

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K07562

研究課題名(和文) 小型無人航空機を用いた高山植生モニタリング手法の確立

研究課題名(英文) Establishment of monitoring method on alpine vegetation using small unmanned aerial vehicle

研究代表者

和田 直也 (Wada, Naoya)

富山大学・学術研究部理学系・教授

研究者番号：40272893

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：世界的に見ても多雪環境にある富山県立山山地を調査地とし、地球温暖化や火山活動の影響を受け易い脆弱な生態系である高山帯において、小型無人航空機(UAV)を用いた安価で精度の高い簡便なリモートセンシングの調査手法を確立することを目的に本研究を実施した。

写真測量の解析技術を用い、積雪深の分布を精度高く推定することができた。推定積雪深は植生タイプと密接な関係を示した。植生を分類する上で積雪深は重要な環境要因であることが示唆された。

噴気孔近くの調査地においては、火山性ガス成分の硫黄粒子と積雪表面の着色との関係を明らかにした上で、UAVを用いて火山性ガス成分の空間的な広がりを把握する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多雪地帯の高山帯においては、積雪は植物の分布に影響を及ぼす最も重要な環境要因の一つであるが、地形の形状に応じて空間的に大きく変化する積雪深を正確に推定することはこれまで困難であった。小型航空無人機を用いた写真測量により、この課題は解決され、時間的に変化する積雪環境の動態をモニタリングすることが可能となり、植生との関係を動的に論じる上で精度が著しく向上した。

さらに、火山地帯においては、積雪表面の着色に着目することで、火山性ガスの空間的な広がりを視覚的に認識することができ、その空間的な広がりに影響を及ぼしている諸要因を解析することを通じ、防災面での活用も期待できる。

研究成果の概要(英文)： This study was carried out for the purpose of establishing a cost-effective, accurate, and convenient research method on remote sensing using a small unmanned aerial vehicle (UAV), in an alpine zone, where the ecosystems are fragile and susceptible to volcanic activity and global warming. Study sites were selected in the Tateyama mountain range having heavily snowy environment in the world.

Using the analyzing technique of photogrammetry, the distribution of snow depth could be estimated accurately in the study site. Estimated snow depth showed a close relationship with several vegetation types, suggesting that snow depth is an important environmental factor to determine the distribution of alpine vegetation at a local scale.

At the study site near the fumaroles, we developed a method to evaluate the spatial dispersion of the volcanic gas component (sulfur particle) using UAV, after clarifying the relationship between the sulfur particle and the coloration on the snow surface.

研究分野：植物生態学・環境科学

キーワード：リモートセンシング UAV ドローン 写真測量 高山生態系 積雪深分布 火山性ガス 植生モニタリング

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

山岳上部に位置している高山生態系は、高山特有の生物多様性を有し、積雪による水源涵養機能、観光資源、登山等のレクリエーションの場を提供など、様々な生態系サービスを我々に与えている。日本における山岳上部の高山帯は、多くの場合国立公園内にあり、人為影響の少ない原生的な植生を含む生態系が今まで維持されてきた。しかしながら、本生態系は地球温暖化等による影響を受け易い脆弱性を有しており、一部の地域では植生の変化が観察されている。さらに、火山活動の盛んな山域においては、火山の噴火や噴気ガスによる影響にも曝され、植生の大きな変化も予想される。環境省生物多様性センターが実施している重要生態系監視地域モニタリング推進事業（通称モニ1000）では、高山帯調査として、ハイマツの年枝伸長量を計測することによる成長量変化のモニタリング、及び高山植生の永久帯状区を設定した植生モニタリング調査を、日本の6つの山地において実施している。さらに、国際的な取組みとして、山岳最上部の植生の長期モニタリングプロジェクト「GLORIA」があり、欧州アルプスを中心に高山植生の変化が検出されている。しかし、このような従来の地上における調査は、詳細な情報が得られる一方、調査地が限定され、空間的に狭い地域でしか評価することができない欠点がある。広範囲にわたる環境の評価は、人工衛星による観測画像データを用いることにより可能となるが、山岳地では頻繁に発生する雲や霧の影響で、利用できる衛星画像は著しく限られている。

