている (Pardo Abad 2017)。実際にドイツのルール地方では産業遺産トレイルが造られ、炭鉱の歴史を後世に伝える教育的価値が高まっているといえる (Somoza-Medina & Monteserin-Abella 2021)。ずり山は、時間経過とともに徐々に失われていく炭鉱施設に対し、炭鉱地の存在と石炭産業の大きさを視覚的に伝えるものとして機能し得る唯一の遺産である。この機能を長期にわたって維持していくためには、安全性の高いずり山の形成、管理が必要不可欠である。空知地域では日本遺産に認定されている赤間炭鉱ズリ山に加えて、夕張市の清水沢炭鉱ズリ山においても散歩等の生活や歴史を学ぶ遺産として利用できるように地域の方々が整備を行う (図 8) など、炭鉱遺産を活用した街づくりを行っており、取り組みは各地に広がっている (一般社団法人清水沢プロジェクト「清水沢炭鉱ずり山」<https://www.shimizusawa.com/zuriyama%20> 最終確認

2022 年 2 月 15 日)。本論で提案した炭鉱跡地の管理指針は、こうした地域づくりにも貢献すると考える。

## 謝 辞

基盤地図情報数値標高モデル (5mDEM) への変換に関しては、酪農学園大学小野貴司研究員にご助言いただきました。清水沢プロジェクトの佐藤真奈美氏には、ずり山や炭鉱地の情報を頂くなど、様々なご援助を頂きました。ここに記して厚くお礼申し上げます。

## 引用文献

- 阿部和時. 1984. 樹木根系の分布特性と斜面の保護・安定効果. 緑化工技術 10(3):1-9.
- Bradshaw, A.D. 1993. Restoration ecology as a science. *Restoration Ecology* 1: 71-73.
- Bradshaw, A.D. 1997. Restoration of mined lands-using natural processes. *Ecological Engineering* 8(4): 255-269.
- Cerdá, A. and García-Fayos, P. 1997. The influence of slope angle on sediment, water and seed losses on badland landscapes. *Geomorphology* 18(2): 77-90.
- Espigares, T. Moreno-De Las Heras, M. and Nicolau, J.M. 2011. Performance of vegetation in reclaimed slopes affected by soil erosion. *Restoration Ecology* 19(1): 35-44.
- Gilardelli, F., Sgorbati, S., Armiraglio, S., Citterio, S. and Gentili, R. 2016. Assigning plant communities to a successional phase: Time trends in abandoned limestone quarries. *Plant Biosystems* 150(4): 799-808.
- Guo, Z., Chen, X., Liu, H., Guo, Q., Guo, X. and Lu, H. 2014. Theoretical and experimental investigation on angle of repose of biomass-coal blends. *Fuel* 116: 131-139.
- Kirmer, A., Tischew, S., Ozinga, W. A., Von Lampe, M., Baasch, A. and Van Groenendael, J. M. 2008. Importance of regional species pools and functional traits in colonization processes: predicting recolonization after large-scale destruction of ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 45(5): 1523-1530.
- Kopeć, D., Zajac, I. and Halladin-Dąbrowska, A. 2011. The influence of surrounding vegetation on the flora of post-mining area. *Biodiversity Research and*

