

休廃止鉱山における UAV リモートセンシングの適用と活用案： 北海道枝幸町旧本庫鉱山の事例

Application and Suggestions for Utilization of UAV Remote Sensing in Abandoned Mines: A Case Study on Motokura Mine in Esashi Town, Hokkaido

ABSTRACT

宇佐見 星弥*・藤原 寛*
荻野 激**

USAMI Seiya*, FUJIWARA Kan*
OGINO Tagiru**

受付：2024 年 11 月 29 日

受理：2025 年 1 月 27 日

* 地域地質部地質防災グループ

** 地域地質部地質環境グループ

Corresponding Author USAMI Seiya
usami-seiya@hro.or.jp

While UAV remote sensing is expected to improve the efficiency of maintenance and management tasks in inactive and abandoned mines, case studies on practical implementation remain scarce compared to those in operational mines. This study explores the potential applications and challenges of UAV remote sensing using LiDAR, optical, and infrared sensors for three specific purposes: generation of high-resolution topographic data, investigation of the septic environment of an artificial wetland for mine wastewater treatment, and detection of leaks in water conduits and pipes. These findings confirm the potential of UAV remote sensing for high-resolution topography and wastewater treatment monitoring. However, challenges remain in avoiding the influence of vegetation and selectively detecting leaks.

Keywords: LiDAR sensor, optical sensor, infrared sensor, anti-wastewater treatment

1 はじめに

硫黄や鉄・銅等の金属を採掘していた鉱山では、その操業終了後においても坑道や掘削ズリの堆積場からヒ素や鉛等の有害物質を含む坑廃水の流出が半永久的に続き、それが周辺の河川などの水質悪化の原因となる場合がある¹⁾。したがって、休・閉山後もこれら坑廃水の流出が続く鉱山（以下「休廃止鉱山」という）では、継続的な坑廃水の浄化処理が求められる¹⁾。旧坑口などから流出する坑廃水は導水管により処理施設へ導かれて浄化処理が行われるが、坑廃水を確実に処理するためには導水管を含む水処理関連設備の日々の維持管理が重要となる。しかし、休廃止鉱山は急勾配な斜面に立地する場合が多いにも拘わらず、こうした維持管理は作業員の目視による現地確認が主体であり、導水管の長さが数百 m を超える場合や処理施設が沢沿いにあるなど立地条件が悪いことも多いなど、現地作業員の負担は大きい。

UAV (Unmanned Aerial Vehicle: 無人航空機) は、機体にセンサを搭載することで人が立ち入るのが難しい場所でも遠隔から面的かつ迅速に調査 (遠隔探査: リモートセンシング) できる。経済産業省「鉱山における無人航空機 (ドローン) 活用に関する手引き」²⁾ では、経験豊富な作業員の高齢

化や業務事故に伴う罹災者を減少させる観点から現業鉱山への UAV の導入が期待されている。2023 年 3 月 31 日には、休廃止鉱山を対象にした「特定施設に係る鉱害防止事業の実施に関する基本方針 (第 6 次)」³⁾ における「高効率型鉱害防止事業～坑廃水処理の更なる効率化」の主要項目の 1 つとして UAV を活用した遠隔監視技術が取り上げられており、休廃止鉱山の維持管理における UAV リモートセンシングへの期待が高まっている。

しかし、鉱山における UAV リモートセンシングの適用事例は切土量推定⁴⁾ や鉱山周辺の環境モニタリング⁵⁾ などの現業鉱山を対象にしたものがほとんどであり⁶⁾、休廃止鉱山の維持管理における UAV リモートセンシング活用の実証研究は進んでいない。したがって、休廃止鉱山の維持管理におけるどのような作業に、どのような UAV リモートセンシングを活用すると、どのような利点があるのか、という問いに対して適用事例に基づいた検討が必要である。

我々は道受託研究「休廃止鉱山鉱害防止対策調査」の一環として、北海道枝幸町の旧本庫鉱山 (図 1) を対象に、休廃止鉱山の維持管理における UAV リモートセンシングの活用

可能性について検討を進めてきた。本稿では、令和5年度と令和6年度に取得した観測データに基づき、(1) UAVによる航空レーザ測量（以下「ALS」という）で作成した高精細地形情報の利用、(2) 坑廃水処理用人工湿地における浄化環境調査、(3) 坑廃水用導水管と漏水の検出、以上の休廃止鉱

山の維持管理に必要な3項目について UAV リモートセンシング活用の実証試験結果を報告する。

なお、UAV リモートセンシングは多方面で活用が進められており^{7) 8) 9)}、本稿で取り上げる観測対象物も休廃止鉱山およびその処理施設に立地するという点以外に既往研究の観

