河川技術論文集，第25巻, 2019年6月

人工衛星画像から作成した無雪期及び積雪期の標高モデルから求めた山間部の積雪分布の精度検証

VERIFICATION OF ACCURACY OF SNOW DISTRIBUTION FROM DEMS CALCULATED BY SATELLITE IMAGES TAKEN AT THE TIME OF SNOW PEAK AND SNOW FREE

西原照雅[1]・谷瀬敦[1]
Terumasa Nishihara and Atsushi Tanise

[1]正会員　国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34）

In water resource management and disaster prevention in the snowmelt season, it is very important to estimate snow distribution at peak in the mountainous regions as accurately as possible. This study shows the accuracy of snow depth distribution calculated from satellite images based on snow depth distribution calculated from LiDAR. Snow depths were calculated subtracting DEM created from stereo satellite images taken at snow free from DEM created from stereo satellite images at snow peak. It was found that snow depths in alpine zone have good accuracy, but ones in forests need to be improved.

Key Words : *snow depth distribution, satellite images, LiDAR, DEMs, mountainous regions*

1．はじめに

積雪寒冷地においては，積雪は貴重な水資源である一方で，融雪水は融雪出水及び土砂災害の要因となる．このため，融雪期が始まる前の積雪ピーク期に，山間部における積雪の状況を正確に把握することは，水資源管理及び防災の面で重要である．ダム管理の現場においては，積雪のピーク期に積雪調査を行い，この結果から流域における積雪分布を推定することが一般的である[1)]．しかし，積雪調査は，調査者が直接入山して予め決められた点の積雪を計測するものであることから，多大な労力を必要とし，雪崩等の危険を伴う．

近年，リモートセンシング技術の発達により，山間部のような立ち入りが困難な範囲を上空から計測できるようになった．このような手法を用いて積雪深を求める場合，無積雪期に地表面を，積雪期に積雪表面を計測した結果からそれぞれの標高モデル（DSM: Digital Surface ModelもしくはDEM: Digital Elevation Model）を作成し，その差分を積雪深としている．現在，航空レーザ測量の普及が進んでおり，測量結果から求めた積雪分布と地形との関係を分析した例が報告されている（例えば，秋山ら[2)]，西原ら[3)]）．最近では，機動性及び経済性に優れたUAVを用いた積雪の計測が盛んに行われ，雪崩災害の調査に活用された例もある（例えば，小花和ら[4)]，松山ら[5)]，内山ら[6)]）．一方，近年，高解像度の人工衛星画像から高精細のDEMを作成する技術が開発され[7)]，人工衛星画像から作成した積雪表面のDEMを用いて積雪深を算出した例がある[8), 9)]．西原ら[9)]は北海道旭岳付近の山間部を対象に，人工衛星画像から作成した積雪表面のDEMと航空レーザ測量結果から作成した地表面のDEMの差分として求めた積雪分布の精度を検証し，ある程度の広さを持つ範囲における積雪量を精度良く求めることができたことを報告している．人工衛星画像は，国内の山間部に位置するダム流域を一度に捉えられる可能性があるといった利点があるが，西原ら[9)]が検証した手法の適用は，航空レーザ測量による地表面のDEMが整備されている範囲に限られる．新たに航空レーザ測量を行い，地表面のDEMを作成するよりも，人工衛星画像から地表面のDEMを作成した方がコストの面で有利であるが，人工衛星画像から作成した2時期のDEMの差分として求めた積雪分布の精度を広範囲に渡って検証した事例はほとんどない．

