

生物学とi-Constructionが拓く 「創造的かつ藻造的復興」の可能性について

小林 駿斗¹・高田 英和¹・高井 静也¹・春名 理都¹・今村 修二²

¹能登復興事務所 工務第三課 (〒926-0046 石川県七尾市神明町ロ12番地2NTT七尾ビル3階)

²能登復興事務所 (〒926-0046 石川県七尾市神明町ロ12番地2NTT七尾ビル3階)

2024年1月1日(月)16時10分に石川県能登地方を震源とするMj7.6, 最大震度7の「令和6年能登半島地震」が発生した。Mj7.6の地震の前後数分の間にもMj5.7やMj5.9の規模の大きな地震が発生し、強い揺れが長く続いた。さらに同年9月の令和6年奥能登豪雨が追い打ちをかけ、大規模な斜面崩落による通行止や河道閉塞等の甚大な複合被害を受けている。国道249号では道路法第13条に基づく国の直轄代行が適用され、県に代わり国が復旧を進めている。本稿では、同路線における道路斜面の早期復旧を目的とし、ドローンと土壌藻類資材を組み合わせる新たな工法の災害現場での適用可能性と今後の展望を報告する。

キーワード 令和6年能登半島地震, 権限代行, i-Construction, 土壌藻類, 創造的復興

1. はじめに



図-1 位置図

一般国道249号は、七尾市を起点とし能登半島の七尾湾沿いを通過し、珠洲市、輪島市を経て、日本海に沿って金沢市に至る能登半島の主要な幹線道路であり、圏域住民の生活及び経済活動を支えるとともに、災害発生時の緊急輸送においても重要な路線である(図-1)。

令和6年能登半島地震の影響により、逢坂(ほうさか)トンネルの輪島市街地側坑口では、坑口直上の斜面が崩落し、同トンネルは通行不能となった(図-2)。

さらに、珠洲市街地側坑口から同市仁江町に至る区間においても、連続的な道路斜面の崩落が確認され、広範囲にわたる通行止めを余儀なくされた(図-2)。



図-2 逢坂トンネル前後の被災状況



図-3 逢坂トンネル海側迂回路と土砂流出の状況

その後、道路啓開により逢坂トンネル区間は海側迂回路の整備(図-3)、珠洲市街地側坑口から同市仁江町に至る区間においては崩落土砂の撤去が完了し、それぞれ通行が確保された。

しかし、崩落箇所では植生が失われたことにより、斜面が裸地化した状態にあり、降雨のたびに表層侵食による土砂流出が再発している(図-3)。

本地域の斜面を構成する珪藻質軟岩は、スレーキングによる細粒化が生じやすく¹⁾、植生の自然定着が極めて困難な難植生斜面であり、車道部への土砂流出が繰り返され、通行止めを余儀なくされるという課題が顕在化した。本稿では、スレーキングや表層侵食の進行により、植物の初期定着および生育が阻害される斜面を「難植生斜面」と定義する。

崩落により植生を失い裸地化した斜面は、降雨等の外力による表層侵食に対して極めて脆弱であり、これを放置した場合は更なる大規模な二次崩落を誘発する危険性が高い。したがって、二次災害防止の観点から早期の表面侵食に対する安定化対策が不可欠である。しかしながら、従来の災害復旧事業では、詳細調査、設計、工事発注、契約から施工に至る一連の段階的手続きに起因し、一定の期間(タイムラグ)を要することが課題となっている。この「本格復旧までの空白期間」における斜面のリスク管理および応急的な安定化の確保こそが、災害復旧における喫緊の課題である。

奥能登地域は、少子高齢化に伴う生産年齢人口の減少が顕著であり、災害復旧事業における慢性的な人手不足が深刻な課題となっている。更に、半島特有の地理的制約や既存インフラの損壊により、遠方から労働者を受け入れるための宿舍(宿舍用地・仮設宿舍)の確保が極めて困難な状況にある。

これに加え、昨今の建設資機材や材料価格の高騰は、復旧コストにおける不確実性を増大させる新たな要因となっている。これら「労働力不足」、「宿舍不足」、「資機材価格の高騰」に起因する複合的な資源制約下において、多大な労働力と資機材の大量消費を前提とした従来型工法の適用は限界に達しつつある。したがって、限られた資源にて迅速かつ安全に道路機能を回復させるためには、抜本的な生産性向上を伴う新たな技術体系へのパラダイムシフトが不可欠である。

