

財団法人国土地理協会平成 27 年度学術研究助成

小型無人航空機（UAV）を用いた積雪深分布の推定と検証

—新潟県巻機山周辺を事例に—

研究成果報告書

松山 洋（首都大学東京 都市環境科学研究科）

泉 岳樹（首都大学東京 都市環境科学研究科）

目次

1	はじめに	1
1.1	問題の所在	1
1.2	UAV を用いた積雪深の推定.....	2
1.3	本研究の目的.....	4
2	地域概要	4
3	方法.....	5
3.1	UAV 測量.....	5
3.1.1	無雪期の UAV 測量.....	5
3.1.2	積雪期の UAV 測量.....	6
3.2	山岳積雪調査.....	7
3.3	SfM-MVS 手法による DSM の作成.....	7
4	結果.....	8
5	考察.....	9
5.1	夏の DSM > 冬の DSM となるところについて.....	9
5.2	GCP の与え方について	10
5.3	測深棒による積雪深の測定について	11
6	結論.....	12
	謝辞.....	13
	引用文献.....	13

1 はじめに

1.1 問題の所在

雪氷圏の観測は、Hahn and Shukla (1976) に示されるように、気候変動や水循環・熱収支といった地球規模の問題として社会的意義が大きい。一方で、流域スケールにおいては、水資源管理や融雪災害対策が重要な課題である(大林, 2002)。特に日本は、国土の多くを山地が占め、冬季の降雪量が多く、ほとんどの山岳積雪が越年しないといった環境であるため、山地流域の積雪観測に関する研究が重要視されてきた。

一般に、山岳地域において積雪の3次元分布を広域調査することは困難である。その一方、松山(1998b)がまとめたように、日本では降雪量が標高に伴って線形増加し、積雪の移動が森林帯により抑制されるため、積雪量が標高に対して強い線形性を持つことが知られている。そこで山岳積雪の3次元的な分布をモニタリングするには、図1に示されるように、「現地観測による狭い範囲の積雪量の高度分布」と「遠隔観測による広域な積雪域の水平分布」を組み合わせる方法が一般的である(小池ほか, 1985)。なお、ここでの降雪量、積雪量とは、いずれも雪を融かして水にした時の水深(mm)を意味しており、後者については積雪水量あるいは積雪水当量ともいう(日本雪氷学会, 1990)。

ここで言う積雪水量の高度分布の調査(スノーサーベイ)は、重労働でありかつ危険な行為でもある。また、調査は専門家でなければならず、調査ルートも1つだけである場合が多い。一方、積雪域の水平分布は、広域性・同時性・反復性などに優れる人工衛星データが利用できるようになり、積雪域を抽出する画像解析の手法が提案されている。特に、日本では常緑針葉樹林帯の林床に雪が堆積することが多く、両者の分光反射特性(波長別の反射率の違いのこと)が大きく異なるため、林床にある積雪を抽出することは難しいとされてきた。しかしながら、この問題についても、可視域(0.4~0.7 μm)、近赤外域(0.7~1.2 μm)、短波長赤外域(1.6 μm 付近)の3つの波長帯の反射率を組み合わせることによって、植生と積雪を分離して抽出する方法(積雪指標)が提案されている(斎藤・山崎, 1999)。

筆者たちはこれまで、斎藤・山崎(1999)の積雪指標を用いて、植生と積雪が混在する地表面状態において積雪域を抽出する画像解析手法の有効性について調べてきた(島村ほか, 2003, 2005, 2007; Shimamura et al., 2006)。積雪指標の有効性については確認でき、衛星画像を用いて積雪分布を把握することについては目途が立ったものの、積雪水量の分布を広域的に把握することについては、今なお以下のような課題が残っている。

1. 可視域から短波長赤外域におけるリモートセンシングで地表面状態を調べるためには、研究対象地域に衛星が飛来するその時刻に雲がないことが必須である。再来周期が長い衛星の場合、この天候条件を満たすことが難しい場合がある。
2. 衛星画像解析から分かるのは積雪の分布(有無)であり、積雪水量そのものが求められるわけではない。

現実的に、山岳域における積雪水量の把握が重要になってくるのは、3月末から4月初めにかけての、融雪直前の時期のことである。この時期は、山岳域における積雪水量が1年間で最大となるため、融雪期の洪水や引き続く暖候期における水利用計画を考えるうえで、こ

の時期の積雪水量を把握することが重要なのである。一方、積雪水量は、積雪の全層密度（積雪表面から地表面にかけての積雪の密度の平均値）を積雪深に乗じることで得られ、融雪が始まる直前の時期の全層密度は一定値（ $0.5\sim 0.6\text{ g/cm}^3$ 、新井, 1980）になることが、筆者たちの調査によって分かっている（松山, 1998a）。そのため、融雪直前の時期の積雪深が分かれば、積雪密度の取りうる範囲程度の誤差を考慮することによって、積雪水量を把握できることになる。

以上より、リモートセンシングによって融雪直前の時期の積雪深を把握することの重要性が示された。この点に関しては、遠藤・増田（2006）のレビューにあるように、大陸規模の積雪深分布についてはマイクロ波（おおよそ $1\text{ mm}\sim 1\text{ m}$ の波長帯）を用いて積雪深を推定することができる（Chang et al., 1987; Armstrong and Brodzik, 2001）。しかしながら、本研究で対象とする魚野川流域（流域面積 $1,504\text{ km}^2$ ）については、空間スケールの関係から同じ手法を適用することはできない。一方、上述したように可視域から短波長赤外域にかけてのリモートセンシングでは、積雪分布を把握することはできても、積雪深を推定することはできない。

この空間スケールに伴う問題を解決するために、本研究では、最近急速に普及しつつある UAV（Unmanned Aerial Vehicle, 小型無人航空機）を用いて、豪雪地域の積雪深を推定することを試みる。その詳細については以下で述べる。

1.2 UAV を用いた積雪深の推定

フィールドワークでは、対象物を上（空）から観測したいという場合が多くある（例えば、森林の分光反射観測など）。空からの観測には、人工衛星、飛行機、ヘリコプター、パラグライダー、気球をはじめとして様々なプラットフォームが用いられるが、対象物のデータを必要なタイミングで取得することは技術的にも費用的にも容易ではない。例えば、衛星 Landsat 7 号は空間分解能 約 30 m で地表面状態を捉えることができるが、同一地域に飛来するのは 16 日に 1 回しかない（日本リモートセンシング研究会, 2001）。そのため、この衛星で地表面状態を捉えようとする場合には、衛星が飛来するその日時に観測対象地域が雲に覆われていない必要がある。これは相当大変なフィールドワークである（泉・松山, 2013）。UAV を用いるのであればこの天候条件の厳しさをクリアすることができ、なおかつ、高さ数百 m のところから写真撮影を行なうため、高空間分解能の画像を得ることができる。