申請者はこれまで、富山県立山の高山帯を対象に、1) ハイマツの年枝伸長量の長期モニタリング、2) 高山植生モニタリング、3) 地温変動モニタリング、4) 積雪表面モニタリングを実施しており、地表面での詳細なデータを蓄積している。1)～3)は気候変動の影響評価に関係し、4)は火山性ガスの飛散状況の把握に係る。このような長期観察サイトを対象に、近年様々な分野で使用されてきた UAV (小型無人航空機: small Unmanned Aerial Vehicle) であるドローンをプラットフォームに用い、メソスケールでの空中画像撮影 (リモートセンシング) を行うことで、植生と生態系の変化を詳細に記録し評価しようと考えた。

### 2. 研究の目的

地球温暖化による影響を受け易い脆弱な生態系である山岳上部の高山帯では、近年、火山活動の活発化に伴う環境の変化も含めて、植生モニタリングの需要が高まっている。しかし、従来の地上での調査のみでは、空間的な変異が大きい高山植生を面的に広く把握することに限界がある。本研究では、自動車でのアクセスが困難な高標高地の山頂や噴気孔周辺に、背負って運搬が可能な UAV (小型無人航空機・ドローン) を持込み、数回規模での空撮を実施し、安価で精度の高い簡便なリモートセンシングの調査手法を確立する。地上での調査と合わせ、山頂周辺や噴気孔周辺の植生の変化を明らかにし、国立公園内の自然環境管理施策に貢献する。

計画期間内に達成すべき目標としては、利用可能な衛星画像の乏しい高山帯において、UAV を用いたリモートセンシングの手法を開発し、1) 優占種である高山植物の分布の詳細な座標付けを行い、過去の画像との比較から分布変遷や生物季節変化を解明、2) モニ1000高山帯調査の長期観測サイトにおいて空撮を行い、地上データと照合しながら長期モニタリングの基盤を整備、3) 火山活動が活発化した噴気孔周辺のガス拡散状況を積雪表面の着色から明らかにし、高山植生の衰退状況も合わせて記録することである。解像度の高い画像の取得と地上データの併用により、植生及び生態系の変化を詳細に記録し評価できることに特色がある。また、将来的なモニタリングにおいて有効な基礎資料の記録、国立公園の自然環境管理、当該地域における環境教育の教材提供、についても大きな貢献が期待できる。

### 3. 研究の方法

本研究は、申請者が研究を長年実施しており、環境省のモニ1000高山帯調査の定点サイトにも指定されている富山県立山連峰にて実施した。平成29年度は、山頂周辺等の高山植生を対象に調査を行い、空撮と画像解析の手法を確立した。平成30年度は、地温の長期連続観察を実施している斜面の雪田植生を対象に、雪融けから植生発達の季節変化を詳細に調べた。平成31年(令和元年)度は、噴気ガスの影響が見られる地獄谷周辺の植生を対象に、積雪期における表面着色の空撮を行うと同時に、消雪後の植生域についても空撮を行い、ガスの拡散状況と植生の衰退状況を明らかにした。空撮に用いた UAV は、DJI 社製の Phantom 4 Pro と Mavic Pro の二機種である。前者のドローンをを用いて RGB 画像を取得し三次元写真測量を、後者のドローンにマルチスペクトルカメラ (Sequia, Parrot 社製) を搭載して近赤外光と赤色光に関する情報を主に取得した。オルソモザイク画像の作成には、Photoscan (Agisoft 社製) を用いた。平成29年度

環境省生物多様性センターが実施しているモニタリングサイト1000高山帯調査において、定点観測サイトとなっているハイマツ群落の調査地(2箇所)と風衝地及び雪田の調査地(2箇所)を主な調査地とした。ハイマツ群落の調査地は、別山の山頂(標高2880m)に1箇所、ミクリガ池西側の台地上(標高2400m)に1箇所あり、申請者が2007年以降の10年間にわたってハイマツの成長量を調べている独自の調査地と隣接している。風衝地の調査地は、浄土山の稜線上に1箇所、室堂平の雪田に1箇所ある。これらの長期モニタリングサイトを対象に、各調査地について1回の空撮を実施した。空撮は、100m上空から数回に及ぶ地域を対象とする遠距離画像と、30m程度の上空から数十回四方の地域を対象とする近距離画像に分けて行った。