2. 能登半島の外浦沿岸部の地質特性について

能登半島の外浦沿岸部は、極めて厳しい地質・環境条件を有している。当該地域に広く分布する新第三紀中新世の珪藻質軟岩は、外洋性の細粒珪藻遺骸を主成分とする多孔質な堆積岩であり、物理的風化に対して極めて脆弱な性質を持つ。特に、降雨による吸水膨張と乾燥による収縮の反復に起因する「スレーキング現象」が顕著であり、岩盤表面の急速な細粒化を引き起こしている。この作用により、斜面表層は恒常的に不安定な泥状あるいは剥離状を呈し、通常の植生基盤が定着する前に流亡する主因となっている。加えて、冬

季の北西季節風による塩風害や、令和6年奥能登豪雨に象徴される局地的な猛烈な降雨が、裸地化した斜面の侵食をさらに加速させている。

このような地質学的特性は、土木工学の観点では克服すべき「脆弱な地盤」として定義される一方で、地域文化においては、独自の産業を育む希有な恩恵ともなってきた。その象徴が、室町時代から伝わる珠洲市を国内最大の産地とする伝統工芸品の「七輪」である。七輪とは、木炭を燃料とし、その燃焼熱を利用して調理等の加熱を行う珪藻土から製造される小型の土製焔炉であり、同地域における地質資源の高度利用技術の帰結として位置づけられる。

珪藻土は植物プランクトンの化石が堆積して出来た土であり、微細な連通孔を無数に有する多孔質構造を持ち、極めて優れた断熱性と耐火性を備えている。この特異な多孔質構造は、近年では優れた吸水・調湿機能を持つ日用品(バスマット等)の主材料としても広く認知されている。珠洲の七輪製造においては、良質な珪藻土が地表近くに厚く均一に存在しており、珪藻土を国内で唯一直接ブロック状に採掘する「切り出し」技法が伝統的に継承されてきた。この手法は、地層本来の多孔質構造を維持したまま製品化できるため、粉碎・成形プロセスを経る一般的な成形品と比較して、高い熱効率と構造的堅牢性を両立している。

3. 生物工学的アプローチ(BSC工法)について

(1) BSC(Biological Soil Crust)について

BSCとは、糸状菌類、土壤藻類、地衣類および苔などが地表面の土粒子や土塊を絡めて形成するシート状の土壤微生物のコロニーのことであり、植生遷移の最初に見られる自然現象である²⁾。

BSCが形成されることで地表面の保水性や保肥力が向上し、裸地状態では定着が困難であった維管束植物の生育に適した環境の構築が期待される(図-4)。

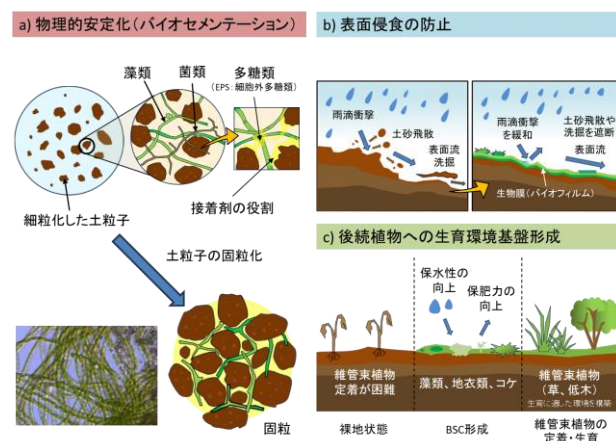


図-4 BSCの機能と期待される役割

(2) BSC工法について

BSC工法は、沖縄県の赤土流出に伴う珊瑚礁の死滅という沖縄の環境問題に対する研究の中で、赤土の主要な発生源の一つとされる沖縄本島北部のパイン畑での赤土流出量の観測から、植え付け直後で葉による被覆が少なくてもBSCが形成されると赤土流出量が少なくなることに基づき開発された。斜面に対して人工培養した土壌侵食防止効果の高い土壌藻類資材を散布することで、自然界における植生遷移のプロセスを人為的に導入・加速させる工法である。従来の植生シート・マット工やラス張りが必要な基材吹付型の自然植生侵入工等と異なり、施工面の凹凸を均し、平坦に仕上げる整形を行わなくても施工が可能である²⁾。