無人ヘリというと、日本ではヤマハ発動機が主に農薬散布用に開発したエンジン搭載の大型無人ヘリが普及し、研究分野でも利用されてきた。しかしながら、高価なことや運用に専門のオペレーターが必要なことなど、その利用は必ずしも容易ではなかった。一方、最近急速に普及しつつある UAV は、既存の無人ヘリと比較するとかなり低価格であり（数万円程度から購入できるものもある）、数時間程度の訓練で比較的容易に操縦できるようになるなど、これまでに比べると格段に利用しやすいものである。UAV は GPS、およびジャイロセンサと加速度センサを用いた制御系により、操縦機で微調整を行なわなくても自動でホバリングする（空中に浮遊して静止する）機能を有している。エンジン搭載の無人ヘリに比べると飛行時間が短く、ペイロード（積載できる物体の重量）も少ないという欠点はあるものの、バッテリーを用いた電気駆動のため、UAV は機体の取り扱いが容易であるという特長もある。

共同研究者はいち早く UAV を導入して現場で使用してきた, UAV に関する日本国内の第一人者である (泉, 2014)。UAV 開発メーカーとも連携し, 製品の改善や機能向上に関するフィードバックを続けてきたからこそ, 今日の UAV を用いた研究の盛況があるとも言える (小林, 2015)。共同研究者は, 2014 年には南木曾および広島のと砂災害, 御嶽山噴火, 白馬村の大地震など災害現場での現状把握のために, UAV による空撮を行なってきた。この他, 日本国内の他の研究機関では, 水稻の生育状況のモニタリング (濱ほか, 2016), 海底湧水の探索 (山田ほか, 2016) などに UAV が用いられてきた。

2016 年には, 日本リモートセンシング学会誌 36 巻 2 号で「UAV 小特集～最新法規から応用技術～」が生まれ, 土木學會誌 101 巻 5 号でも「特集 土木と UAV—利活用の可能性を考える—」が生まれるなど, UAV を用いた研究成果も着々と蓄積・公表されつつある。しかしながら, これらの特集号の中にも UAV を用いて積雪深分布を推定した研究はない。日本は世界有数の豪雪地帯であり, UAV を用いて積雪深の広域分布を把握することは意味がある (1.1 節参照)。多くの現地調査では, 積雪深 (および積雪水量) の高度分布は 1 つの調査ルートの観測結果に基づいて求められてきたが, UAV を用いて積雪深分布を直接, 面的に求められることを示せば, それは, この分野の研究にブレークスルーをもたらす可能性がある。

日本国内で, UAV を用いて積雪深分布を推定した数少ない研究例として小花和ほか (2015) がある。この研究では, 新潟県魚沼市大白川の山地斜面 2 ヶ所および南魚沼市余川の山地斜面 1 ヶ所において, UAV を用いた積雪深分布の推定および地上での実測調査が行なわれた。積雪深分布は SfM-MVS (Structure from Motion-Multi-view Stereo) という新しい航空測量手法 (小花和ほか, 2014, 以下 UAV 測量) を用いて求められている。SfM-MVS は画像処理をベースとした技術であり, 画像の撮影位置と姿勢を推定し, 被写体の形状を復元する技術である。

小花和ほか (2015) では, 無雪期と積雪期に, それぞれ UAV 測量を行なうことによって 3 次元の DSM (Digital Surface Model, 地表面標高モデル) を作成し, 両者の差分を取ることで積雪深を推定している。積雪深の実測値は 115~300 cm であり, 推定値と実測値を比較すると, 誤差は -24~+30 cm (誤差の絶対値の平均は 16 cm), 相対誤差は 3~11% (相対誤差の平均値は 8%) であった。UAV 測量による DSM と地上レーザ測量によって得られた DSM を比較した小花和ほか (2014) によれば, 両者の差は 0~20 cm, 通常は約 10 cm 以下で DSM を作成することができるので, 積雪深も 10 cm 程度の精度で推定されていると考えられる。この他, SfM-MVS 手法によって積雪深を推定した別の研究例として内山・上石 (2014), および内山ほか (2014) がある。これらの研究では, 得られた DSM の推定精度について検討されており, 前者では目視で積雪深 2~3 m, 後者では積雪深 77 cm のところで検証されたと述べられているが, 積雪深の実測値との比較・検討は十分であるとはいえない。

最近, 海外でなされた同様の研究には Nolan et al. (2015) と Vander Jagt et al. (2015) がある。前者は, アメリカ合衆国アラスカ州フェアバンクス国際空港の構内と Hulahula 川流域を対象として, 2013~2014 年の寒候期に現地調査がなされた。地上での積雪深観測は合計 6,000 地点を超えるというものであり, UAV 測量と地上での積雪深観測の差の標準偏差は 10 cm となることが示された (水平方向の位置精度は 30 cm)。しかしながら, Nolan et al. (2015) で対象とした地域の積雪深は高々 1.5~2.0 m であった。一方, Vander Jagt et al. (2015) では

タスマニア中南部（オーストラリア）の Mount Field 国立公園を対象として UAV 測量と地上での積雪深観測との比較がなされた。この研究では、積雪深は 33~121 cm の範囲に分布し、深さ 100 cm 以上の領域では、精度 10 cm 未満で積雪深を推定することが示された（水平方向の位置精度は 50 cm）。いずれにせよ、積雪深が 2 m を超えるようなもっと雪深いところで、UAV 測量の有効性について検討する必要があると言える。

1.3 本研究の目的

以上より、本研究の目的は、日本有数の豪雪地帯において、積雪期（融雪直前の時期）と無雪期にそれぞれ UAV 測量を行なって DSM を作成し、両者の差分から積雪深分布を推定することである。そして、UAV 測量を行なうと同時に撮影範囲内の積雪深分布を地上で実測し、UAV 測量の結果を検証することである。