そこで本研究では，北海道旭岳付近の積雪ピーク期を

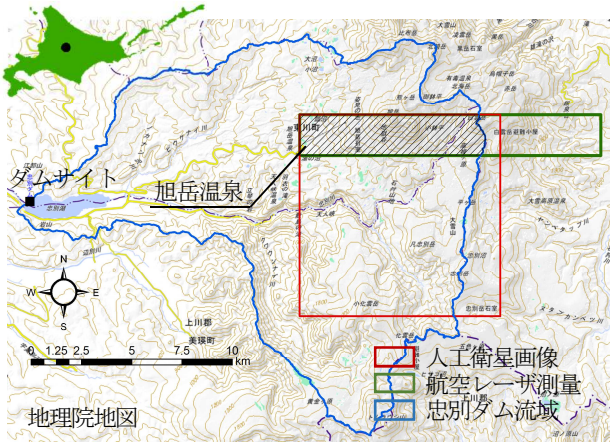

図-1　計測を実施した範囲

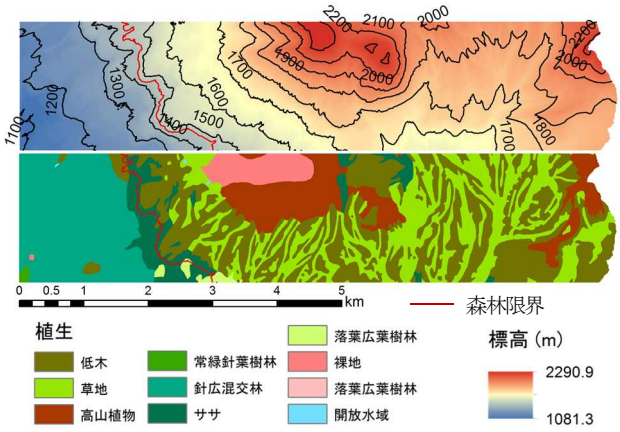

図-2　精度検証範囲の標高と植生

対象とし，2時期の人工衛星画像から作成したDEMの差分として求めた積雪分布の精度を，2時期の航空レーザ測量データから作成したDEMの差分として求めた積雪分布を用いて検証する．

2．対象範囲

計測は図-1に示す北海道旭岳付近において実施した．人工衛星画像を撮影した範囲及び航空レーザ測量を実施した範囲は，それぞれ100km^{2}及び30km^{2}である．冬期の荒天時における卓越風向に対して風衝斜面と風背斜面では積雪分布の特徴が異なる[3]ことから，人工衛星画像及び航空レーザ測量の両方のデータを取得した範囲のうち，風衝斜面である忠別ダム流域に含まれる範囲において積雪分布の精度を検証する（図-1のハッチングした範囲，18.2km^2）．対象範囲の標高及び植生の分布を図-2に示す．植生は環境省の自然環境保全基礎調査を基に10分類している．対象範囲の標高帯は概ね1100～2300mであり，標高1450m付近に森林限界がある．樹林帯においては，樹高が10～20m程度の針広混交林の占める割合が多い．高山帯においては，樹高が1～2m程度の低木が分布している範囲があるが，積雪ピーク期にはこれらを含めた植生は，積雪下に完全に埋没している．

3．作成するデータと精度の検証方法

はじめに，取得した人工衛星画像及び航空レーザ測量データから，樹木等の地物を取り除いた積雪表面及び地表面のDEMをそれぞれ作成する．

人工衛星画像から作成したDEMは，AW3D高精細版0.5mである[7]．積雪表面のDEMの作成に使用した画像は，2018年3月21日にGeoEye01センサにて撮影したパンクロマチック画像（水平解像度0.5m）のステレオペアである．なお，パンクロマチック画像には，積雪表面からの反射光により画素値が飽和し，画像マッチング処理が困難な範囲があった（4.6km^2）．この範囲については，同時にGeoEye01センサにて撮影したマルチスペクトル画像（水平解像度2m）の赤バンドが飽和していない画素値であったため，同画像のステレオペアを用いてDEMを作成し，線形補間により水平解像度を0.5mとして，パンクロマチック画像から作成したDEMを補間した[9]．地表面のDEMの作成に使用した画像は，2018年9月11日にWorldView-3センサにて撮影したパンクロマチック画像（水平解像度0.3m）のステレオペアである．なお，雲に被覆されていた等によりDEMの作成が困難であった範囲（0.1km^2）があったが，対象範囲においては土砂崩れ等の大きな地形変化が確認されていないことから，過去に撮影された水平解像度が同等である画像を用いて補完した．複数の地上基準点（GCP）を設けてDEMを補正することが理想的であるが，人工衛星画像を取得した範囲においては，容易に立ち入りが可能な範囲が旭岳温泉地区及び旭岳ロープウェイの駅周辺に限られる．この範囲において，積雪期に表面が常に露出している建物や道路等はほとんどなかったが，通路及び駐車場の雪を常時融かしている施設が1つあり，人工衛星画像の撮影時に路面が露出していたため，ここをGCPとした．このGCPを用いて積雪表面及び地表面のDEMを補正している．なお，後述する航空レーザ測量データから作成したDEMと水平解像度を合わせるため，平均値を用いてリサンプリングし，水平解像度1mのDEMを作成した．

積雪期の航空レーザ測量は，人工衛星画像の撮影と同日の2018年3月21日に実施した[9]．取得したデータのうち，積雪表面から反射した点の密度（平均2.94点/m^2）を勘案し，積雪表面のDEMの水平解像度は1mとした．GCPは計測範囲に含まれる旭岳ロープウェイの駐車場に設けた．無雪期の航空レーザ測量は，2008年9月12日～10月16日に国土交通省が実施したものであり，地表面のDEM（水平解像度1m）の提供を受けた．