(3) 土壌藻類の自然環境への影響

BSC工法で用いる土壌藻類は、無性生殖による細胞分裂を基本とするため、交雑による遺伝子攪乱のリスクが極めて低い。また、乾燥時には土壌粒子と共に大気中を移動・拡散する特性を持ち、既に汎世界的に分布している。そのため、能登半島国定公園のような自然環境保護区域における法面復旧においても、外来種の移入や固有の植生遷移への干渉を最小限に抑えることが可能である。本工法は、広域分布種を基盤とすることで「自然分布域外からの植物導入」という環境負荷を排除しており、施工制限がある環境下においても極めて有効な手法と考えられる²⁾。

4. 高所崩落面における施工上の課題

能登半島外浦沿岸部の国道249号における復旧現場は、急峻な地形に加え、度重なる地震動と豪雨により地盤が極めて不安定な状態に供されている(図-3)。特に高所部の崩落面は、浮石の落石や二次崩落のリスクが常在しており、従来の人力施工では、作業員の安全確保が極めて困難であった。また、これに対して仮設の足場やプラントを設置することは、工期とコストを要するだけでなく、更なる地盤負荷を招く恐れがある。何より、前述した半島特有の宿舎不足によって現場に投入できる作業員数が物理的に制限され、且つ資機材・材料費が高騰している現在の状況下においては、大規模な仮設工程や大量の材料投入を伴う従来工法は、工期・コスト・資機材調達のあらゆる面で不適當であり、迅速な道路機能の回復を妨げる大きな要因となっていた。

5. 難植生斜面における植生工法の比較検証

難植生斜面の早期安定化に向けて、3種類の植生アプローチを比較した。土壌藻類と種子を混合した「BSC工

法」、物理的・化学的被覆を主とする「侵食防止剤散布」、および従来の「種子散布」について、連続する一連の地質条件・日照条件が概ね同等の崩落斜面を対象とした実証実験を行い、各工法の定着特性を検討した。

(1) 実証実験による比較検証の目的

本実証実験の目的は、災害復旧において喫緊の課題となっている崩落斜面の早期安定化と、それに伴う道路機能の継続的な維持を達成することである。特に、植生定着が極めて困難な難植生斜面を対象とし、従来型植生工法との比較を通じて、BSC工法が表層侵食をどの程度抑制し、持続的な植物定着基盤を形成し得るかを検証する。更に、接近が困難な高所部や二次崩壊リスクの高い危険区域における、ドローンによる遠隔散布技術の有効性を評価し、i-Constructionを基軸とした迅速かつ安全な次世代型災害復旧モデルの確立を目指す。

(2) 実証実験の概要

試験区	植生工法	施工概要	散布方法	施工単価 (直接工事費)
A	BSC工法 (114法面)	土壌藻類資材に種子を混合したものを散布	ドローン	約3,700円/m ²
B	侵食防止剤散布工 (115法面)	物理的・化学的な結合力により地表面を被覆する侵食防止剤を散布	ドローン 地上吹付機械	約3,400円/m ² 約1,100円/m ²
C	種子散布工 (116法面)	従来の植生工として、種子のみを散布	ドローン	約2,900円/m ²
D	無対策区 (114-115法面間)	工法比較の基準とするため、人為的な対策を講じない自然放置区間		

図-5 各試験区の施工概要

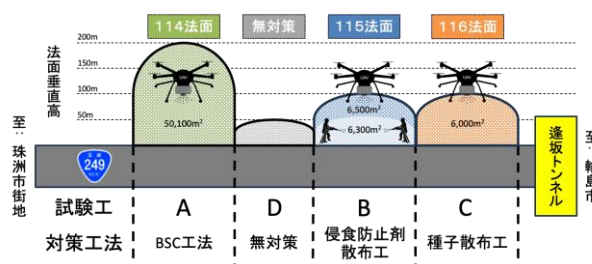


図-6 各試験区の位置関係

珠洲市仁江町の国道249号における連続した崩落斜面を対象とし、各種植生工法の定着特性及び表面侵食抑制効果を比較検証するため、4箇所の試験区を設定して、施工約半年後の経過観察を実施した。特に、本アプローチの中核となるBSC工法については、降雨時の表層侵食が顕著であり、より過酷な環境にある114法面を選定して適用した。各試験区の施工概要を図-5、位置関係を図-6に示す。