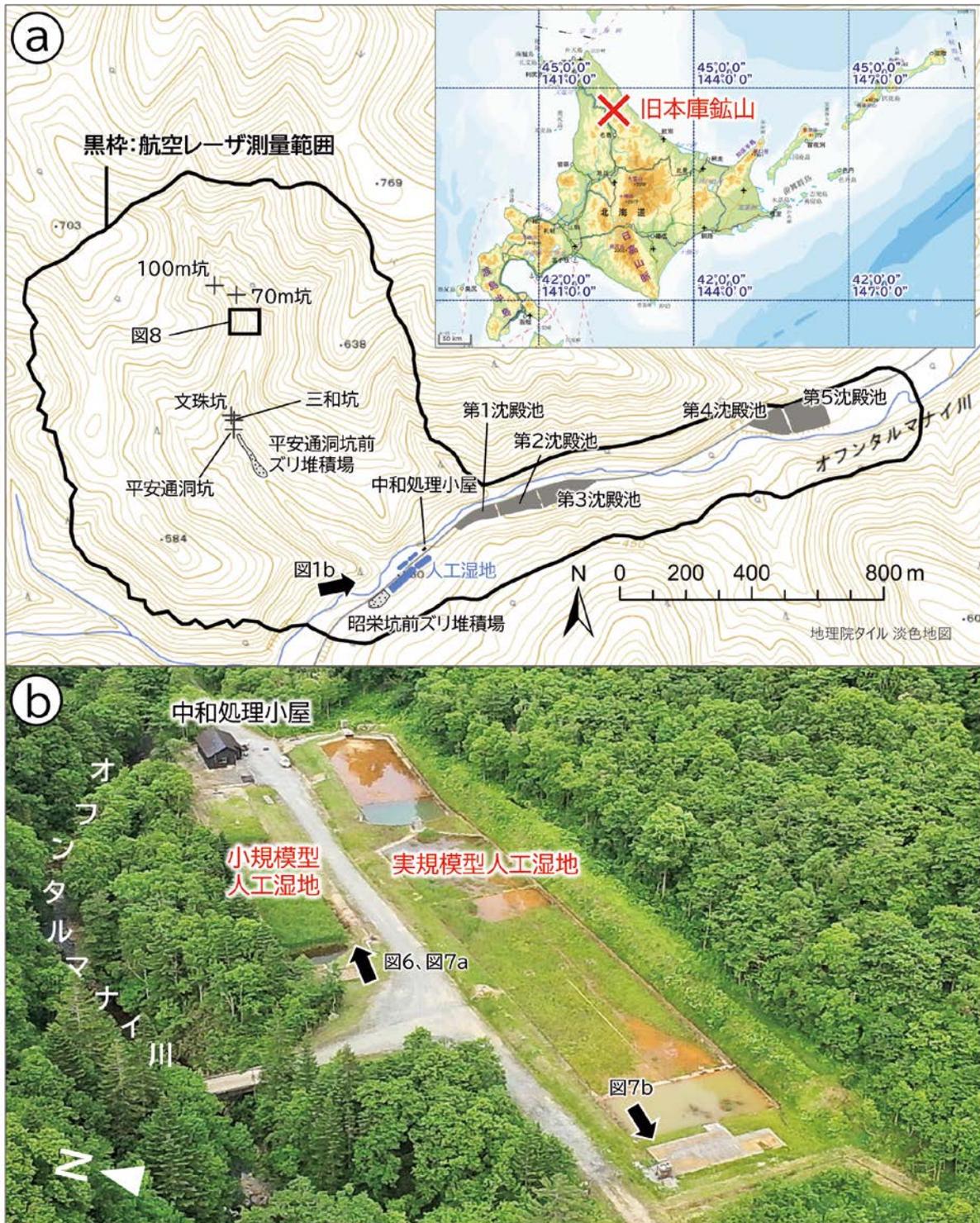


図1 旧本庫鉱山の位置と概観。a. 旧本庫鉱山位置と周辺地形。b. 人工湿地の空撮画像。位置図と周辺地形図には地理院地図を使用した。

Fig. 1 Location and over view of the Motokura mine. a. Location and around topographic map of the Motokura mine. b. Aerial image of the artificial wetland for passive treatment. Location map and topographic map are created by the GSI map.

測対象物と大きな違いはない。その中で本稿の意義は、休廃止鉱山の維持管理における UAV リモートセンシングの活用場面を、我々が先駆的に進めてきた実証試験の結果を提示することで明確にし、技術開発に貢献することである。

2 旧本庫鉱山の概要

旧本庫鉱山は北海道枝幸町に位置する「義務者不存在鉱山」であり（図1）、銅・鉛・亜鉛が採掘されていたが¹⁰⁾¹¹⁾、鉱量の減少・品質低下などから1978年に閉山した¹¹⁾。坑廃水処理は、坑廃水が流れ込むオフタルマナイ川が合流する徳志別川で、1961年と1962年に坑廃水が原因とみられるサクラマスの斃死が発生したこと¹²⁾から、鉱山事業者により開始された¹¹⁾。義務者不存在鉱山への移行後は、北海道が事業主体として坑廃水処理・鉱害防止対策工事を実施している¹¹⁾。

現在、旧本庫鉱山における坑廃水処理はパッシブトリートメントを主体に行われている。複数の旧坑口から流出する坑廃水を斜面に張り巡らせたポリ塩化ビフェニル製の導水管（径150mm；一部で径が100mmの区間あり）を用いて人工湿地まで導水処理している¹³⁾。

パッシブトリートメントとは、人工湿地内の植物や細菌などによる自然浄化機能を用いる坑廃水処理手法であり、環境負荷をできる限り低減した坑廃水処理が期待できる¹⁴⁾。旧本庫鉱山のパッシブトリートメントでは表面流型人工湿地と浸透流型人工湿地が使用されている。このうち表面流型人工湿地にはヨシが繁茂しており、その根圏および水中および土壌中に生育する微生物の酸化還元反応により重金属を沈着さ

せることで坑廃水の浄化処理を行っている¹³⁾。

3 方法

本研究では、DJI社製Matrice 300RTKを使用し、ALSおよび空撮を行った。機体の位置座標は、DJI社製D-RTK2を用いたRTK（Real Time Kinematic）により推定した（図2）。

3.1 高精細地形情報の取得

近年、ALSによる高精細な地形情報の整備が進められており、LiDAR（Light Detecting and Ranging）センサをUAVに搭載することで、高精細地形情報の迅速取得や時系列変化の解析などが行われている¹⁵⁾。近い将来、国内の広い範囲で高精細地形情報が整備されることが想定されており¹⁶⁾、高精細地形情報を休廃止鉱山の維持管理に活用する場面の検討が求められる。

以上のことから、UAVに搭載したLiDARセンサを用いて高精細な地形情報（空間解像度1m以内）を作成し、高精細地形情報を用いた鉱山施設分布の可視化と状態推定について検討した。

使用したLiDARセンサはDJI社製Zenmuse L1であり、オリジナルなLiDARデータの点群密度は1平方メートルあたり500点を満たす。解析にはDJI社製DJI Terra 3.9.4と福井コンピュータ社製Trend Point Ver.10を使用し、植生のフィルタリング後に点群を1平方メートルあたり4点まで間引いた。このように作成した地表面点群データをESRI社製ArcGIS Pro 3.3.2で不整三角網（Triangulated Irregular Network：TIN）にしたあと、ピクセルスペーシング1mの数値標高モデル（Digital Elevation Model：以下「DEM」とい



図2 使用した UAV と周辺機器の概要
Fig. 2 Summary of UAV and peripherals.

う)とした。測量は2024年10月22日に行い、その範囲を図1に黒枠として示す。

3.2 人工湿地の浄化環境調査

パッシブトリートメントに基づく坑廃水処理において、坑廃水の浄化能力に影響する人工湿地内の植生の生育状況を把握することが求められる。しかし、これまでの生育状況調査は目視による定性的な方法か、コドラート法(一定の大きさの区画を標本とみなし、観測対象物の分布密度を計測する手法)など労力がかかる方法に依存しており、調査の定量化と簡便化が求められている。以上のことから、UAVに搭載したLiDARセンサおよび光学カメラを用いて、植生生育状況の定量的かつ迅速な調査を試みた。

さらに、人工湿地内の植生の生育管理や、人工湿地内に堆積した重金属・土砂・植物遺体による人工湿地の嵩上げの把握を目的に、人工湿地の水位の把握も試みた。

LiDARセンサは前述と同じ機器を使用し、解析ではDJI Terra 3.9.4とTrend Point Ver.10を使用して1平方メートルあたり2,000点を満たす点群データとした。なお、植生生育状況の把握では植生フィルタリングは適用していない。光学カメラもZenmuse L1を使用し、7割のオーバーラップをもつように飛行させた。光学カメラ画像のピクセルスペーシングは5cmである。

