

高頻度光学衛星画像を用いた山岳地帯の雲域下の積雪域推定に関する研究

防災・復興システム工学研究室
和田拓実

1. はじめに

山岳地帯における積雪は重要な水資源であるが、積雪を現地調査により観測することは多大な労力を伴う。このため、衛星リモートセンシング技術は山岳地帯の積雪観測において有効な手段となる。一方で、衛星観測における課題のひとつは天候障害である。力丸¹⁾は NOAA-AVHRR の粗い空間分解能を補うため、過去の Landsat-MSS 融雪期データを「融雪の履歴知識」として使用することで、雲被覆で欠測がある場合でも、積雪境界を補完的に推定できる可能性を示した。しかし、当時利用された画像は低解像度の Landsat-MSS であり、使用できるシーンはごく少数に限られていた。近年では、比較的高空間分解能の高頻度光学衛星である Sentinel-2 データが取得可能となっている。さらに、Google Earth Engine 等のプラットフォームの整備により、融雪期の好天画像を効率的に検索・利用できる環境が整ってきた。

本研究では、近年高頻度に取得可能となった Sentinel-2 画像を用い、複数年の融雪期データから生成した「積雪履歴図」（融雪の履歴知識に相当）に基づき、雲域下における積雪域を推定する手法を検討する。

2. データ

欧州宇宙機関 (ESA) が運用する Sentinel-2 を利用した。解析対象 (ROI) は信濃川流域および利根川流域にまたがる山岳地域とした。その範囲は、東西 40km、南北 40km の矩形領域 (約 1,600km²) を対象とした。また、ROI 内の標高は最小 139.74m、最大 2350.19m、平均 1197.61m である。積雪履歴図を作成するために、融雪期において雲の影響がない画像を準備することが望ましい。そこで、まず Google Earth Engine を用い、2017-2025 年の 3-6 月を対象に、雲量 20% 以下のシーンを検索した。その後、検索結果について雲域の有無を目視で確認し、雲域の少ない画像を絞り込んだ (好天時画像)。

3. 方法

3.1 指標画像の作成と土地被覆分類

Google Earth 画像を用いた事前検討により、平地を除くと対象領域の土地被覆は積雪域と植生域に大別できる。これに基づき、分類の大前提を

積雪・植生・その他とし、まず積雪域・植生域・水域を強調するために以下の指標画像を作成した (式 (1)、式 (2)、式 (3))。

$$NDSI = \frac{(Green - SWIR)}{(Green + SWIR)} \quad (1)$$

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad (2)$$

$$NDWI = \frac{(Green - NIR)}{(Green + NIR)} \quad (3)$$

分類処理には、NDSI と NDVI を入力とした合成画像を用いた。水域は NDWI より抽出して積雪との誤判別を防いだ。また、平地を特定するために国土地理院の DEM10B を用い、傾斜角 8 度未満を平地とみなしてマスクした。

分類処理は段階的に実施した。まず、ROI 全体を対象に NDSI・NDVI を特徴量とする K-means クラスタリングを行い、クラスタ数を 15 として分類した。クラスタごとの平均値および False カラー合成画像を参照しながら、明らかに積雪または植生に対応するクラスタを決定し、それ以外をその他とした。次に、その他と判定された画素群を対象に再度 K-means クラスタリングを行い、クラスタ数を 5 として分類した。同様に積雪・植生に対応するクラスタを決定し、残りのクラスタを画素内に積雪と植生が存在する混合とした。

3.2 積雪履歴図

分類後の各合成画像では、積雪・植生・混合の各クラスにそれぞれ整数値を割り振った (積雪=2、混合=1、植生=0)。これをすべての検索画像について画素単位で積算し、「積雪履歴図」とした。この図の画素値は、積算された整数値で、これを「積雪履歴スコア」とする。スコアが小さい領域では、融雪期の初期で積雪が消滅し、逆にスコアの大きい領域では、融雪期の後半まで残雪が存在することを表す。

3.3 雲域下の積雪域の推定と評価

本研究では、雲被覆により地表を直接計測できない状況を想定し、雲の影響を受けていない正解画像に人工的に雲域を作成した上で、積雪履歴図および正解画像を用いた雲域下の積雪域推定を

行った。雲域は、単一の雲域と複数の雲域を作成し、雲量および雲域配置の違いが推定結果に与える影響を検討した。ここで、融雪の進行が地形条件や気象条件によって同様に支配される領域では、雲域下においても周辺の領域と同程度の融雪順序および積雪残存状況が成立すると仮定する。この仮定に基づき、積雪履歴図および正解画像を推定に用いるしきい値の決定および推定結果の評価に用いた。