筆者たちは約 20 年間、新潟県南魚沼市塩沢町にある巻機山（標高 1,967 m, 図 2）で山岳積雪調査を続けてきた（松山, 1998a, 2008; 島村ほか, 2005, 2 章参照）。ここは日本有数の豪雪地帯であり、「平成 18 年豪雪」と言われた 2006 年 3 月の巻機山 7 合目（森林限界直上, 標高 1,550 m, 図 2 の G 地点）の積雪深は 7.45 m であった。これは積雪水量に直すと約 3,700 mm になる。日本の年降水量は 1,700~1,800 mm であるから、「平成 18 年豪雪」の時の巻機山 7 合目は、日本の年降水量の 2 倍を超える水を蓄えていたことになる。これは極端な例としても、過去 20 年間、融雪直前の時期の巻機山 7 合目では 2,000~3,000 mm の積雪水量が観測されている（未公表資料であり、原著論文として初めて公表する予定なので、本報告では図を掲載することはできない）。

このような多雪地帯において UAV 測量を行なって積雪深を推定することは、上述した海外の研究例（Nolan et al., 2015; Vander Jagt et al., 2015）や国内の研究例（内山・上石, 2014; 内山ほか, 2014; 小花和ほか, 2015）における積雪深を超える地域を対象とすることになり、新しい知見が得られることが期待される。また、本研究では、UAV 測量による推定値は地上での積雪深実測値によって検証される。そのため、UAV 測量による積雪深分布が妥当であることが示されれば、重労働でありかつ危険な現地調査を軽減できる可能性がある。そして、UAV 測量による積雪深分布を面的に求められることが示されれば、山岳積雪水資源量の把握といった研究分野にも大きく貢献することが期待される。

2 地域概要

調査対象地域は、1.3 節で述べた巻機山周辺である（図 2）。ここを選んだ理由は、巻機山が位置する三国山脈が、冬季には北西の季節風を受けるため日本有数の豪雪地帯になることと、筆者たちの土地勘があることによる（松山, 1998a, 2008; 島村ほか, 2005）。

植生の垂直分布を見た場合、巻機山周辺は、落葉広葉樹林帯の上に分布すべき亜高山帯針葉樹林帯が欠落し、落葉広葉樹林帯の上に直接高山帯植生が出現する偽高山帯植生となっている。ここでは、ブナを中心とした落葉広葉樹林が標高 1,500 m 付近の森林限界まで広がっており、それよりも高い標高帯はササ群落で占められている（高田, 1986）。本研究では、スノーサーバイ時の観察に基づいて、標高 1,550 m を森林限界とした。

これまで、筆者たちが巻機山で行なってきた山岳積雪調査に関する研究成果をまとめる

と以下ようになる。まず、松山（1998a）では、1996～1997年の寒候期に、巻機山における積雪密度と積雪水量の高度分布について調べた。森林限界下の巻機山における積雪水量の高度分布係数（標高に伴う積雪水量の増加率）は、日本国内における典型的な値（約1.0 mm/m, 松山, 1998b）の2倍以上であることが判明し、巻機山は標高に比べて膨大な量の雪を蓄えていることが明らかになった。同時に、融雪期（3月下旬以降）の積雪密度については、標高が高いところでも低いところでもほぼ一定値（東北・北陸地方の典型的な値である0.5～0.6 g/cm³, 新井, 1980）になることも分かった。このことは、融雪期には積雪深を測定するだけで、積雪水量を推定できることを意味している。積雪水量の調査は重労働であるため、測定が容易な積雪深の観測だけで積雪水量を推定できるのは、重要な意味を持つ。

その後、島村ほか（2005）では、巻機山における積雪水量の高度分布係数が大きいことを再確認しただけでなく、森林限界上の積雪分布についても検討した。森林限界上では風が強いため、堆積した雪が風によって移動する。この積雪の再配置によって、森林限界上の積雪水量の高度分布は標高と無関係になり、安全を確保したうえで計測可能な尾根上ではどこでも約500 mmになる。さらにこの研究では、(a) 森林限界下での積雪水量の高度分布が山頂まで成り立つと仮定した場合と、(b) 森林限界上の積雪水量は500 mmで一定とした場合、それぞれについて、巻機山を流域界とする魚野川流域（六日町流量観測地点よりも上流）の積雪水資源量を計算した。積雪の有無は人工衛星 Landsat 7号の画像を用いて、斎藤・山崎（1999）の積雪指標を用いて決定し、(a)、(b)、2通りの方法で魚野川流域の積雪水資源量を推定したところ、両者の違いは、流域平均値では約10%となった。これは、森林限界上の部分が全流域に占める割合が小さいためであると考えられる。しかしながら、積雪水量の空間分布について調べると、(a)と(b)の違いは、場所によっては300%にも及ぶ場合があることが示された。

松山・泉（2009）は、1993年の融雪期に撮影された衛星 Landsat 5号の画像を入力とし、SRM（Snowmelt Runoff Model; Seidel and Martinec, 2004による集中型モデル）を駆動して、魚野川の六日町流量観測地点の河川流量を推定した。同時期の六日町における流量を分布型融雪－流出モデルで推定した先行研究（小池ほか, 1995; Lu et al., 1996）との精度比較を行なうために Nash-Sutcliffe 指標（Nash and Sutcliffe, 1970）を計算したところ、SRMは集中型モデルであるにも関わらず、Nash-Sutcliffe 指標は0.82と、十分な精度で流量を推定できることが示された。このことは、融雪－流出モデルにおける積雪面積情報の重要性を示すものである。

3 方法

3.1 UAV 測量

本研究では、無雪期および積雪期において UAV 測量を行ない、両者の差分から積雪深分布を求めた。以下、その具体的な手順について述べる。

3.1.1 無雪期の UAV 測量

2015年8月1日には、研究分担者が巻機山麓（図2のA地点～B地点の範囲）において UAV を用いた写真撮影を行なった（図3a, 4a）。観測に用いた UAV は K&S 社製の K4R であ

る(図 3a)。これは、4 個のプロペラを持つ小型のクワッドコプターであり、大きさは約 620×620×430 mm、本体下部にある雲台に様々な観測機器を搭載可能である。K4R は IMU (内部慣性装置) によって常に機体の位置と姿勢を制御しており、自律飛行が可能である。この時は RICOH 社のデジタルカメラ GR (以下、GR) を K4R に搭載して写真撮影のみを行ない、GNSS (Global Navigation Satellite System) 測量は、後日 10 月 4 日に行なった。GNSS 測量には、Trimble GeoExplorer 6000XH (GPS と GLONASS に対応、後述する図 17) と対空標識 (後述する図 12) を使用した。この結果、平面直角座標系第 VIII 系原点 (36.0N, 138.5E) からの水平距離 (x 座標, y 座標) が 10 点得られた (後述する図 10)。