3.3 坑廃水用導水管と漏水の検出

坑廃水の処理では導水管を通じて坑廃水を確実に処理施設に誘導することが求められることから、坑廃水用導水管の維持管理は極めて重要な課題である。しかし、旧坑口は斜面上にある場合も多く、これに伴い導水管も斜面上を張り巡らされているため、その維持管理には多くの労力と危険を伴う。特に、導水管の老朽化などによる漏水は周辺環境への被害が懸念されることから、UAVリモートセンシングの活用が望まれる。以上のことから、UAVに搭載した光学カメラと赤外センサを使用し、坑廃水用導水管と漏水の検出を試みた。

光学カメラと赤外センサにはDJI社製のZenmuse H20Nを使用し、DJI社製DJI Thermal Analysis Tool 3を用いて解析した。取得画像のピクセルスペーシングは光学カメラが5cm、赤外センサが8cmである。

4 結果と考察

4.1 高精細地形情報の活用案

図3にLiDARの高さ精度を、図4にDEMから作成した高精細地形図を示す。乗用車の車体を利用した高さ精度の検証より、少なくとも上空を植生等に遮られていない場所においてLiDARの点群はセンチメートル精度で地物の凹凸を表現している(図3)。なお、植生がある場所ではLiDARの光線が樹冠を透過してもササを中心とした草本植生を透過することは難しいこと¹⁷⁾から、図4cなどにみられる2m未満の小

さな凹凸は草本植生の形状を反映していると考えられる。

以下では、高精細地形図の判読から確認された特徴的な地形と施設管理における高精細地形情報の意義について述べる。

図4aでは、人工湿地や第1～第5沈殿池といった処理施設の位置と輪郭が鮮明に把握できる。このことは、高精細地形情報が処理施設を定量的かつ立体的に把握し、施設更新や災害時の復旧事業などの対策事業計画を立案する際の基礎情報になり得ることを示す。例えば、第5沈殿池周辺では、2023年8月の降雨によりオプンタルマナイ川左岸側の支沢から出水が発生し、処理施設まで繋がる町道の損傷が生じた。この事例では処理施設への直接的な影響は確認されていないが、処理施設へのアクセスが一時不可能な状態になり、浄化処理に支障をきたす事態となった。今後、同様の事案で処理施設が損傷する可能性があることから、処理施設周辺の高精細地形情報を事前に準備しておくことにより、被災前後の変化に基づいて、どのような現象で、施設のどの部分が、どの程度損傷を受けたのか、を迅速かつ定量的に把握することが可能になり、復旧作業の迅速化と簡便化が期待できる。

図4bでは、100m坑周辺に凹地や不自然な平坦地形がみられる。100m坑の周辺では立坑(通気や資材運搬のために垂直に掘られた坑道)の存在がかねてから指摘されていたが、その具体的な場所は知られていない¹⁰⁾。今回の調査で見出した凹地は100m坑との位置関係から立坑の跡である可能性が高く、仮に立坑である場合、立坑から坑道への雨水等の流入を防ぐことで坑廃水の総量を削減することが期待される。日本庫鋳山での安定した坑廃水処理には坑廃水量の抑制対策が求められており¹⁸⁾、高精細地形情報から過去の鋳山施設分布を地図上に落とし込むことで、その効率化が期待される。また、平坦地形は100m坑との位置関係から、ズリ堆積場の可能性が高い。この堆積場の詳細な図面などは散逸し、不明な点が多いことから、将来的に対策が必要となった場合には、今回の調査で作成した高精細地形情報を対策事業の立案に活用できる。このように、休廃止鋳山では操業時の資料が散逸していたり、あるいは図面が現在の測量精度と乖離している場合も多いことから、高精細地形情報は鋳山施設の正確な位置を把握し、適切な対策を講じるうえで重要な基礎情報として活用が期待できる。

図4cでは、平安通洞坑周辺に斜面下方へ落ち込んだステップ状の重力変形地形(赤破線内)が認められる。図5は重力変形地形を前面から撮影した写真(撮影地点は図4cに示した)であるが、重力変形により平安通洞坑の坑口の一部が破壊されているほか、変形地形の最前面ではトップリング(不連続性岩盤が斜面下方へ回転して倒れかかる現象¹⁹⁾)によるものと考えられる岩盤のたわみが確認され、岩盤が緩み、重力的に不安定なことが示唆される。このことは、今後も平安通洞坑の坑口が斜面変形により破壊されていく可能性

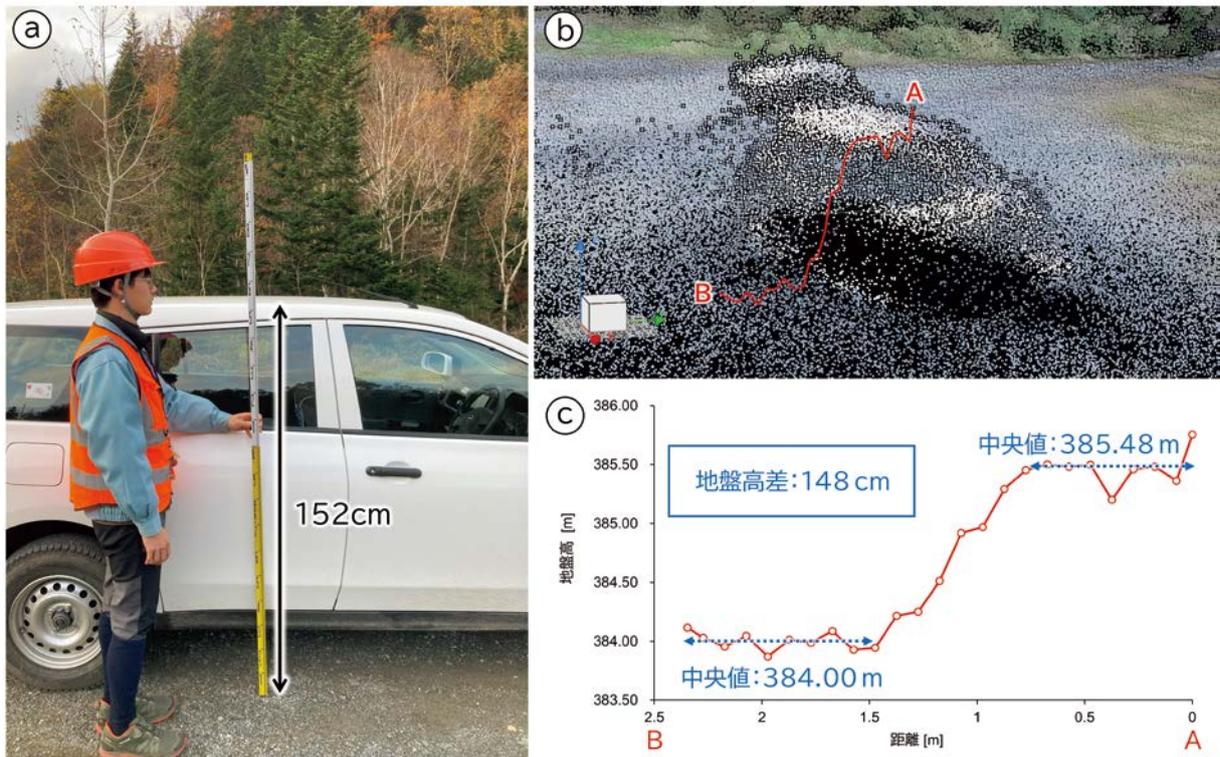


図3 LiDARデータの高さ精度の検討. a. 精度検証に使用した乗用車の車体高. b. 乗用車の点群データと断面図の位置(赤線). c. 点群データの断面図.