具体的には、雲域近傍にリング領域を作成し、各画素について正解画像に基づく積雪・非積雪の判別結果と、積雪履歴図から得られるスコアとを画素単位で対応させ、この対応関係に基づいてスコアに対するしきい値を決定した。スコアに対してしきい値 z を設定し、 z 以上の画素を積雪、 z 未満の画素を植生として分類した。しきい値 z は一定刻みで変化させ、リング領域内において、スコアに基づく分類結果と正解画像の積雪・植生判別結果との不一致量が最小となる条件を式(4)により求め、最適しきい値 $best_z$ として採用した。ここで $N_{FN}(z)$ は正解は積雪であるが無雪と判定される画素数、正解では非雪であるが積雪と判定される画素数である。この $best_z$ を雲域下領域内のスコアのしきい値として、雲域下を推定した。さらに、雲域周辺から取得される情報量の違いが推定結果に与える影響を評価するため、雲域近傍に設定するリング領域の幅を複数段階で変化させた。

評価は、リング幅に対する $best_z$ の挙動と、リング幅に対する正解率、Kappa係数の変化量から行った。正解率は式(5)、Kappa係数を用いて、最適しきい値 $best_z$ に基づく推定結果に対して式(6)により算出した。Kappa係数は、推定結果と正解画像との一致率から偶然一致の影響を補正した指標であり、分類結果の信頼性を評価する統計量である。雲域下の積雪域推定精度を定量的に評価した。

$$F(z) = N_{FN}(z) + N_{FP}(z) \quad (4)$$

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{(TP + FN + FP + TP)} \quad (5)$$

$$Kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (6)$$

4. 結果と考察

4.1 積雪履歴図

対象期間で検索した結果、62シーンのSentinel-2画像が取得された。ここから雲域の有無を目標

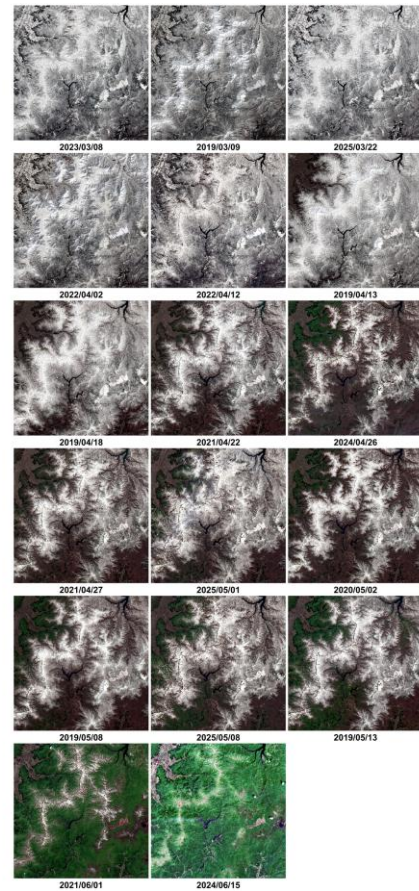


図.1 選定した好天時画像群

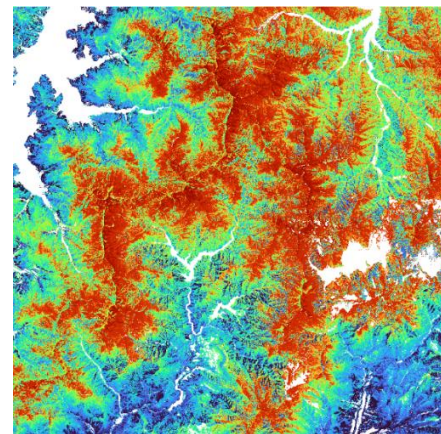


図.2 積雪履歴図

を確認し、好天画像を選択した(図.1)。その結果、3月は3シーン、4月は7シーン、5月は5シーン、6月は2シーンの計17シーンとなった(全取得シーンのうち約27%が解析に利用可能)。これらを積算した積雪履歴図を図.2に示す。スコアの最大値は34となった。Sentinel-2の17シーンを利用することで、より高い空間分解能と時間分