実証実験における施工計画の算定においては、斜面

の危険度および地形条件に基づき施工区域の最適化を図った。具体的には、作業員の安全な進入が可能な区域では従来の人力施工による精密な作業を行う一方、人力が及ばない高所、急峻地、および崩落リスクが残存する危険箇所に対しては、ドローンを用いた遠隔散布を適用した。

(3) ドローンの活用と施工プロセス

タンクおよび噴霧ノズルを装備した農業用ドローンを使用し、機体に搭載された散布デバイスから液状の土壌藻類資材および種子を斜面へ均一に噴霧した。使用機体は最大25kgの散布ペイロードと最大運用高度500mの性能を有したものを使用した。

ドローンを用いた施工は、「機体費用」・「維持管理費」・「専門的人件費」・「施工プロセスにおける材料ロス」といったコスト要因により、高所部施工に要する仮設費用を除いた従来の人力施工と比べて直接工事費では約2,000円/㎡の費用増であった(図-5)。地域や現地条件により変動が考えられるが、現時点は概ね従来の人力施工と比較して同程度の費用増が想定される。資機材費が高騰している現在の状況下において、この初期コストの壁は一見すると導入の障壁になり得るが、施工性及び工期短縮による二次災害リスク軽減を含めたライフサイクルコストの観点からは、むしろ高い経済性を有する。具体的には、試験区Aにおける約50,000㎡の広大な法面施工に対して、作業員わずか3名という最小限の編成で、実作業日数11日間という圧倒的なスピードで完了した。これは、従来工法で必須となる仮設足場やプラントの工程を排除し、高度な省人化を同時に達成したことを意味する。特に、奥能登地域で極めて深刻な労働者とその宿舎不足に対し、施工人員を3名に抑制できたことの地域的・社会的価値は大きい。

更に、本BSC工法は法面整形工やラス張り、大規模な基材吹付を必要としないため、材料の絶対的な消費量を劇的に抑制できる。昨今の材料高騰を鑑みれば、調達量を最小限に抑えられる利点は大きい。大規模な仮設費用(足場・プラント)の削減効果、及び早期の道路機能回復による経済損失抑制効果を総合的に勘案すれば、直接工事費の増分を十分に補って余りある経済性を有する。緊急輸送道路等の早期機能復旧が至上命題となる現場において、本工法は革新的な標準技術へと昇華し得る可能性を強く示した。

(4) 経過観察結果と定着特性の評価

施工から約半年が経過した時点での各試験区における定着状況を調査した。その結果、各工法による緑化成績には顕著な差異が認められた。各試験区における施工進捗と定着状況の比較を図-7、施工約半年後の各

工法の植生定着状況比較を図-8に示す。

特に試験区AのBSC工法においては、最も良好かつ均一な生育が確認された。特筆すべき点として、斜面内のガリ(侵食溝)部分において藻類が特に良好に繁茂する傾向が確認された(図-9)。

約半年という短期間で顕著な成果が得られたことは、難植生斜面において、短期間であっても、BSC工法による生物工学的アプローチは、従来の種子散布や物理的被覆と比較して、遜色のない、或いはそれ以上の斜面の安定化効果を発揮することが実証された。

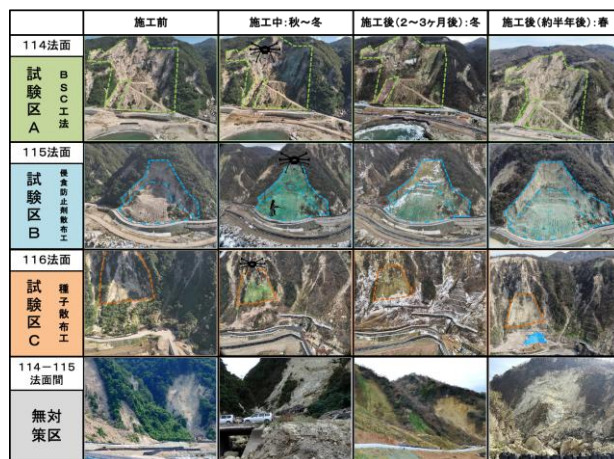


図-7 各試験区における施工進捗と植生定着状況



図-8 各工法の植生定着状況比較(施工約半年後)