Fig. 3 Investigation of the height accuracy of LiDAR data. a. Height of car body used for accuracy verification. b. Point cloud data and cross section (red line) around the car. c. Cross section of point cloud data.

を示している。

以上のように、高精細地形情報は鉱山施設の被災状況や処理施設の被災リスクの検討および鉱山施設の立地を調査する際の基礎情報としての活用が期待できる。

4.2 人工湿地の浄化環境調査の結果

図6にLiDARセンサで取得した点群と現地で計測した人工湿地内のヨシの背丈との関係を示す。LiDARデータは2024年10月22日に取得した。この時期を選んだのは、ヨシが枯れて人工湿地内の植生間隙が広がることから、LiDARセンサと実測値との較差が最も大きくなる(較差の最大値を把握する)ことを想定したためである。図6より、実測したヨシの背丈(約250 cm; 図6a)に対してLiDARデータの比高は185 cmであり(図6c)、65 cmの較差がみられた。LiDARセンサが計測したヨシの比高を実測時の写真と比べると、180 cm以上はヨシの穂に相当する。すなわち、LiDARの一部の光線はヨシの穂の間を透過し、ヨシの葉や茎で反射していると考えられる。

LiDARセンサとは異なり、光学カメラで撮影した複数の画像から3次元形状を復元するSfM (Structure from Motion) という手法がある²⁰⁾。光学カメラであればLiDARセンサよりも安価に入手でき、またLiDARセンサによる計測の際に問題となったヨシの穂を光線が透過してしまう影響を

低減することも期待できる。以上のことから、図6と同時に取得した空撮写真のSfMから数値表層モデル(Digital Surface Model: DSM)を作成し、ヨシの高さ計測を試みた(図7a)。ヨシの高さ計測(図7a)では、SfMで計測したヨシの高さが実測した高さ(250 cm; 図6)よりも1 m以上過小評価された。この理由は定かではないが、例えば撮影時にヨシが風に煽られて高さが一様でなかった可能性などが考えられる。

一方、SfMの利点としてLiDARセンサでは計測が難しい水面の高さを測れることから、人工湿地の水面と岸との比高についても計測を試みた(図7b)。水面の高さ計測(図7b)では、実測値と14 cmの差があるもののLiDARセンサでは捉えられない水面の高さをある程度捉えることができた。既往研究²¹⁾ではピクセルスペーシングが3 cmの場合の鉛直誤差が11~71 cmであり、本研究のピクセルスペーシングが5 cmであることを踏まえれば14 cmの鉛直誤差は観測手法の誤差範囲だといえる。したがって、SfMにより人工湿地の水量を面的に測れる可能性があること、また定期的な測量により嵩上げによる水面上昇を捕らえられる可能性もあり、人工湿地の維持管理にも寄与すると考えられる。また、既往研究²¹⁾は、ピクセルスペーシングを細かくすることでSfMの精度向上が期待できることを指摘しており、より低高度で