積雪深は，人工衛星画像及び航空レーザ測量データから作成したそれぞれの積雪表面DEMから，それぞれの地表面のDEMを差し引いた差分とした．なお，積雪深がマイナスとなったメッシュはデータから除外した．また，傾斜が55°以上の斜面には積雪が堆積しない[10]こと

が報告されていることから，当該メッシュにおける積雪深は0とした．この際，人工衛星画像から作成した地表面のDEMから求めた傾斜及び航空レーザ測量データから作成した地表面のDEMから求めた傾斜を，それぞれのデータから求めた積雪深に適用した．加えて，旭岳温泉地区及び旭岳ロープウェイの施設周辺は，人工構造物が多数あるため，積雪深の検証範囲から除外した．

本研究では，航空レーザ測量データから作成したデータを真値と見なし，人工衛星画像から作成した地表面のDEM及び積雪深の精度を検証する．航空レーザ測量に使用した機器の鉛直方向の計測精度は±15cm，機器の計測精度から求めた積雪深の計算精度は±21cmである．検証の際，地表面のDEM及び積雪分布が有していると考えられる以下の特徴を考慮し，範囲を区分する．具体的には，地表面のDEMを作成する際，樹林帯においては樹木を除去する必要があるのに対し，高山帯においては除去すべき樹木がほとんどなく，DEMの精度に影響している可能性がある．人工衛星画像から作成した積雪表面のDEMは，解像度が異なるパンクロマチック画像及びマルチスペクトル画像を用いており，それぞれが適用された範囲においてDEMの精度が異なることが報告されている[9]．樹林帯と高山帯では積雪分布の特徴が異なることが報告されている[3]．ただし，地表面のDEMを作成する際に2018年9月11日以前に撮影された画像を使用した範囲はわずかであることから区分しない（対象範囲の0.5%）．精度の検証は，メッシュ単位で算出した誤差指標やその分布を評価することに加え，地形と積雪深との関係を捉えているかどうかや積雪量についても評価する．なお，人工衛星画像から作成した積雪表面のDEMの精度については，既往文献を参照されたい[9]．

4．結果

(1) 地表面のDEM

表-1に，区分した区域毎に算出したRMSEを示す．表に示した通り，区域により面積が異なるため，得られるサンプル数が異なるが，各区域において得られたサンプルの全数を用いてそれぞれのRMSEを計算した．GCPによる補正の有無による差を見ると，全体的にGCPなしと比較してGCPありのRMSEが小さく，十分な地点数を確保できない場合であっても，GCPによる補正を行うことが望ましいと考えられる．以降は，GCPありのみを精度検証の対象とする．**表-1(b)**には，対象範囲を樹林帯及び高山帯に区分してRMSEを示したが．樹林帯と比較して高山帯の精度が高い．**図-3**には絶対誤差を0.2m区間に区切り，**表-1(b)**に示した各区域の面積に対する，絶対誤差0.2m区間に含まれる面積の割合を示した．樹林帯においては誤差の平均値が約0.7に偏り，標準偏差が大きいのに対し，高山帯においては誤差の平均値が0に近く，標準偏差が小さい．樹林帯において，地表面が高めに計算される傾向が見られる．

表-1 地表面のDEMのRMSE (m)