撮影に用いたデジタルカメラ GR の大きさは約 117×61×35 mm、重さは約 245 g、有効画素数は約 1,620 万 (総画素数約 1,690 万)、CMOS サイズ 23.7×15.7 mm、レンズは 5 群 7 枚 (非球面レンズ 2 枚)、18.3 mm (35 ミリ判換算で約 28 mm 相当)、レンズ F 値は 2.8~16 となっている (<http://www.ricoh-imaging.co.jp/japan/products/gr/>, 2016 年 7 月 18 日確認)。また、GR は 1 秒ごとにインターバル撮影が可能な、数少ないデジタルカメラである。

UAV を飛ばす際の自律飛行制御ソフトウェアには DJI 社の Ground Station を使用し、飛行計画には Photogrammetry Tool を利用した。Photogrammetry Tool では、飛行高度や飛行速度、サイドラップ率、オーバーラップ率の設定が可能である。ここで、サイドラップとは空中写真撮影における並行するコース間の重なり度合いのことであり、オーバーラップとは進行方向における画像間の重なり度合いのことである。まず、UAV から写真撮影を行なってステレオペア画像を取得した。飛行高度は対地高度を 80 m とし、サイドラップ率は 60%、オーバーラップ率は 80% とした。また、離陸と着陸以外は自律航行システムを利用し、飛行速度は 6 m/秒とした。写真撮影は、1 秒毎にシャッターを切るインターバル撮影モードを使用して行なった。写真のぶれを防ぐため、シャッタースピード優先モード (Tv モード) で撮影し、シャッタースピードは 1/800 秒とした。これらの設定は、以下の UAV 測量でもほぼ同様である。

2015 年 10 月 3 日には、研究分担者および研究協力者 (首都大学東京 都市環境科学研究科 地理環境科学域の大学院生) 3 名の合計 4 名が、図 2 の A 地点から p 地点まで登山を行なった。その際、DJI 社製の UAV (Phantom2, 小型のクワッドコプター、図 3b) を背負って登り、p 地点で UAV 測量および GNSS 測量を行なって 5 地点の位置情報を取得した。Phantom2 も IMU によって機体の位置と姿勢制御がなされており、自律飛行が可能である。さらに、自動航行を可能にするために、Phantom2 には「DJI 2.4G Data Link」が付加されている。Phantom2 の大きさは約 290×290×180 mm であり、本体下部にあるジンバルにはファスナー付きの小袋を取り付け、デジタルカメラを搭載できるように加工した (図 3b)。その後、図 2 の G 地点付近と B 地点でも同様の UAV 測量および GNSS 測量を行なった。ただし、下山後の B 地点で使用した UAV は K4R であり、この時は対地高度 100 m で飛行させた。

3.1.2 積雪期の UAV 測量

2016 年 3 月 21 日には、図 2 の A 地点付近で UAV 測量を行なった。観測に用いた UAV は DJI 社製の Phantom2 および Phantom3 Professional である。同時に、16 地点で GNSS 測量をしながら、測深棒を用いて 10 地点で積雪深を測定した (図 4b)。

Phantom3 Professional は Phantom2 の後継機であり、本体にはデフォルトでカメラが備え付けられている。そのため、Phantom2 のように、デジタルカメラをジンバルに取り付けるための加工は必要ない。Phantom3 Professional のプロペラを除く対角寸法は 350 mm であり、付属のカメラ（センサ）は Sony EXMOR 1/2.3", 有効画素数は 1,240 万（総画素数 1,276 万个）である。レンズは視野角（FOV）94°, 長さ 20 mm (35 mm フォーマットと同等), レンズ F 値 2.8、フォーカス無限大となっている (<http://www.dji.com/jp/product/phantom-3-pro/info> による。2016 年 7 月 1 日確認)。

UAV による撮影は、Phantom2 および Phantom3 Professional の両方で行なった。しかしながら、Phantom3 Professional の画像を用いるとデータ処理に倍以上の時間がかかるため、本研究では Phantom2 によって撮影された画像のみを用いて積雪期の DSM を作成した(図 5b)。

3.2 山岳積雪調査

2016 年 3 月 19~20 日には、研究代表者、研究分担者、および研究協力者（首都大学東京都市環境科学研究科 地理環境科学域の大学院生および東京都立大学理学部地理学科卒業生）3 名の合計 5 名で、図 2 の A 地点から G 地点まで登山し、山岳積雪調査（積雪深および積雪水量の測定）を行なった。積雪深は測深棒（長さ 5.2 m を 2 セット）、積雪水量は '00 神室型スノーサンプラー（長さ 3.5 m, 断面積 20 cm², いずれも有限会社 クライメット エンジニアリング製）を用いて、それぞれ測定した。3 月 19 日は雨が降っていたので、図 2 の B 地点（東京大学ワンダーフォーゲル部巻機山荘）に直行し、B 地点のみ調査を行なった。20 日には G 地点まで往復し、C, D, F, G, A 地点の順に調査を行なった。

この時の山岳積雪調査では、UAV (Phantom3 Professional) を背負って登山することはしなかった。これは、(1) 3 月 20 日に悪天候が予想されたこと、(2) 2015 年冬~2016 年春が「50 年に 1 度の少雪」で（山麓にある「山の宿 雲天」の小野塚和彦様の話）、例年なら雪に覆われているところもブッシュが出ており、登山そのものにもかなり消耗することが予想されたためである。そのため、本研究の成果として得られた積雪深分布図（後述する図 6）は山麓の A 地点（図 2）付近のものだけになる。この時には、天候判断と合わせ、少雪の雪山に UAV を持ち込むことがいかに難しいかを、文字通り身をもって体験した。

このように、積雪期に山中で UAV 測量を行なえなかったため、山岳積雪調査の結果、および無雪期に山中で撮影した画像に関する解析結果についても、4 章以降では議論しないことにする。

3.3 SfM-MVS 手法による DSM の作成

2015 年の無雪期および 2016 年の積雪期に UAV で撮影した画像を用いて、首都大学東京地理情報学研究室にて、それぞれの時期の DSM を作成した。そして、両者の差分を取ることで、積雪深の分布を求めた。