空撮終了後、空撮画像に地理空間情報を持たせるため、全地球航法衛星システム (GNSS) 測量を実施した。本調査は、研究分担者の楠本が実施した。得られた空撮画像は、オルソモザイク画像作成ソフトで合成を行い、その際空撮画像に GNSS 測量で得られた地理情報を加えてオルソモザイク画像を完成させた。

#### 平成 30 年度

初年度に確立した調査手法を用い、植生発達の季節変化 (フェノロジー) を明らかにする研究を実施した。立山室堂山の北西向き斜面には、幅約 100m×長さ約 300m の範囲において、消雪時期の推定と生育期間中の温度を明らかにすることを目的として、地下 5cm の深さに温度データロガーが合計 50 個埋設されている。データロガーを設置した点を中心に、植生調査も実施済である。この長期観察サイトを対象にして、融雪期から植生が季節的に発達して紅葉を迎え枯れるまでの間、月に 1~2 回の頻度で、UAV を用いた空撮を実施した。本調査地では、斜面凸地における消雪は 5 月上旬に起こり、凹地における消雪は遅いところで 8 月上旬に起こる。残雪の消長過程においては、研究分担者の杉浦が現地における積雪深の季節変化について詳細に調べた。研究分担者の楠本は、調査地内に設置した地上標準点 (GCP) を対象に GNSS 測量を実施した。得られた画像及び地上調査 (GNSS 測量及び積雪深測定) の結果を照合し、地理情報を持ったオルソモザイク画像を季節毎に完成させた。

#### 平成 31 年 (令和元年) 度

最終年度には、立山地獄谷周辺について調査を実施する。積雪期における表面の着色の程度と硫黄の量との間には、正の相関が見られることが分かった (図 3 : 佐澤・和田 (未発表データ))。立山地獄谷の噴気ガスには、二酸化硫黄と硫化水素が多く含まれているおり、このガス粒子は低温で反応して硫黄と水を生成することから、雪面に見られる黄色の硫黄結晶は、飛来したガスが雪面で反応を起こして生成されたものと予想される。UAV を用いて、積雪表面の着色の程度について、4 月中旬から 7 月上旬にかけて、月に 1~2 回の頻度にて撮影を行う。また、各時期における積雪表面の雪資料を採取し、硫黄の定量分析も実施する。本分析は、連携研究者の倉光が行う。研究分担者の杉浦は、現地における積雪深の季節変化について、雪溪の消長パターンについてもインターバルカメラを用いて詳細に調べる。研究分担者の楠本は、目印となる大きな岩や雪溪等について、GNSS 測量を実施する。すべての雪溪がほぼ消失して植生面積が最大に達する 8 月中下旬、対象地域の空撮を実施して、植生の衰退地域を特定する。得られた画像及び地上調査 (GNSS 測量及び積雪深測定) の結果を照合して、地理情報を持ったオルソモザイク画像を季節毎に完成させる。積雪表面の黄色を呈した範囲を抽出し、植生衰退エリアとの照合を行う。

## 4. 研究成果

### 1) 高山植生の長期観察サイトにおける空撮結果

図 1 に示したように、地形の形状や気象条件が異なるいずれの調査地においても空撮を実施することができ、オルソモザイク画像を作成することができた。地上標準点を正確に測位することで、画像の精度は水平方向・鉛直方向共に約 1m 程度に収まることが確認できた。また、オルソモザイク画像作成ソフトの設定を工夫することで、さらに精度を数十 cm 程度まで向上させることができることを確認した。