解能に基づく積雪履歴図が作成できた。

4.2 雲域下の積雪域の推定と評価

4.2.1 リング幅に対する $best_z$ の挙動

リング幅を1, 12, 25, 50, 75, 100pxの5条件に設定し、雲域周辺から取得される履歴情報の空間的範囲が、推定に用いる最適しきい値 $best_z$ に与える影響を評価した。その結果、単一雲域条件および複数雲域条件のいずれにおいても、 $best_z$ は概ね30付近の値を示し、リング幅を1~100pxの範囲で変化させても大きな変動は確認されなかった。一方で、雲量が極めて小さい条件かつリング幅が1pxのような極端な条件では、 $best_z$ にわずかなばらつきが認められた。これは、リング幅が極端に小さい場合には、雲域周辺から取得される履歴情報の画素数が限られ、局所的な積雪分布や雲域配置の影響を受けやすくなるためであると考えられる。以上より、本研究条件下では、 $best_z$ はリング幅に対して低感度であり、リング幅の違いがしきい値推定に与える影響は全体として小さいことが示された。

4.2.2 正解率、Kappa係数の変化

次に、リング幅ごとに算出した最適しきい値 $best_z$ を用いて雲域下の積雪域推定を行い、正解画像との比較により正解率およびKappa係数を算出した。その結果、多くの条件において、リング幅を1~100pxの範囲で変化させてもKappa係数は大きな増減を示さず、概ね一定の値で推移した。一方、正解率についてもリング幅による明確な変化は認められず、全体として比較的高い値を維持した。このことから、リング幅の拡大が雲域下の積雪域推定精度を一律に向上させるわけではないことが示された。一方で、雲量が極めて小さい条件では、リング幅に依らずKappa係数が著しく低下するケースが確認された。これは、雲域内の有効画素数が少ない条件では、正解画像における積雪・無雪の出現比が偏りやすく、偶然一致補正を含むKappa係数が過小に評価されるためであると考えられる(図.3)。ただし、同条件においても正解率は大きく低下しておらず、推定結果そのものが著しく悪化したというよりも、評価指標としてのKappa係数の特性が強く表れたものと解釈される。以上より、リング幅は正解率およびKappa係数を直接的に向上させる要因ではなく、本研究で設定した範囲では、推定精度に与える影響は限定的であることが示された。

5.まとめと今後の予定

本研究では、光学衛星画像の雲被覆により観測

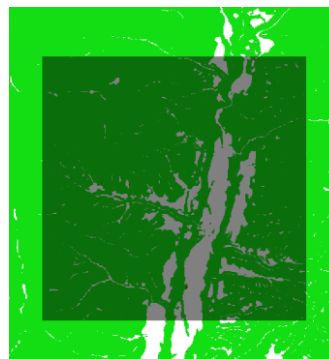


図.3 Kaappa係数が低下した例

欠測が生じる融雪期を対象として、山岳地帯における積雪履歴図の生成と、積雪履歴図を用いた雲域下の積雪域推定を行い、その適用条件と推定特性を整理した。融雪期に取得されたSentinel-2画像では、好天時画像として解析に利用可能な画像が限定的であり、解析対象期間に取得された全62シーンのうち選定されたのは17シーン(約27%)であった。この結果は、融雪期に雲被覆の影響を回避することが難しく、山岳地帯の積雪分布の把握には雲域下推定の導入が重要であることを示している。

雲域下の積雪域推定では、単一雲域条件および複数雲域条件のいずれにおいても、 $best_z$ は概ね30付近の値を示し、リング幅を変化させても大きな変動は確認されなかった。一方で、雲量が極めて小さい条件かつリング幅が1pxのような極端な条件では、しきい値にわずかなばらつきが生じた。また、リング幅を拡大しても推定精度指標が明確に向上する傾向は認められず、Kappa係数は単一雲域条件で平均0.615、複数雲域条件で平均0.616となった。一方、正解率はいずれの条件においても概ね0.92~0.94程度の比較的高い値を示しており、雲域条件やリング幅の違いによらず、雲域下の積雪域を一定の精度で推定できることが確認された。

今後は、実観測画像を用いた検証を行い、不規則な雲形状や雲縁部を含む条件下での適用性を確認するとともに、積雪履歴図の生成条件が推定結果に与える影響を整理する必要がある。さらに、雲域の面積や形状に応じて、雲域周辺のどの範囲の情報を参照することが適切であるかを検討し、雲域下積雪域推定手法の汎用性向上を図る。

参考文献

- 1) 力丸 厚: MSS 融雪履歴情報の支援による気象衛星データの画素内積雪領域の細密推定, 土木学会論文集, No.438/II-17, pp.13-22, 1991.