解析に用いたコンピュータは当初、hp ENVY であった。このコンピュータは、プロセッサが Intel (R) Core (TM) i7-3770CPU@3.40GHz, 実装メモリ 32.0 GB, 64 ビットオペレーティングシステムで、Windows 8.1 Pro で動作していた。しかしながら、2016 年 5 月中旬に、Windows 10 への自動（強制）アップデートによってシステムが破壊され使用不能になったため、その後は DELL Precision T7810 を使用して DSM を作成した。DELL Precision T7810

は、プロセッサが Intel (R) Xeon (R) VPU E5-2603 v3@1.60 GHz (2 プロセッサ)、実装メモリ 32.0 GB, 64 ビットオペレーティングシステムで、Windows 7 Professional Service Pack 1 で動作している。

3次元モデル, オルソモザイク画像, DSM の作成には写真測量ソフト PhotoScan Professional Ver.1.2.2 (Agisoft 社, 以下 PhotoScan) を使用した。PhotoScan では, SfM-MVS などのコンピュータビジョン分野の技術により, 空撮した 2 次元の画像データから対象の 3 次元点群データを作成し, 3 次元モデル, オルソモザイク画像, DSM を取得することができる。ここでは, オルソモザイク画像や DSM の処理に OSGeo 財団の QGIS Ver.2.10.1 を使用した。

まず, PhotoScan を用いて, 3 次元点群データを作成した。その際に設定したパラメータを表 1 に示す。画像の撮影位置の推定と疎な点群を作成する写真のアライメント (ポイントクラウド作成) では, 「精度」を高とした。また, 画像間の同一地点を抽出する際の特徴点とタイポイントの上限を無制限にするため, 「特徴点をマスクする制限」と「タイポイント制限」はそれぞれ 0 に設定した。ここで, タイポイントとは各画像の重複する部分に両方から明瞭に把握できるところを示した点をさす。生成した点群を高密度化する「高密度 (Dense) クラウド構築 (ポイントクラウドの高密度化)」では, 「品質」を高とした。「メッシュ構築 (3D モデル)」の手順では, 「サーフェスタ입」をハイトフィールドとした。「ハイトフィールド」は, 空中写真から DSM を作成する場合に選択するものである。テクスチャを貼り付ける「テクスチャ構築 (貼り付け)」の手順では, 「マッピングモード (3D モデル表面の質感の設定)」をオルソフォトとした。このようにして作成された 3 次元モデルに, GNSS 測量で得た位置情報を付加した。その上で, オルソモザイク画像と, DSM を tiff 形式で出力した (図 4, 5)。

なお, GNSS 測量で得た位置情報について, 最終的に作成された DSM (図 5) に与えたものは, 無雪期は図 4 (a) の 6 地点, 積雪期は図 4 (b) の 5 地点であり, 両図において地点 1~5 は共通である。本研究では, 画像に位置情報を与える作業のことを「GCP を取る (あるいは GCP を与える)」と表現し, GNSS 測量を行なうこととは区別する。なお, 図 4 (a) の地点 15 および図 5 作成に至るまでの経緯については, 5.2 節で説明する。

4 結果

図 5 は, 無雪期と積雪期にそれぞれ作成された A 地点付近の DSM である。この図から分かるように, どちらの時期も南東側で DSM の値が大きく, 北西側から西側にかけて DSM の値が小さくなっていることが分かる。そして, DSM の比高差は最大約 50 m にも及ぶ。

図 6 は, 図 5 (a), (b) の差分として得られた積雪深分布図である。この図は, 検討を重ねたうえ最終的に得られた積雪深分布図になる (5.2 節参照)。積雪期に GNSS 測量を行なったのは, 図 6 中で数値が記されている 16 地点であり, 正の値が記された 10 地点において測深棒で積雪深を観測した。なお, UAV による積雪深が正の値になっているところは, 積雪期の DSM (図 5b) > 無雪期の DSM (図 5a) となるところだけである。無雪期, 積雪期ともにオルソ画像 (図 4) を見ると分かるように, この範囲内には樹林が分布している。DSM では樹高を含めた高さが表現されるため, 図 6 では無雪期の DSM > 積雪期の DSM となるところも存在する。そして, そのようなところ (負の積雪深が得られるところ) は,

図 6 では積雪深 0 cm としてある。このことから分かるように、林床に積雪が分布していたとしても、それは UAV 測量では抽出できないのである (図 7)。すなわち、UAV 測量によって正の積雪深が得られるのは、林床以外のところだけである (図 7)。

今回得られた積雪深は、UAV 測量によるものが 0~77 cm、測深棒によるものが 42~107 cm となり、両者の差は -22~+54 cm であった。誤差の絶対値の平均は 21 cm、RMSE (Root Mean Square Error, 平方根平均二乗誤差) は 29 cm であり、この精度は小花和ほか (2015) と同程度であった。なお、小花和ほか (2015) で得られた積雪深の実測値は 115~300 cm であり、UAV 測量による推定値と測深棒による実測値を比較すると、誤差は -24~+30 cm (誤差の絶対値の平均は 16 cm)、相対誤差は 3~11% (相対誤差の平均値は 8%) であった。この研究と比較すると、本研究による誤差の範囲や誤差の絶対値はほぼ合致する。しかしながら、本研究の方が積雪深の実測値が小さかったために相対誤差は大きくなり、推定された積雪深の相対誤差は 1~100%、相対誤差の平均値は 34% になった。また、1.2 節で述べた外国での研究 (Nolan et al., 2015; Vander Jagt et al., 2015) では、10 cm 程度の精度で積雪深が推定されている。これらと比べると、本研究で得られた積雪深の精度は若干劣る。

図 8 は、測深棒による積雪深の実測値と UAV 測量による積雪深の推定値とを比較したものである。両者には正の相関がみられるが、相関係数は 0.27 (決定係数は 0.075) と統計的に有意な値ではない。これは、サンプル数が 10 と少ないことや、UAV 測量による積雪深が 0 cm 近くになる点がいくつかみられることが影響している。これらのデータを除けば両者の相関関係はもっと大きくなることが期待されるが、そのような操作は恣意的というものだろう。