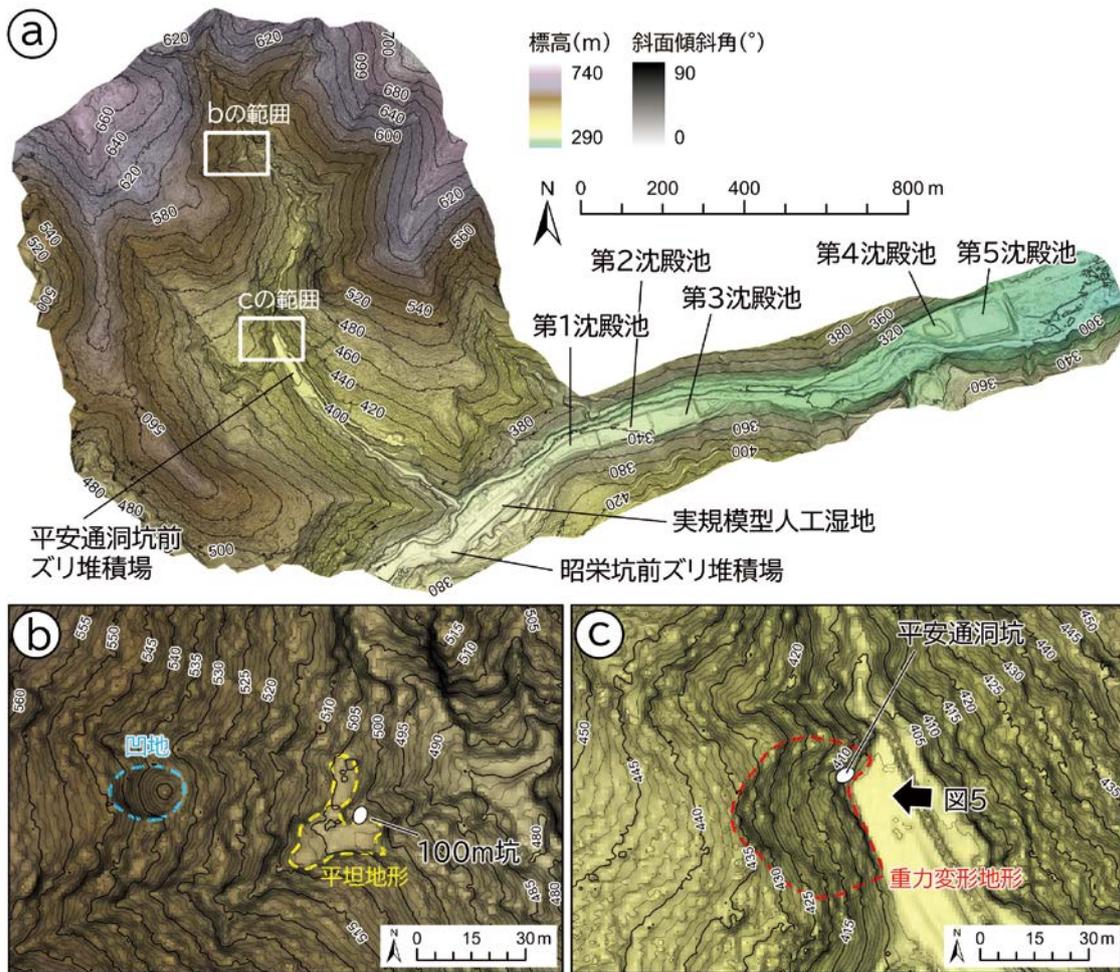


図4 日本庫鉱山周辺の高精細地形図。a. 高精細地形図の全貌と処理施設の配置。b. 100m坑周辺の拡大図。c. 平安通洞坑周辺の拡大図。

Fig. 4 High-resolution topographic map around the Motokura mine. a. Overview of high-resolution topographic map and location of processing facilities. b. Enclosed map around the 100 m pit. c. Enclosed map around the Heian pit.

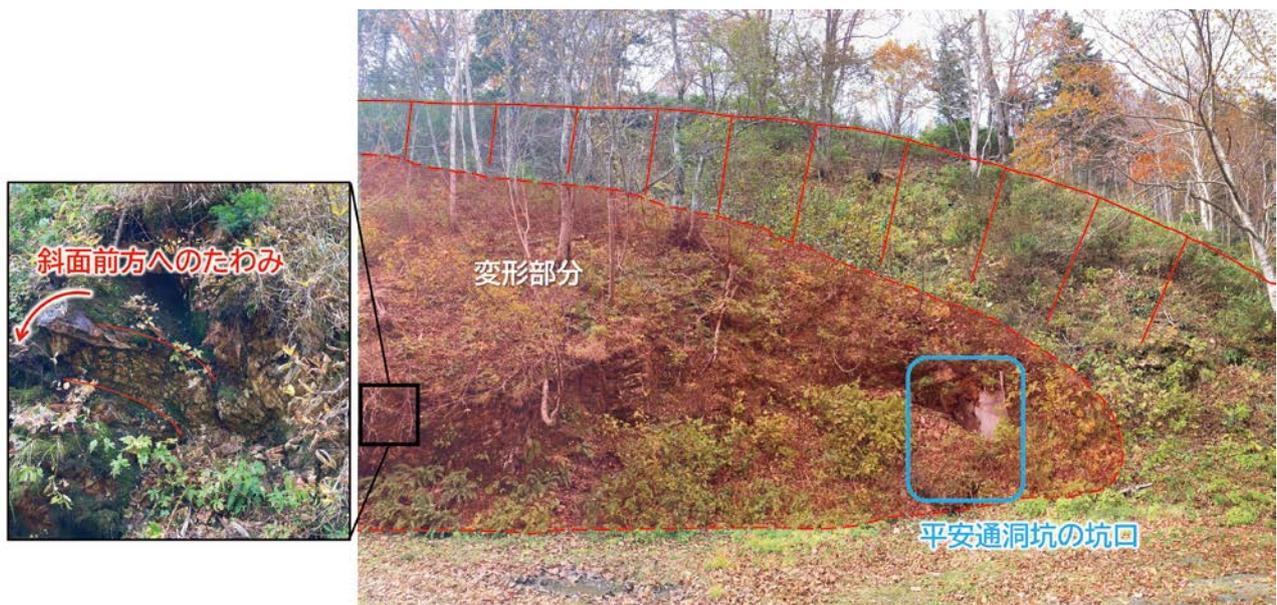


図5 平安通洞坑周辺の重力変形地形の現地写真

Fig. 5 Photograph of gravity deformation topography around Heian pit.

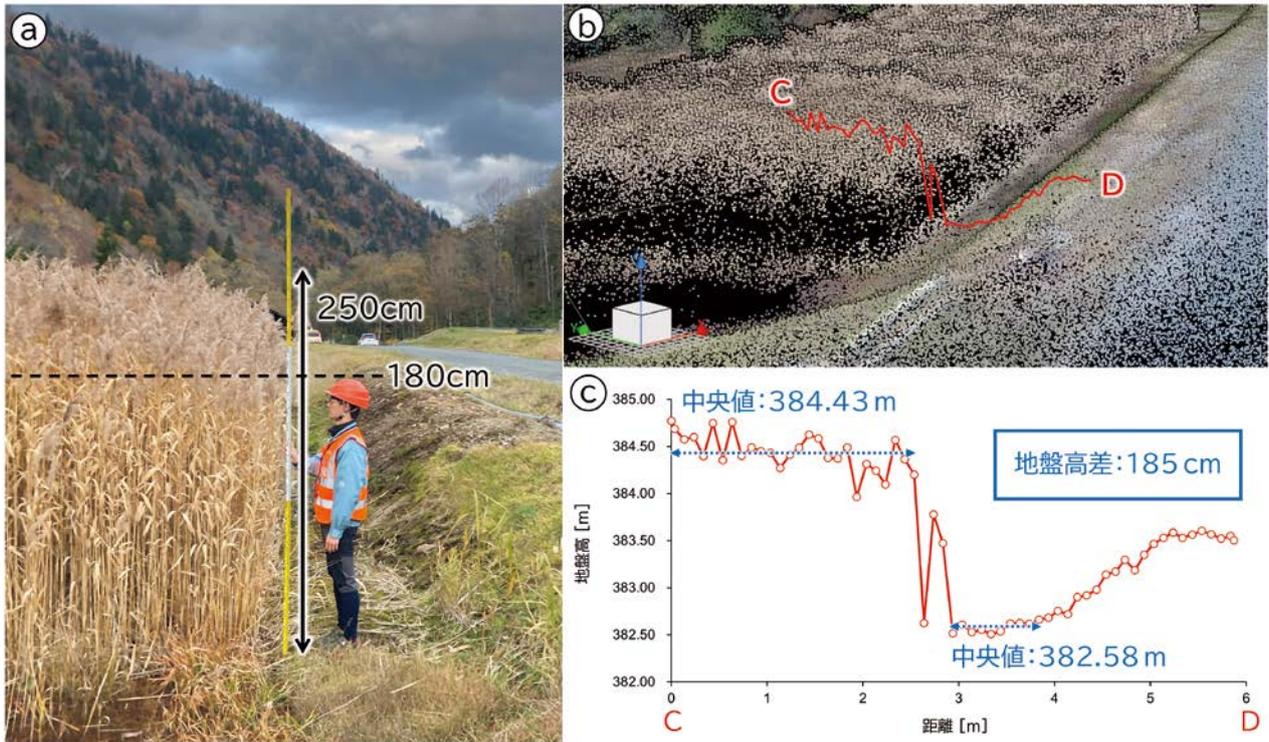


図6 人工湿地内の植生（ヨシ）の背丈の実測値とLiDAR計測値との対応関係。a. 実測したヨシの背丈。b. LiDAR点群の断面位置。c. LiDAR点群の断面図。位置は図1に示した。
 Fig. 6 Correlation between measured height of vegetation and LiDAR measurements in an artificial wetland. a. Measured height of reeds. b. Cross-sectional location of LiDAR point cloud. c. Cross-sectional view of LiDAR point cloud. Location is shown in Fig.1.