図-9 ガリ(侵食溝)部の植生の状況(試験区A:BSC工法)

(5) 生物工学的アプローチによる侵食抑制効果の考察

本実証試験においてBSC工法が高い定着成績を示した要因として、土壤藻類によるバイオセメンテーション効果が挙げられる。同時に土壤藻類が分泌する細胞外多糖類（EPS）が、風化した珪藻質軟岩の微細粒子を結合させたことで、降雨による土砂流出およびスレーキングを効果的に抑制したと考えられる(図-4)。

この微細な地表面の安定化が、同時に散布した種子の流亡を防ぎ、根系の発達を促す「生育基盤の保護層」として機能した。すなわち、i-Construction技術による「迅速な被覆」と生物学による「基盤の物理的・生物的安定化」の相乗効果が、難植生斜面の早期復旧を可能にしたと推察される。

また、ガリ(侵食溝)部において顕著な植生繁茂が確認された要因として、周囲より低位な凹地であるガリ部(侵食溝)が集水域となり、持続的な湿潤環境が維持されたことが挙げられる(図-10)。これは、初期侵食の起点となりやすく個別対策が困難なガリ(侵食溝)部に対して、生物膜が優先的かつ効果的に保護・安定化作用を発揮できるという、BSC工法の極めて実用上極めて有用な施工特性を示唆している。今後は、集中豪雨時の水流に対するBSCの耐侵食特性の限界値の特定、および大雨を経験した後の定着持続性について、継続的なモニタリングを通じて検証していく必要がある。

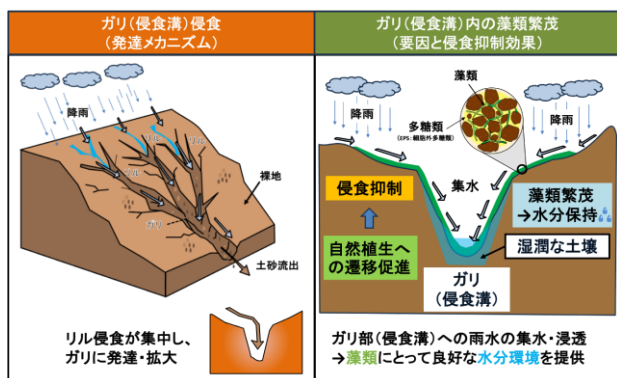


図-10 ガリ(侵食溝)部における藻類繁茂の推測

6. おわりに

実証実験より得られた結論は以下の通りである。

(1) 施工性の革新と生産性向上

ドローンの活用は、崩落リスクが残存する斜面直下における人力施工を排除し、作業員の安全性を飛躍的に向上させた。同時に、従来工法を圧倒する施工スピードを両立し、その有用性を実証した。

(2) 難植生斜面への適応性

珪藻質軟岩のスレーキング現象に対し、土壤藻類が分泌する細胞外多糖類（EPS）によるバイオセメンテーシ

ョン効果が有効に機能し、従来の植生工法を上回る定着成績を得た。特に初期侵食の起点となるガリ(侵食溝)部において生物膜が優先的に保護・安定化作用を発揮する特性が確認された。

(3) 環境保全の両立

広域分布種である土壤藻類を用いることで、国定公園内における環境負荷を排除し、自然な植生遷移を促進できる可能性を示した。

本実証実験により示された「ドローンによる迅速な広域散布」と「生物学による地表面の早期安定化」の相乗効果は、同様の地形的制約や二次災害リスクを抱える他地域の災害現場においても、極めて有効な応急対策となり得ることが示唆された。大型重機や仮設工程を最小限に抑えつつ、ドローンによる迅速な施工が可能なBSC工法は、調査・設計・契約等に時間を要する本格復旧までの空白期間を埋める「応急的な斜面保護工」として極めて高い適応性を示した。

今後は、継続的なモニタリングを通じて、土壤藻類が形成するBSCの持続性と、それに続く維管束植物への植生遷移プロセスを詳細に追跡・検証していく。

一方、昨今の国際情勢等に起因する資機材不足や燃料価格の高騰は、災害復旧における新たなリスクとなっている。実証実験の主役となったドローンは、電力を動力源とするため、施工現場における「脱石油」の可能性を先駆的に示した。過度な人手をかけず、高価な輸入資機材に依存せず、今回使用した土壤藻類のような生物資源技術が、将来的に重機のバイオ燃料生産等へも波及すれば、材料・エネルギー・労働力のすべてにおいて国外情勢や都市部の資源に依存しない「国内循環型かつ自立型の災害復旧・施工体制」が確立される。本稿がその持続可能な復旧モデルの第一歩となることを期待する。