5 考察

5.1 夏の DSM > 冬の DSM となるところについて

4 章で、夏の DSM の方が冬の DSM よりも高くなる場所があることを述べた。これは、樹林帯に相当し、このようなところでは林床に積雪があっても、UAV 測量ではそれを抽出できないことが、図 6, 7 より明らかになった。本研究の山岳積雪調査では、図 2 の G 地点 (標高 1,550 m) まで樹林帯を登っていく (図 9)。そのため、現状の調査ルートでは、仮に UAV 測量との同期観測ができたとしても、測深棒による積雪深との対応を取るのには難しいということになる。

これは、逆に言うと、森林がないところであれば、UAV 測量による積雪深分布の推定が有効であることを意味している。そのようなところは、図 9 では谷状のところに対応する。具体的には、図 9 の米子沢やヌクビ沢がこれに対応し、これらの沢は山スキーのコースとして山岳雑誌等で紹介されている。

しかしながら、山スキーヤーとしてこれらの沢を短時間で滑降するのと、GNSS 測量を行ない、積雪深を測定しながら下りてくるのでは雲泥の差がある。GNSS 測量を行なうためには最低 4 つの衛星を捕捉する必要があり、それなりの時間が必要である。その間、雪崩に注意しながら同じ場所に立ち止まらなければならず、調査は命がけのものになる。筆者たちが図 9 の尾根上のルートを調査するのは、何よりも安全第一を考慮してのことである。

山スキーのルートとしては、米子沢の方がヌクビ沢よりもはるかに難しい。これは、米子

沢の途中に「大滝」があり、この滝が完全に雪に覆われないと沢を滑降することが難しいからである。「大滝」が雪に覆われるのは、多雪の年であっても年に1週間から10日程度である、もし米子沢を調査するのであれば、スキー技術の揃った少数のメンバーで時期を選んで出かける必要がある。

一方、谷状のところでは、無雪期にGNSS測量を行なおうとするならば沢登りが必要である。すなわち、UAV測量によって積雪深の分布を求めようとするならば、山スキーだけでなく沢登りの技術も必要なのである。無雪期についても、米子沢とヌクビ沢では前者の沢登りの方が難しい。沢登りでは、落石に注意しながらGNSS測量を行なうことになり、積雪期と違って樹林帯の中を登っていく場面もある。そのため、衛星を捕捉するのに時間がかかり（あるいは、補足できない場合もあり）、GNSS測量を行なうのに苦戦する場合も考えられる。

なお、これに関連して、無雪期と積雪期のGNSS測量およびGCP取得に関する問題点については、次節で述べることにする。

5.2 GCPの与え方について

画像解析の際、GCPは無雪期と積雪期、同じ点を与えるべきである。

筆者たちは当初、無雪期のDSMと積雪期のDSM(図5b)を、それぞれの時期にGNSS測量を行なった地点のデータを用いて作成していた。具体的には、無雪期は図10の10地点でGNSS測量を行ない、このうち4,5,6,9の4地点をGCPとして用いた。一方、積雪期は図4(b)の5地点をGCPとして用いたが、図10と図4(b)では共通する地点はない。そして、無雪期と積雪期に別々に作成したDSMの差分を取って積雪深分布図を作成したところ、当初、図11が得られた。

図11の破線で囲まれたところは、北北西～南南東方向に広がる長方形の広場になっており、樹林に覆われているわけではない(図4)。調査当日、ここは一面積雪に覆われていたが(図12)、当初作成した図11では、広場の南東側のみ積雪があることになっていて、現実をよく再現していなかった。これは、無雪期の画像と積雪期の画像に別々のGCPを与えたため、作成されたDSMの水平成分がきちんと重なっていないために生じた問題ではないかと考えられた。実際、図4(b)と図10を重ねてみると、同一地点であってもかなりずれていることが分かる(図13)。

そこで、無雪期と積雪期の画像に共通のGCPを与える作業を行なった。図14に示したように、画像上で視認可能な限り同じ位置にGCPを与えて無雪期と積雪期のDSMを作成し直し、両者の差分として得られたデータが図15になる。図15の元となったオルソ画像で確認する限り、水平成分はほぼ完全に重なったが(図16)、図15では西側の積雪が深く、東側の積雪が浅くなった。この理由としては、無雪期と積雪期の画像に共通のGCPを与える際(図4bの5点)、画像の東側を中心にGCPを与えたため、画像周辺部の値がPhotoScanによって外挿され、高さ方向の精度が悪くなったことが考えられた。GCPから離れたところはPhotoScanが自動的に外挿するために、DSMが低いところは高く、高いところは低くなるような補正がなされてしまうのである。図5から分かるように、この付近は南東側が高く、北西側が低い地形をしている。そのため、外挿の影響によってフラットなDSMが得られてしまい、差分として得られる積雪深は図15のように南東側で浅く、北西側が深くなっ

たと考えられる。

この問題を解決するため、積雪期の DSM における「地点 15 (図 4a) の標高一測深棒による積雪深 (50 cm)」を高さ方向の GCP として無雪期の DSM に与えて、再解析を行なった。その結果得られたものが、4 章で示した図 6 (検討を重ねたうえ最終的に得られた積雪深分布図) になる。図 6 においても、東側に新たに GCP を与えることはしなかったため、画像東側の道路付近の積雪深が浅く出ているという問題点が残っている。しかしながら、図 6 の長方形の広場 (図 11 の破線で囲まれたところ) では、UAV 測量による積雪深も、測深棒による積雪深も北西方向から南東方向にかけて増加しており、積雪深の分布傾向をよく再現している (図 8)。

この再解析作業は、積雪期の 3 次元の GCP を無雪期の画像に与えたことに相当する。新潟県の場合、GNSS 測量では、平面直角座標系第 VIII 系原点 (36.0N, 138.5E) からの距離 (x 座標, y 座標) が得られるが、図 6, 図 11, 図 15 の場合、図中の適当なところを原点として、そこからの相対的な距離が分かれば解析には十分である。つまり、無雪期と積雪期で同じ場所 (文字通りの Ground Control Point) が特定できれば、画像解析上は問題ないのである。そして、無雪期と積雪期の画像が水平方向に重なれば、鉛直成分 (この場合積雪深) だけの議論ができるようになる。