### 2) 植生発達の季節変化 (フェノロジー) を明らかにする研究

高山植物の季節的な植生の発達 (葉の展葉と成長及び老化と落葉) に大きな影響を与える積雪環境を評価した。冬季の積雪が維持されている春季とほぼ全域にわたり消雪した秋季に撮影された画像を用い、最大積雪深を推定したのが図 2 である。写真測量によって推定した 4 月 22 日時点での積雪深は、最大で 18m にも達していることが分かった。測深棒により求めた実測値と UAV による推定値を比較したところ、5 月 21 日時点においては 50 地点中 27 地点 (54%) において、6 月 4 日時点においては 21 地点 (42%) において、実測値と推定値の差は 50cm 未満であった。誤差の大きい地点では、実測値は推定値をかなり下回ることが多く、積雪層中に形成された氷盤によって測深棒による測定が正しく行われていない可能性が考えられた。このようは誤差の大きい地点は、推定積雪深が大きな値を示した谷部に多く見られた。精度の検証方法に課題が残るものの、UAV を用いた写真測量は積雪深推定に有効な方法の一つであると考えられた。

さらに、4 月 22 日の積雪期から 9 月 28 日の消雪期までの間にマルチスペクトルカメラにより得られた画像より正規化差植生指数 (NDVI) を算出し、それを調査地 50 地点における推定積雪深の平均値とともに、その季節変化を比較した (図 3)。平均積雪深の季節的推移に同期して NDVI 値が変化する動態を捉えることができた。この結果より、植生の季節的な発達に積雪環境が大きな影響を与えていることが確認できた。この調査により、積雪表面の三次元モデルを表現できたので、今後はその時間的推移に影響を及ぼす気温の効果等を組み込んだモデルを開発することで、ある時間における積雪深の空間分布を予測できる可能性が考えられた。

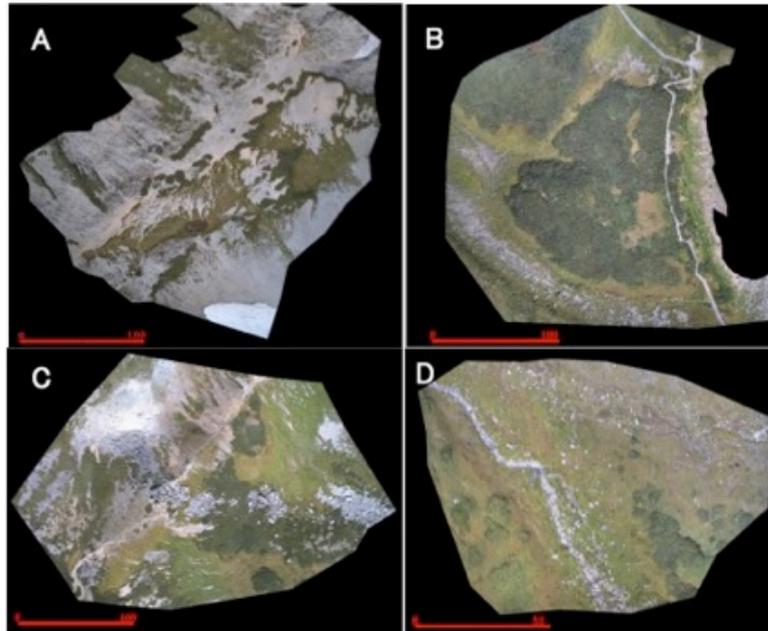


図1. 小型航空無人機 (DJI 社製 Phantom 4 Pro) を用いて撮影された空撮画像から作成したオルソモザイク画像. A, 別山山頂の稜線に分布しているハイマツ群落; B, ミクリガ池西側に見られるハイマツ群落; C, 浄土山稜線周辺の風衝地群落を含む多様な高山植生; D, 室堂平近くの雪田群落. 各画像の赤線は 100m のスケールを示している (但し D のみ 50m である).