「塩田に百日筋目つけ通し」³⁾奥能登の外浦沿岸で古くから受け継がれる「揚げ浜式製塩」の情景を詠んだ沢木欣一(さわききんいち)のこの俳句は、炎天の下で幾度も砂に筋目をつける能登の人々の根気強さと不屈の精神を象徴している。この地に根付く力強い精神は、奥能登の土から生まれ、劇的な復活を遂げた「珠洲焼」の歴史とも深く結びついている。かつて中世日本において一世を風靡しながらも、室町時代後半に忽然と姿を消し、約400年の時を経て、地域住民や研究者の情熱によってその技法が掘り起こされ、現代に見事な復興を遂げた「一度途絶えながらも、現代の知恵で再生させた」という「珠洲焼」の歩みは、いま複合災害からの再生を目指す能登半島が体現すべき「創造的復興」の精神的支柱そのものである。ここで詠まれる「筋目をつけ通し」という言葉は、単なる労働の描写に留まらず「どれほど過酷な状況であっても守るべき真髄を

絶対に曲げない」という能登の人々の強い意志とも受け取れる。被災した大地をただ元通りにする(原形復旧)だけでなく、能登の人々がこれまで紡いできた歴史、自然との共生、そして文化の「節目」を未来へ向かって美しく通し続けること。それこそが、能登が能登らしく再生するための「創造的復興」の根幹である。500年以上もの間、絶やすことなく受け継がれてきた伝統の「揚げ浜式製塩」の営みと、幾多の試練を乗り越えて蘇った「珠洲焼」の歴史は、形を変え、現代の最先端土木技術の中にも確かな「筋目」として脈々と息づいている。

浜士(はまじ)が海から汲み上げた海水を打桶(おちよけ)を使って塩田に撒き、細攪え(こまざらえ)を用いて塩田の砂に無数の筋目を刻み、表面積を劇的に広げ、太陽と風による蒸発を人為的に加速させるように、BSC工法もまた、最先端のドローンによって土壌藻類資材を斜面へと繰り返し散布していく。伝統技術が筋目によって蒸発を制御するのとは対照的に、自然が法面に刻んだガリ(侵食溝)は、生物工学的に藻類の定着を助ける天然のシェルターとして機能し、雨水を効率的に集水することで、藻類の生存に不可欠な湿潤環境を強固に保持している。このガリに定着した藻類は、微細な土粒子を緊密に結合させるバイオセメンテーション効果を発揮し、強固な生物膜へと安定・結晶化していく。この「撒く技術」と「ガリがもたらす水分保持・自然の結晶化」の融合こそが、難植生斜面を克服する確かな鍵である。

能登半島という地理的最先端の現場で磨かれた今回の知見は、単なる災害復旧の枠組みを超え、生物学とi-Constructionが融合した国土強靱化への第一歩である。かつて珪藻が築いた大地を、現代の藻類が継承し、伝統の「揚げ浜式製塩」の細攪えが刻む筋目の如く過酷な地表面のガリで水分を抱き抱え、力強く定着する。幾多の試練を乗り越えて蘇った「珠洲焼」のように、植生が失われた大地を藻(も)う一度力強く蘇らせる「創造的かつ藻造的復興」が、地域が守るべき真髄という名の「筋目」を美しく通し続け、今後各地で発生し得る災害復旧および減災、さらには持続可能な防災の未来を「見附(みず)」える確かな道標となる。

謝辞：本稿の執筆及び実証実験にあたり、多大なるご協力をいただいた関係者の皆様に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 前川晴義，宮北啓：珪藻質軟岩の力学的特性，土木学会論文報告集，第334号，pp.135-143，1983.
- 2) 富坂峰人，足立幸大：土壌藻類を活用した表面侵食防止工法（BSC工法）について，令和3年度赤土等流出防止交流集会，2021.

- 3) 沢木欣一：「塩田に百日筋目つけ通し」，「塩田」角川書店，1956.