- Conservation 24: 29-38.
- Hodačová, D. and Prach, K. 2003. Spoil heap from brown coal mining : technical reclamation versus Spontaneous revegetation. *Restoration Ecology* 11(3): 385-391.
- Höök, M., Zittel, W., Schindler, J. and Aleklett, K. 2010. Global coal production outlooks based on a logistic model. *Fuel* 89(11): 3546-3558.
- 北海道炭鉱資料総覧. 2006. 空知地方史研究協議会. 3-4.
- Huat, Bujang BK., Ali, Faisal HJ. and Low, T. H. 2006. Water infiltration characteristics of unsaturated soil slope and its effect on suction and stability. *Geotechnical and Geological Engineering* 24(5): 1293-1306.
- 古田智昭・古田寛・宮地洋一. 2006. ラス張工を省略した厚層基材吹付工によるぼた山の樹林化事例. *日本緑化工学会誌* 32(1): 207-210.
- International Energy Agency. 2020. Coal Information Overview Statistic report, World total coal production 1971-2019 provisional <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-total-coal-production-1971-2019-provisional> 2021/2/15 最終閲覧.
- 経済産業省. 2019. 令和元年度産業保安等技術基準策定研究開発等（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）.
- 国土交通省. 地すべり等防止法（昭和33年3月31日法律第30号）. 国土交通省.
- Lacey, Gaynor N. 1972. Observation of Aberfan. *Journal of Psychosomatic Research* 16(4): 257-260.
- Lin, B. Q. and Liu, J. H. 2010. Estimating coal production peak and trends of coal imports in China. *Energy Policy* 38(1): 512-519.
- Masaki, T., Nakashizuka, T., Niiyama, K., Tanaka, H., Iida, S., Bullock, J. M. and Naoe, S. 2019. Impact of the spatial uncertainty of seed dispersal on tree colonization dynamics in a temperate forest. *Oikos* 128(12): 1816-1828.
- Muggeo, M. R. 2020. Regression Models with Break-Points/Change-Points Estimation, package “segmented”, version 1.3-1.
- Metcalf, J. R. 1966. Angle of repose and internal friction. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 3: 155-161.
- Moreno-de Las Heras, M. Nicolau, J. M. and Espigares, T. 2008. Vegetation succession in reclaimed coal-mining slopes in a Mediterranean-dry environment. *Ecological Engineer* 34(2):168-178.
- Pardo Abad, C. J. 2017. The post-industrial landscapes of Riotinto and Almadén, Spain: scenic value, heritage and sustainable tourism. *Journal of Heritage Tourism* 12(4): 331-346.
- Řehouňková, K., Vítovcová, K. and Prach, K. 2020. Threatened vascular plant species in spontaneously revegetated post - mining sites. *Restoration Ecology* 28(3): 679-686.
- Šebelíková, L., Řehouňková, K. and Prach, K. 2016. Spontaneous revegetation vs. forestry reclamation in post-mining sand pits. *Environmental Science and Pollution Research* 23(14): 13598-13605.
- Šebelíková, L., Csicssek, G., Kirmer, A., Vítovcová, K., Ortmann-Ajkai, A., Prach, K. and Řehouňková, K. 2019. Spontaneous revegetation versus forestry reclamation—Vegetation development in coal mining spoil heaps across Central Europe. *Land Degradation & Development* 30: 348-356.
- 資源エネルギー庁. 2020. 令和元年度エネルギーに関する年次報告. エネルギー白書 2020.
- 新村義明・伊藤重右エ門・成田俊司・清水一. 1981. 北海道における山腹植生工法の研究（1）—道南・道央地域での既施工地の実態—. *北海道林業試験場報告* 19: 151-177.
- Skousen, J. and Zipper, C.E. 2021. Coal Mining and Reclamation in Appalachia. *Appalachia’s Coal-Mined Landscapes*: 55-83.
- Somoza-Medina, X. and Monteserín-Abella, O. 2021. The sustainability of industrial heritage tourism far from the axes of economic development in Europe: Two case studies. *Sustainability* 13(3): 1077.
- Stachowiak, A., Szary, M., Ziemer, B., Besenyi, L. and Woźniak G. 2014. An application of the plant functional group concept to practice on coal mine spoil heaps. *Ecological Research* 29(5): 843-853.
- Surface Mining Control and Reclamation Act of 1977, Public Law 95-87, United States of America.
- Sørensen, R., Zinko, U. and Seibert, J. 2006. On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences* 10(1):101-112.
- 炭鉄港推進協議会編. 2021. 北の産業革命「炭鉄港」本邦国策を北海道に見よ！ 炭鉄港推進協議会 北

海道.

Tischew, S., Baasch, A., Grunert, H. and Kirmer, A. 2014.

How to develop native plant communities in heavily altered ecosystem; Example from large-scale surface mining in Germany. *Applied Vegetation Science* 17(2): 288-301.

World Energy Outlook. 2020. IEA Flagship report <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020> 2022/4/28 最終閲覧.