の撮影を行うことで、さらに厳密な測量が期待できる。

以上のように、実測値と同列に扱うのは難しいものの、人工湿地の浄化環境把握におけるLiDARセンサと光学カメラによるUAVリモートセンシングの活用可能性が確認できた。

4.3 坑廃水用導水管と漏水の検出可能性

図8に光学カメラと赤外センサで撮影した導水管の画像を示す。ここで、導水管の検出に赤外センサを使用したのは、水は比熱容量が大きいため地面との温度勾配が期待でき²²⁾、特に地中の坑道から直接導水管に流入する坑廃水は年間を通じて温度変化が小さいため¹¹⁾である。図8より、光学カメラと赤外センサともに上空視界が広い場所で斜面上の導水管を確認することができた。また、期待したように赤外センサでは地面と導水管との間に温度勾配がみられた。しかし、植生に覆われてしまうと導水管を検出することは難しいため、実利用には定期的な植生管理を求められることが課題である。

図9は、先述の坑廃水（水温10~12℃）と地面との温度勾配を利用し、赤外センサ画像を用いて導水管からの漏水検出を試みた結果である。試験では、実際に導水管から漏水させることは現実的ではないため、河川から採取した水（2L；水温8~9℃）を採取後すぐに散水し、その後10分以内にUAVで撮影を行った。図9より、散水範囲とその周辺

の地面との間に若干の温度勾配がみられるが、散水以外の温度勾配が大きく、実際には漏水箇所が事前に把握できない状況を想定すると赤外センサだけから漏水を検出することは難しいと考えられる。今後の改善策として、光学カメラ画像も重畳させた深層学習で検出することや、スペクトル分解能が細かいハイパースペクトルセンサ²³⁾を使用することなどが考えられる。

以上のように、UAVリモートセンシングを用いた導水管の抽出には、植生の影響をどのように回避するかが課題として挙げられる。一方、導水管からの漏水検出には、どのように漏水を選択的に検出するかが課題となった。

5 まとめ

本稿では、北海道枝幸町の旧本庫鉱山を対象に、休廃止鉱山の維持管理におけるUAVリモートセンシング活用の可能性について実証試験の結果を報告した。その結果は以下のようによまとめられる。

- 1) UAVに搭載したLiDARセンサにより作成した高精細地形情報は、鉱山・処理施設の位置や体積の把握、被災状況の定量的把握、将来の被災リスクの検討における基礎情報として活用できる。
- 2) LiDARセンサと光学カメラ画像のSfM解析によりヨシの

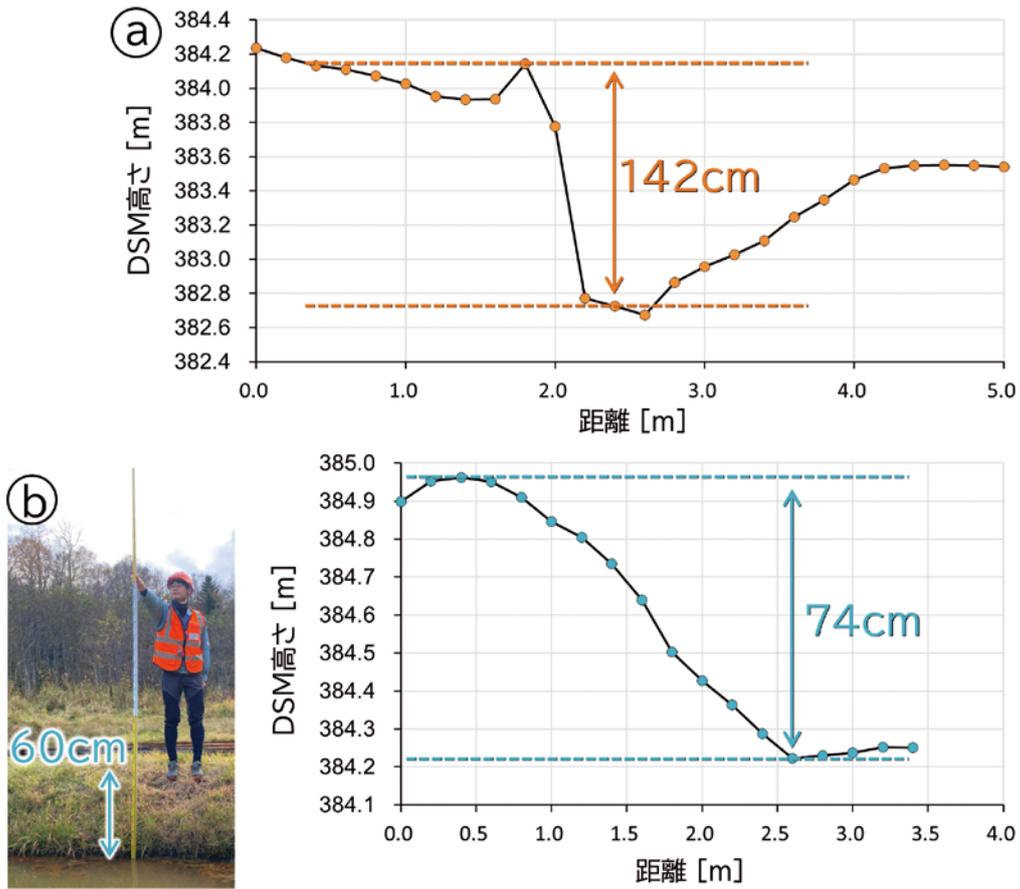


図7 SfMで作成したDSMの高さと実測値との関係。 a. SfMで計測したヨシの高さ。 b. SfMで計測した人工湿地の水面と岸との比高と実測値との関係。 ヨシの高さの実測値は図6に、位置は図1に示した。
 Fig. 7 Relationship between the height of DSM created by SfM and actual measurements. a. Height of reeds measured by SfM. b. Relationship between the specific height between the water surface and the shore of the artificial wetland measured by SfM and actual measurements. c. Height of reeds measured by SfM and actual measurements. Actual measurements of reed height are shown in Figure 6. Locations are shown in Fig.1.