このように考えると、無雪期にも積雪期にも存在する GCP の存在が重要になってくる。特に、積雪期にも雪で埋まらない人工物が GCP としては最適である。2015 年冬～2016 年春は記録的な少雪だったため、積雪期にも大きな石が露出していて、GCP として利用できた (図 17)。しかしながら、雪の多い年にこの方法は適用できないと考えられる。また、順序としては、積雪期に雪面上に露出している地物で先に GNSS 測量を行ない、無雪期に同じところに行くのがよい。その一方、積雪期はあたり一面が積雪に覆われるため、無雪期よりも行動の自由度が高い。無雪期は基本的に道路上しか移動できないが、積雪期は雪に覆われていれば、山スキーでどこでも自由に移動できるのである。そのため、先に無雪期に GNSS 測量を行なって、積雪期に同じところに行くという考え方もある。いずれにしても、GNSS 測量を行なった位置を GPS に記録して、無雪期・積雪期ともに同じ場所に行けるようにしておくことが重要である。なお、雪面に置いた対空標識 (図 12) は無雪期には存在しないため、当然のことながら、無雪期の GCP として先に位置情報を取得することはできない。

5.3 測深棒による積雪深の測定について

測深棒による積雪深の測り方にも工夫が必要である。

1.2 節で紹介した Nolan et al. (2015) は、合計 6,000 地点以上で地上の積雪深観測を行なった。ここまで徹底した調査でなくても、本研究の場合、測深棒による積雪深のデータがもっと必要であった。定量的・理論的な考察は行なっていないが、感覚的には 10 m^2 に 1 点ぐらい積雪深のデータがあるとよかったという印象を受けた。そうすると、図 8 の散布図もだいぶ変わったものになってくるであろう。ただし、図 6 の範囲について 10 m^2 に 1 点で積雪深観測を行なうと約 6,000 点になり、Nolan et al. (2015) とほぼ同等の地点数になる。必要とする地点数と解析範囲との関係について、2016 年冬～2017 年春の積雪期が始まる前に定量的・理論的な考察を行なう必要がある。

測深棒による積雪深の測定方法そのものも考える必要がある。斜面で測定すると、 2 m^2 小

らの範囲でも積雪深が 50 cm 以上異なる場合があった。積雪に限らず、一般に地表面が絡むと少し離れたところであっても物理量が大きく異なることが多い(例: 地表面熱収支, 近藤, 1994)。そのため、物理量(この場合積雪深)が急変するところでは、空間的に密に測定する必要がある。どの程度まで詳細に観測を行なうかは、現場での状況(天候条件等)や解析の手間にも依存するため、今後この点についても検討していく必要がある。

6 結論

新潟県巻機山麓において、2015年8月(無雪期)と2016年3月(積雪期)に、それぞれ UAV 測量を行なって DSM を作成した。そして、両者の差分を求めることで積雪深分布図を作成した。これと、測深棒による積雪深を比較することにより、以下のことが明らかになった。

- (1) 得られた積雪深は、UAV 測量によるものが 0~77 cm, 測深棒によるものが 42~107 cm となり、両者の差は-22~+54 cm であった。誤差の絶対値の平均は 21 cm, RMSE は 29 cm であり、この精度は日本国内における先行研究と同程度であった。
- (2) 測深棒による積雪深と UAV 測量による積雪深には正の相関がみられた。しかしながら、相関係数は 0.27 と小さく、統計的に有意でなかった。これは、サンプル数が 10 と少なかったことや、UAV 測量による積雪深が 0 cm 近くになる点がいくつかみられたことが影響している。
- (3) UAV による積雪深分布図は、積雪期の DSM > 無雪期の DSM となるところのみ得られた。すなわち、樹林帯の林床に堆積する積雪深は、UAV 測量からは推定できないことが分かった。
- (4) 無雪期と積雪期の DSM を作成する際、使用する GCP は同じものを与えることが望ましいことが分かった。これは、積雪期の GCP (積雪深を含む) を無雪期の画像に与えることによって、最終的に得られる積雪深分布図が高精度になったことから導き出された。しかしながら、無雪期と積雪期に同一地点で GCP を取得することは難しい場合があることも指摘した。

2015年冬~2016年春は記録的少雪であったため、当初目論んだ豪雪地帯特有の積雪深を UAV 測量で推定することはできなかった。本研究で調査した巻機山麓 A 地点(図 2)における 3月下旬の積雪深は平均 185 cm (2002~2016年)であり、過去には 360 cm という観測値が得られた年もある。それゆえ、2016年冬~2017年春が多雪年になれば、本研究とは対照的な結果を得られる可能性がある。

自然相手の研究であるだけに、2015年冬~2016年春が少雪となったことは致し方ない。しかしながら、世界的に見た場合、やはり日本は豪雪地帯である。そのため、日本をフィールドとして行なうべき研究は、やはり豪雪地帯の積雪深推定であると考えられる。水資源管理や融雪災害対策の両方を考慮したうえで、その重要性は論を待たない。

また、本研究を行なった結果明らかになった別の課題として、「山岳積雪地域に UAV を持ち込むことは難しい」ということが挙げられる。そのため、アクセスが容易な豪雪地帯で

本研究と同様の調査・研究を行なう必要がある。具体的には、立山・黒部アルペンルート、蔵王エコーライン、八幡平アスピーテラインなどが候補地として挙げられる。これらはいずれも、残雪豊富なゴールデンウィークには開通するため、「豪雪地帯の積雪深を UAV で推定する」という本研究の目的を達成するためには格好のフィールドである。ただし、いずれも国立公園内にあるため、UAV の飛行許可を得ることに手間がかかりそうである。この点については、用意周到な事前の準備で対応するしかないであろう。

いずれにしろ、本研究で得られた成果および経験をいかして、今後も独創的な研究を進めていく所存である。

謝辞

本研究は、「国土地理協会平成 27 年度学術研究助成」があつて初めて遂行することができました。この他に、「平成 27 年度 首都大学東京 基本研究費」を本研究のために使用しました。