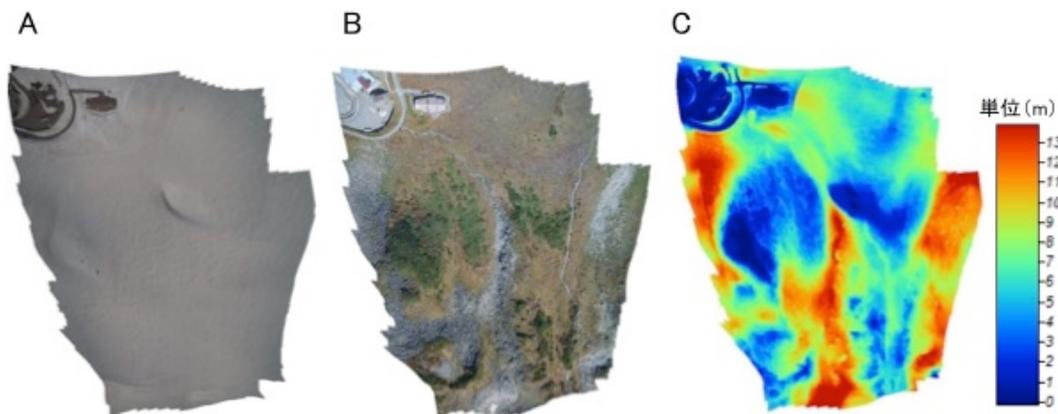


図2. 積雪深の分布図 (室堂山). A, 2018 年 4 月 22 日撮影合成画像; B, 2018 年 9 月 28 日撮影合成画像; C, 二時期の数値標高モデル (DEM) の引き算より求めた推定積雪深分布. 同一の斜面上に様々な積雪深分布が形成されている. また, B と C の比較から植生タイプと積雪深分布の対応関係を読み取ることができる.

### 3) 火山性ガスの空間分布と植生衰退のモニタリング

火山活動が活発化する前の 2009 年に撮影された画像 (図 4A: 国土交通省提供) と 2019 年に本研究にて取得した画像 (図 4B) を用い、この間に植生衰退が生じた空間を抽出した。その際、図 4C に示したように、画像解析により植生と非植生地域の分類を行い、精度を検証した後、この間に衰退した地域を抽出した。さらに、春季に撮影した画像より積雪表面の硫黄成分着色の分布を数値化し (図 4D)、春季と秋季に撮影した二時期の画像から得られた情報を用いて積雪深を推定した (図 4E)。2009 年から 2019 年までの植生面積は、25.8 ha から 21.2 ha に変化し、4.6 ha 減少した。2009 年時点で植生が認められた範囲にランダムポイントを発生させ、そのポイントにおける 2019 年時点での植生変化 (植生か非植生) を応答変数に用い、植生生残率と環境要因との関係を解析した (図 5)。この解析に用いた説明変数は、噴気孔からの距離、推定積雪深、斜面方位、春季における積雪表面の着色分布 ( $b^* - a^*$  値) である。解析は、二項分布を仮定した一般化線形モデル (ロジスティック回帰) を用いて実施した。ただし、斜面方位については、まず、図 5 右に示したように三次曲線回帰によって最大値を見つけた後、その最大値をゼロとする方位に説明変数を変換したのちに解析を実施した。その結果、積雪表面の着色を除く、全ての環境要因が植生生残率と有意な関係にあることが分かり、これらの地形要因・積雪要因が植生衰退の空間パターンに大きな影響を及ぼしていることが明らかとなった。一方で、積雪表面の着色パターンは、植生生残率の空間パターンと予想に反し正の相関を示した。ここで注意しなければならないことは、春季に形成されている積雪表面の着色は、その時に卓越風によ

って形成されている点であり、植生が最も影響を受ける風向を反映しているのかどうか、確認していない点である。したがって、空撮や画像による解析に加えて、今後は現地における気象観測によって風向の季節変化を明らかにする必要がある。