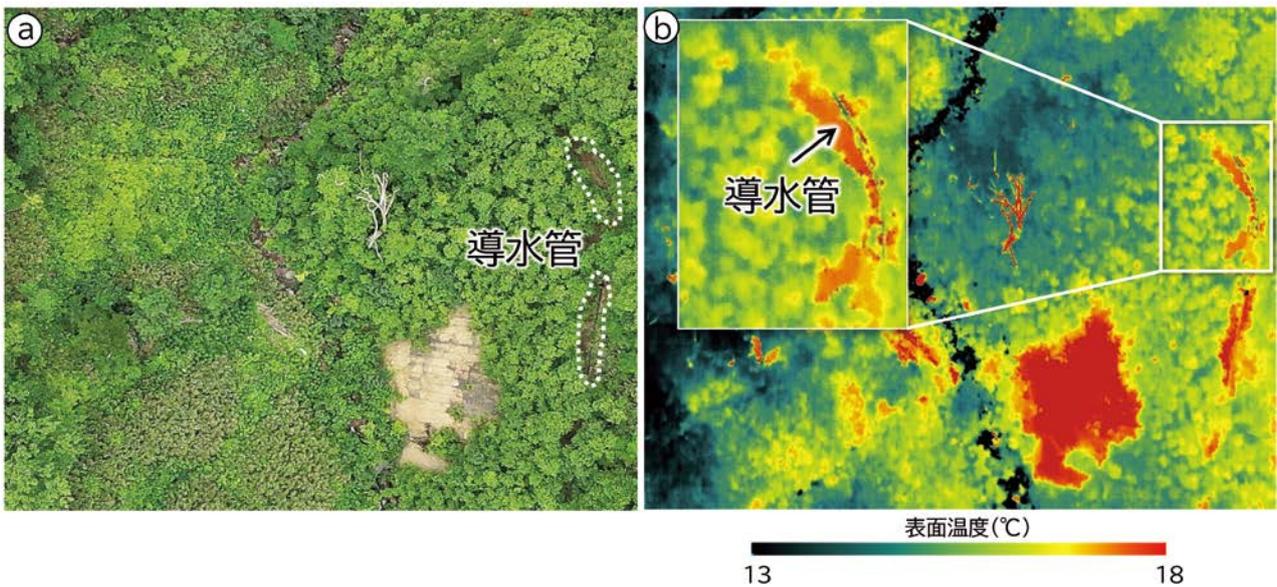


図8 斜面上の導水管を撮影したUAV画像。 a. 光学カメラで撮影した導水管。 b. 赤外線センサーで撮影した導水管。位置は図1に示した。
 Fig. 8 UAV images of a pipeline on a slope. a. Image of optical camera. b. Image of infrared sensor. Location is shown in Fig.1.

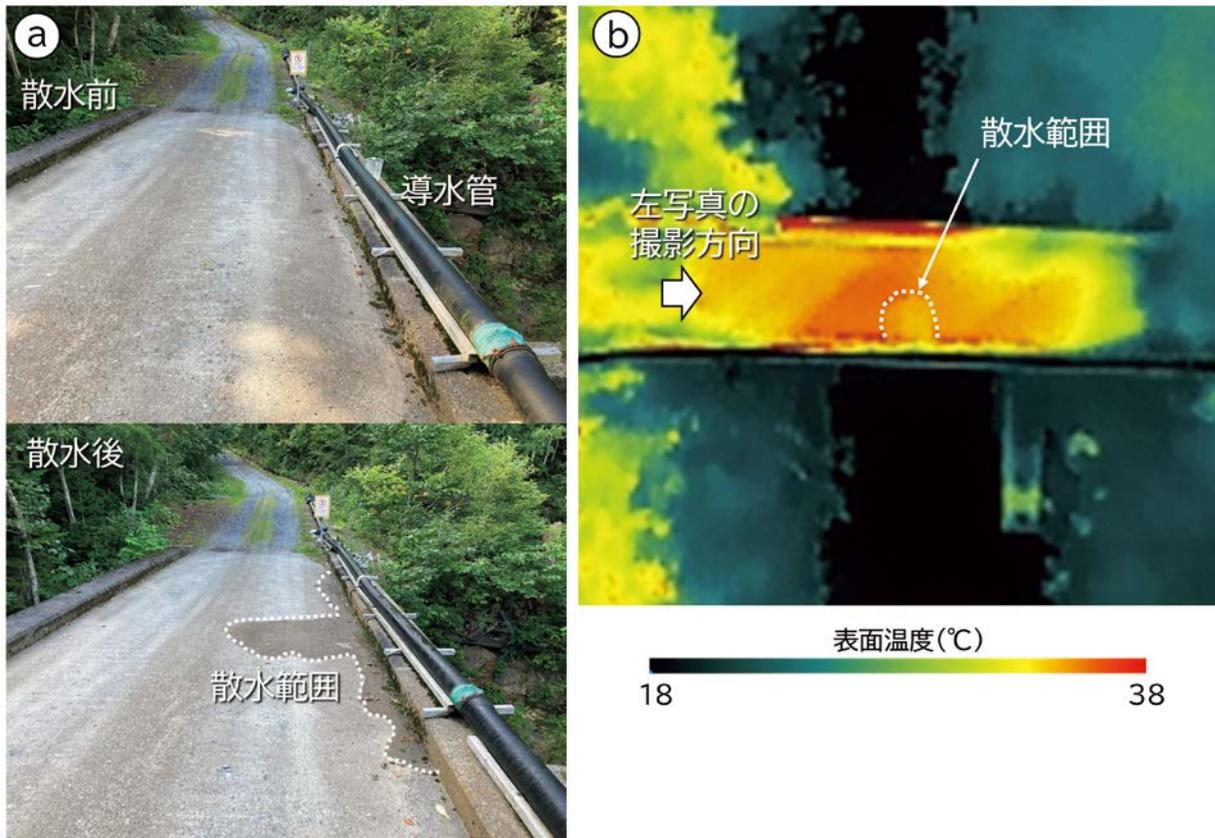


図9 赤外センサによる導水管からの漏水検出試験の結果. a. 模擬漏水（河川水）の散水前後. b. 赤外センサで取得した地表面温度分布.

Fig. 9 Results of a leak detection test using an UAV based infrared sensor. a. Before and after spraying simulated water leakage (river water). b. Ground surface temperature observed by the infrared sensor.