新潟県南魚沼市塩沢町にある山の宿「雲天」の小野塚和彦様、奈穂子様には、現地調査の際に便宜を図っていただきました。首都大学東京 都市環境科学研究科 地理環境科学域大学院生（当時）の山本遼介さん、南里翔平さん、久富悠生さん、酒井健吾さんには、無雪期の調査を手伝っていただきました。東京都立大学理学部地理学科卒業生の小池崇子さんと尾身 洋さんには、山岳積雪調査を手伝っていただきました。関東学院大学 経済学部の齋藤仁講師には、UAV 測量に基づく積雪深観測の最近の研究事情について御教示いただきました。酒井さんと南里さんには、UAV 測量で得られたデータの解析を手伝っていただきました。ここに記して、皆様方に厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 新井 正 1980. 『日本の水 その風土の科学』 三省堂.
- Armstrong, R.L and Brodzik, M.J. 2001. Recent Northern Hemisphere snow extent: A comparison of data derived from visible and microwave satellite sensors. *Geophysical Research Letters* **28**: 3673-3676.
- Chang, A.T.C., Foster, J.L and Hall, D.K.1987. Nimbus-7 derived global snow cover parameters. *Annals of Glaciology* **9**: 39-44.
- 遠藤伸彦・増田耕一 2006. 地球観測衛星によるグローバル・スケールの積雪データセット. *雪氷* **68**: 563-572.
- Hahn, D. G. and Shukla, J. 1976. An apparent relationship between Eurasian snow cover and Indian monsoon rainfall. *Journal of the Atmospheric Sciences* **33**: 2461-2462.
- 濱 侃・早崎有香・望月 篤・鶴岡康夫・田中 圭・近藤昭彦 2016. 小型 UAV と SfM-MVS を使用した近接画像からの水稻生育モニタリング. *水文・水資源学会誌* **29**: 44-54.
- 泉 岳樹 2014. 自然地理学のフィールドワーカー (6) 無人ヘリによる空からの眼一. *地理* **59**(4): 88-93.
- 泉 岳樹・松山 洋 2013. 自然地理学のフィールドワーカー (1) 運と勘一. *地理* **58**(11): 12-

17.

- 小林啓倫 2015. 『ドローン・ビジネスの衝撃 小型無人機が切り開く新たなマーケット』朝日新聞出版.
- 小池俊雄・高橋 裕・吉野昭一 1985. 積雪面積情報による流域積雪水量の推定. 土木学会論文集 **357-II**: 159-165.
- 小池俊雄・陸 旻皎・早川典生・古谷 健・石平 博 1995. 積雪高度分布を考慮した総合的融雪流出解析. 水工学論文集 **39**: 79-84.
- 近藤純正編 1994. 『水環境の気象学—地表面の熱収支・水収支—』朝倉書店.
- Lu, M., Koike, T. and Hayakawa, N. 1996. A distributed hydrological modelling system linking GIS and hydrological models. *IAHS Publications* No. 235: 141-148.
- 松山 洋 1998a. 巻機山における積雪密度・積雪水当量の季節変化と高度分布. 水文・水資源学会誌 **11**: 117-127.
- 松山 洋 1998b. 日本の山岳地域における積雪水当量の高度分布に関する研究について. 水文・水資源学会誌 **11**: 164-174.
- 松山 洋 2008. 山地流域の積雪水資源量の把握: 新潟県巻機山周辺を事例に. 電力土木 No. 333: 6-11.
- 松山 洋・泉 岳樹 2009. SRM (Snowmelt Runoff Model) を用いた融雪—流出解析—新潟県魚野川上流域を事例に—. 水文・水資源学会誌 **22**: 409-418.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models Part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology* **10**: 282-290.
- 日本リモートセンシング研究会 2001. 『改訂版 図解リモートセンシング』 日本測量協会.
- 日本雪氷学会 1990. 『雪氷辞典』 古今書院.
- Nolan, M. Larsen, C. and Sturm, M. 2015. Mapping snow depth from manned aircraft on landscape scales at centimeter resolution using structure-from-motion photogrammetry. *The Cryosphere* **9**: 1445-1463.
- 小花和宏之・早川裕弼・齋藤 仁・ゴメス クリストファー 2014. UAV-SfM 手法と地上レーザー測量により得られた DSM の比較. 写真測量とリモートセンシング **53**: 67-74.
- 小花和宏之・河島克久・大前宏和 2015. 小型無人航空機を用いた積雪量の 3 次元計測. 第 18 回年次シンポジウム (CSIS DAYS 2015) 「全国共同利用研究発表大会」研究アブストラクト集: 9.
- 大林成行編 2002. 『人工衛星から得られる地球観測データの使い方』 大成出版社.
- 斎藤篤思・山崎 剛 1999. 積雪のある森林域における分光反射特性と植生・積雪指標. 水文・水資源学会誌 **12**: 28-38.
- Seidel, K. and Martinec, J. 2004. *Remote Sensing in Snow Hydrology*. Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg.
- 島村雄一・泉 岳樹・中山大地・松山 洋 2003. 積雪指標を用いた積雪水当量・融雪量の推定—黒部湖集水域を事例に—. 水文・水資源学会誌 **16**: 331-348.
- 島村雄一・泉 岳樹・松山 洋 2005. スノーサーベイとリモートセンシングに基づく山地積雪水資源量の推定—新潟県上越国境周辺を事例に—. 水文・水資源学会誌 **18**: 411-423.
- Shimamura, Y., Izumi, T. and Matsuyama, H. 2006. Evaluation of a useful method to identify snow-

- covered areas under vegetation—Comparisons among a newly-proposed snow index, normalized difference snow index, and visible reflectance—. *International Journal of Remote Sensing* **27**: 4867-4884.
- 島村雄一・泉 岳樹・松山 洋 2007. タブレット PC を用いた高速マッピングシステムの構築とこれを用いたグラントゥルースの取得—新潟県中越地方の積雪調査の例—. 地学雑誌 **116**: 749-758.
- 高田将志 1986. 三国山脈主稜線周辺の化石周氷河性平滑斜面・化石雪食凹地. 地理学評論 **59A**: 729-749.
- 内山正一郎・上石 勲 2014. 平成 26 年 2 月豪雪での山梨県早川町における SfM による雪崩発生状況解析. 寒地技術論文・報告集 **30**: 43-46.
- 内山正一郎・上石 勲・井上 公・鈴木比奈子・丸小有沙 2014. SfM による積雪環境の三次元モデリングと積雪深推定. 雪氷研究大会 (2014・八戸) 講演要旨集: P2-43, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcsir/2014/0/2014_259/_pdf. (最終閲覧日: 2016年4月29日)
- Vander Jagt, B. Lucieer, A., Wallace, L. Turner, D. and Durand, M. 2015. Snow depth retrieval with UAS using photogrammetric techniques. *Geosciences* **5**: 264-285.
- 山田 誠・小路 淳・寺本 瞬・大沢信二・三島壮智・杉本 亮・本田尚美・谷口真人 2016. 夏季の大分県日出町沿岸部におけるドローンを用いた海底湧水の探索. 日本水文科学会誌 **46**: 29-38.