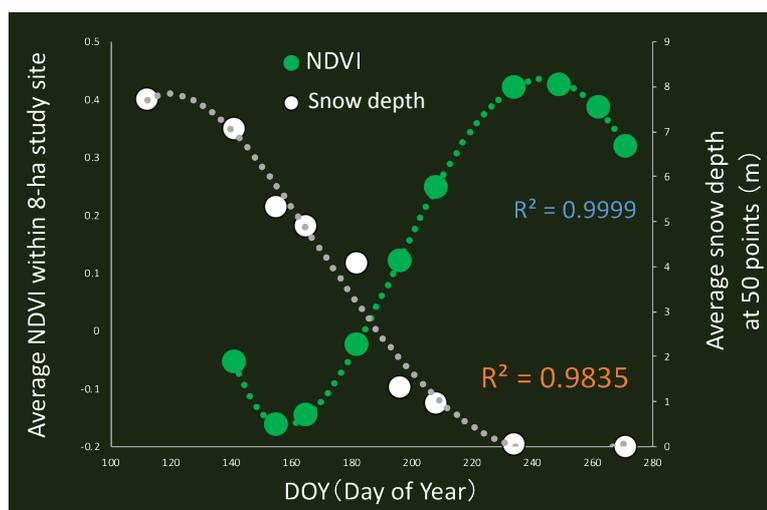


図3. 正規化差植生指数 (NDVI) と積雪深の季節変化. 横軸は1月1日からの日数 (DOY)、縦軸右が50地点における平均推定積雪深、縦軸左が調査地域 (8 ha) におけるNDVI値.

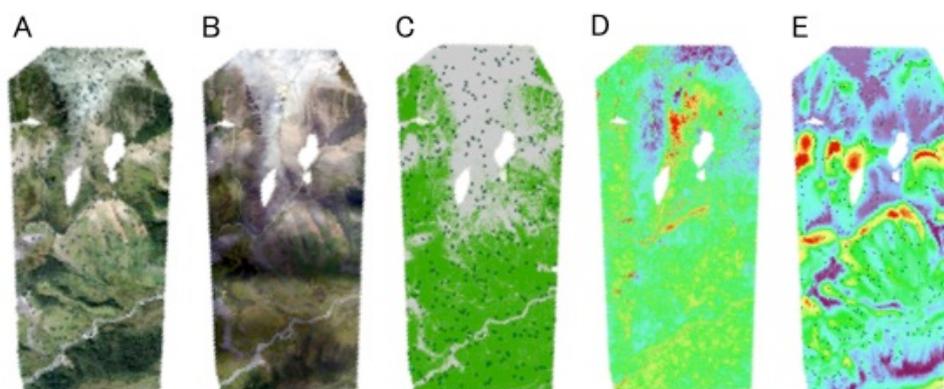


図4. 立山地獄谷・リンドウ池周辺の植生変化と環境要因. A, 2009年に取得された空撮画像 (国土交通省提供); B, 2019年に取得した空撮画像; C, 機械分類により推定した植生域 (緑色) と非植生域 (灰色) の分布; D, 4月下旬時点での積雪表面の着色分布. RGB画像をLab画像に変換後、各ピクセルにおいて (b\*-a\*) 値を計算して表示した; E, 春季と秋季の二時期の差より推定した積雪深分布. 寒色系から暖色系に向かい積雪深が高くなるように表示した. 画面上方中央に噴気孔が分布している. 全ての図は、画面上方が西側に画面下方が東側になるように配置している.