高さを概ね把握することができた。また、SfM解析ではLiDARセンサでは計測できない人工湿地の水面高を図ることができた。これらは、人工湿地内の浄化環境や水量の定量評価や空間把握に活用が期待できるが、実測値とは必ずしも一致しないことに注意する必要がある。

3) 光学カメラ画像や赤外センサを用いた導水管検出では、上空視野が広い場所で導水管を検出できたものの、実用化に向けては植生管理をどのように行うかが課題である。また、赤外センサでは導水管と地面に温度勾配を確認できたため漏水検出の可能性も検討したが、それ以外の要因による温度勾配も大きいことから、実用化には、さらなる手法の開発や調査の工夫が必要である。

本稿では、休廃止鉱山の維持管理におけるUAVリモートセンシング活用の可能性と課題を整理した。今後、本稿をたたき台として事例の蓄積が進み、技術開発が進められることで、休廃止鉱山の維持管理の効率化を図ることが期待される。

謝辞

本研究に際し、道受託研究「休廃止鉱山鉱害防止対策調査（令和5年度）（令和6年度）」の経費の一部を使用した。現

地調査では、北海道庁経済部資源エネルギー課産業保安係の方々、枝幸町歌登支所の宮崎起史氏、西村力氏にご協力頂いた。以上、ここに記して感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 遠藤祐司・萩野 激・野呂田 晋, 2014, 坑廃水のパッシブトリートメントの概要とその適用, 北海道地質研究所報告, 86, 25-35.
- 2) 経済産業省, 2022, 鉱山における無人航空機（ドローン）活用に関する手引き. https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2020/08/20200811-2.html (最終閲覧日: 2024年11月1日)
- 3) 経済産業省, 2023, 特定施設に係る鉱害防止事業の実施に関する基本方針（第6次）, https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/mine/2017_newpage/kogaiboshi.html (最終閲覧日: 2023年11月4日)
- 4) Meng, X.; Zhang, D.; Dong, S.; Yao, C., 2024, Open-Pit Granite Mining Area Extraction Using UAV Aerial Images and the Novel GIPNet. Remote Sensing, 16, 789. <https://doi.org/10.3390/rs16050789>

- 5) Jackisch, R., Lorenz, S., Zimmermann, R., Möckel, R., Gloaguen, R., 2018, Drone-Borne Hyperspectral Monitoring of Acid Mine Drainage: An Example from the Sokolov Lignite District, Remote Sensing, 10, 385. <https://doi.org/10.3390/rs10030385>
- 6) Park, S., Choi, Y., 2020, Applications of unmanned aerial vehicles in mining from exploration to reclamation: a review, Minerals, 10, 663. <https://doi.org/10.3390/min10080663>
- 7) Schroder, W., Murtha, T., Golden, C., Scherer, A.K., Broadbent, E.N., Almeyda Zambrano, A.M., Herndon, K., Griffin, R., 2021, UAV LiDAR Survey for Archaeological Documentation in Chiapas, Mexico. Remote Sensing, 13, 4731. <https://doi.org/10.3390/rs13234731>
- 8) Madec, S., Baret, F., de Solan, B., Thomas, S., Dutartre, D., Jezequel, S., Hemmerle, M., Colombeau, G., Comar, A., 2017, Height-throughput phenotyping of plant height: Comparing unmanned aerial vehicles and ground LiDAR estimates, Frontiers in Plant Science, 8, 2002. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02002>
- 9) Wallace, L., Lucieer, A., Malenovsky, Z., Turner, D., Vopěnka, P., 2016, Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds. Forests, 7, 62. <https://doi.org/10.3390/f7030062>
- 10) 番場猛夫・五十嵐昭明・菊池 徹 1958, 北海道今井本庫鉱山銅・鉛・亜鉛鉱床調査報告, 地質調査所月報, 9, 99-108.
- 11) (地独) 北海道立総合研究機構産業技術環境研究本部エネルギー・環境・地質研究所, 2024, 令和5年度(2023年度)休廃止鉱山公害防止工事調査解析業務報告書.
- 12) 高安三次, 1966, 徳志別川鮭鱒鱒被害調査Ⅲ, 北海道さけ・ますふ化場研究報告, 20, 91-106.
- 13) 荻野 激, 2022, 本庫鉱山, 季刊 資源と素材, 7, 1, 9-13.
- 14) 荻野 激・遠藤祐司・黒沢邦彦・野呂田 晋 2003, 人工湿地による酸性廃水の浄化, 北海道立地質研究所報告, 74, 107-115.
- 15) Usami, S., Ishimaru, S., Tadono, T., 2024, Advantages of high-temporal L-band SAR observations for estimating active landslide dynamics: a case study of the Kounai landslide in Sobetsu town, Hokkaido, Japan, Remote Sensing, 16, 15, 2687, <https://doi.org/10.3390/rs16152687>
- 16) 国土地理院 2023, 高解像度の地形データの提供を開始します: 基盤地図情報(数値標高モデル)1mメッシュ(標高)の提供開始. <https://www.gsi.go.jp/gazochosa/gazochosa61002.html> (最終閲覧日: 2024年11月1日)
- 17) 佐藤 浩・関口辰夫・織茂 郁・中島 保, 2004, 現地測量の成果を用いた航空レーザ測量DTMの高さ方向の精度検証, 写真測量とリモートセンシング, 43 (4), 13-21.
- 18) 荻野 激, 2024, 休廃止鉱山の鉱害防止対策におけるタンクモデルの活用について, 環境資源工学, 70, 151-157.
- 19) 千木良雅弘, 1983, 節理性岩盤表層部にみられるトップリングの性質とその意義, 応用地質, 24, 1, 9-20.
- 20) 興水健一・川上源太郎・石丸 聡・小安浩理・加瀬善洋・廣瀬 亘・高橋 良・ト部厚志, 2020, 急崖斜面を対象としたUAV-SfM測量におけるカメラ撮影方向の検討, 北海道地質研究所報告, 91, 49-53.
- 21) Sato, H.P., Uchiyama, S., 2019, Comparison of measurement accuracy for DSM and orthomosaic between different UAV flight observations, 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, 54, 15-25.
- 22) 防災科学技術研究所, 2020, 防災基礎講座: 地域特性編. https://dil.bosai.go.jp/workshop/05kouza_chiiki/02kisyo.html (最終閲覧日: 2024年11月1日)
- 23) 横山正樹・井上吉雄・後藤 元・小手和徳, ドローン搭載マルチバンド・ハイパースペクトルカメラの反射率特性の解析と圃場観測, 計測と制御, 55, 810-813.

要 旨

休廃止鉱山では UAV リモートセンシングを活用した維持管理業務の効率化が期待されているものの、実証実験の事例が乏しい状況にある。本稿では、UAV に搭載した LiDAR センサ・光学センサ・赤外センサを用いて、高精細地形情報の活用・坑廃水処理用人工湿地の浄化環境調査・導水管および導水管からの漏水検出の3項目について、UAV リモートセンシングの活用案と課題を整理した。その結果、高精細地形情報と人工湿地の浄化環境の把握において活用可能性が確認された。一方、導水管および導水管からの漏水検出においては、植生の影響回避と漏水の選択的な検出に課題が残された。