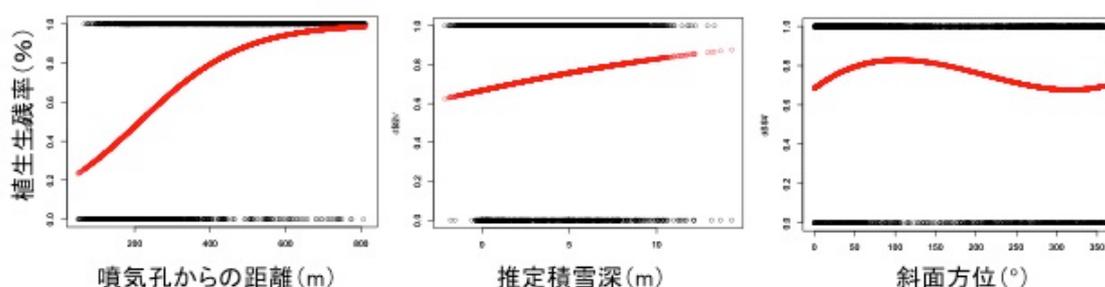


図5. 高山植生の2009年から2019年までの生残率と環境要因との関係. 2009年の時点での植生が2019年にも存在していた場合を1、枯死してしまった場合を0として解析した (図中の黒点群). 左図と中央図についてはロジスティック回帰した結果を、右図については三次曲線で回帰した結果を、それぞれ赤点群で示している.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sazawa, K., Kawamura, K., Yasuda, T., Kuramitz, H., Wada, N.	4. 巻 233
2. 論文標題 Assessing the spatial dispersion of products of the fumarolic activity using remotely sensed snow color in an alpine environment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Remote Sensing of Environment	6. 最初と最後の頁 111351
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111351">https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111351</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 和田 直也, 山田 武典, トラン・ディン・トゥン, 楠本 成寿, 杉浦 幸之助
2. 発表標題 小型航空無人機を用いた写真測量による積雪深測定 立山高山帯における事例
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉浦幸之助・松本健吾・和田直也
2. 発表標題 立山室堂山北斜面における消雪と NDVI の変化
3. 学会等名 日本雪氷学会北信越支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田直也, 鋸持雅, TRANTung, 我山真歩
2. 発表標題 立山高山帯における火山ガスによる植生の衰退
3. 学会等名 日本生態学会第67回全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田武典・楠本成寿・杉浦幸之助・和田直也
2. 発表標題 立山連峰室堂山北西斜面における積雪深と高山植物群落との関係：ドローンを用いた写真測量による積雪深分布の推定
3. 学会等名 日本生態学会中部地区大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐々木雅希・初鹿宏壮・飯田肇・和田直也
2. 発表標題 立山連峰室堂山の高山植生と環境要因についての検討
3. 学会等名 日本生態学会中部地区大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 TRAN DINH TUNG・清野達之・和田直也
2. 発表標題 ドローン空撮画像を用いた森林資源量推定：カラマツ林を対象とした研究事例
3. 学会等名 日本生態学会中部地区大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田直也, 山田武典, 楠本成寿, 杉浦幸之助
2. 発表標題 ドローンを用いた写真測量による積雪深推定と高山植生の分布及びフェノロジーについて
3. 学会等名 日本生態学会第66回全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉浦幸之助, 石崎悠, 和田直也, 初鹿宏壮, 飯田肇
2. 発表標題 立山ミクリガ池流域の融雪特性
3. 学会等名 雪氷研究大会 (2018・札幌)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 武樋恵利果・楠本成寿・和田直也
2. 発表標題 立山における高山植生の分布域変化について -ドローンを用いた植生モニタリング-
3. 学会等名 日本生態学会中部地区大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 TRAN DINH TUNG・清野達之・和田直也
2. 発表標題 ドローン (UAV) を用いた写真測量による森林資源量の推定 -カラマツ林を例に-
3. 学会等名 日本生態学会中部地区大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 丸尾文乃・和田直也
2. 発表標題 3次元データを用いた着生植物の分布調査手法の開発 途中報告-
3. 学会等名 日本生態学会中部地区大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 丸尾文乃・和田直也
2. 発表標題 3Dモデルを用いた着生植物の分布調査手法の開発
3. 学会等名 日本生態学会第65回全国大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	楠本 成寿 (Kusumoto Shigekazu)  (50338761)	富山大学・学術研究部都市デザイン学系・教授  (13201)	
研究分担者	杉浦 幸之助 (Sugiura Konosuke)  (80344307)	富山大学・学術研究部都市デザイン学系・教授  (13201)	
研究協力者	武樋 恵利果 (Takehi Erika)	富山大学・理学部・元学生  (13201)	
研究協力者	山田 武典 (Yamada Takenori)	富山大学・理学部・元学生  (13201)	
研究協力者	佐々木 雅希 (Sasaki Masaki)	富山大学・理学部・元学生  (13201)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	鈞持 雅  (Kenmotsu Masashi)	富山大学・大学院理工学教育部・修正課程一年生  (13201)	
連携 研究者	安田 泰輔  (Yasuda Taisuke)  (40372106)	山梨県富士山科学研究所・その他部局等・研究員  (83501)	
連携 研究者	初鹿 宏壮  (Hatsushika Hiroaki)  (20443418)	富山県環境科学センター・その他部局等・副主幹研究員  (83203)	
連携 研究者	佐澤 和人  (Sazawa Kazuto)  (80727016)	富山大学・学術研究部理学系・助教  (13201)	
連携 研究者	倉光 英樹  (Kuramitz Hideki)  (70397165)	富山大学・学術研究部理学系・教授  (13201)	