(a)	全体 (18.2 km²)
GCPあり	0.892
GCPなし	2.272

(b)	樹林帯 (4.2km²)	高山帯 (14.0 km²)
GCPあり	1.218	0.767
GCPなし	1.731	2.411

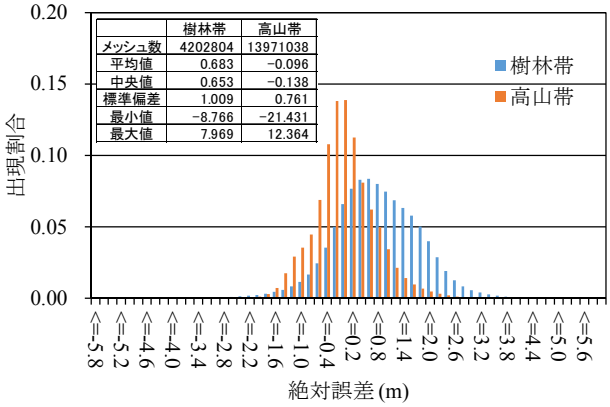

図-3 地表面のDEMの絶対誤差の分布

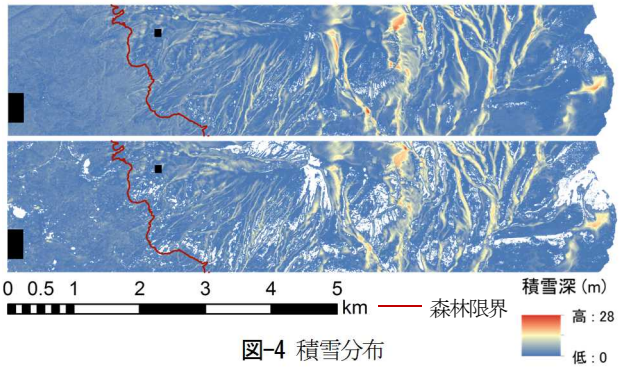

図-4 積雪分布
上: 航空レーザ測量，下: 人工衛星画像

(2) 積雪深

図-4に積雪深の分布を示す．図中の黒塗りの範囲は，旭岳温泉地区及び旭岳ロープウェイの施設周辺の検証から除外した範囲である（0.1km²）．対象範囲に占める積雪深がマイナスとなった面積（図の白抜きの範囲）の割合は，航空レーザ測量データから求めた積雪深が6.2%，人工衛星画像から求めた積雪深が11.7%であった．人工衛星画像から得られた積雪分布と航空レーザ測量データから得られた積雪分布を比較すると，樹林帯においては積雪深が小さく狭い範囲に分布しているのに対し，高山帯においては積雪深が幅広く分布し，尾根に沿って積雪の少ない箇所，谷に沿って積雪の多い箇所が分布しており，山間部における積雪分布の特徴[3]が捉えられている．

表-2に積雪深のRMSEを示す．表中の「Pan.」は積雪表面のDEMを作成する際にパンクロマチック画像を使用した範囲，「Multi.」はマルチスペクトル画像の赤バ

表-2 積雪深のRMSE (m)

(a)	全体 (15.3 km²)
GCPあり	1.321

(b)	樹林帯 (3.9km²)	高山帯 (11.4 km²)
GCPあり	1.410	1.289

(c)	樹林帯		高山帯	
	Pan. (3.8 km²)	Multi. (0.1 km²)	Pan. (8.0 km²)	Multi. (3.4 km²)
GCPあり	1.401	1.673	1.003	1.793

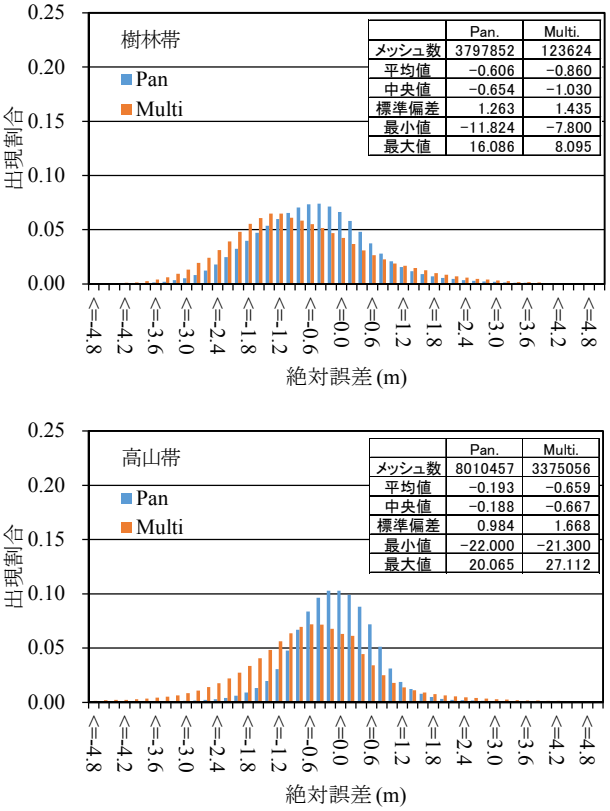

図-5 積雪深の絶対誤差の分布

ンドを使用した範囲である．表より，樹林帯と比較して高山帯において積雪深の計算精度が良いこと，マルチスペクトル画像を使用した範囲と比較してパンクロマチック画像を使用した範囲の積雪深の精度が良いことがわかる．**図-5**には**図-3**と同様に，絶対誤差を0.2m区間に区切り，**表-2**(c)に示した各区域の面積に対する，絶対誤差0.2m区間に含まれる面積の割合を示した．図より，全体的に積雪深が過小に計算される傾向があり，高山帯と比較して樹林帯の積雪深が過小に計算されている．しかし，パンクロマチック画像を使用した範囲においては，誤差の平均値が0に近く，標準偏差が比較的小さい．

(3) 地形と積雪深の関係

ここまでメッシュ単位で地表面のDEM及び積雪深の精度を示した．人工衛星画像を用いた場合，撮影できる範囲が広いため，ダム流域全域を一度に撮影できる可能性があるが，撮影できなかった範囲があった場合には，

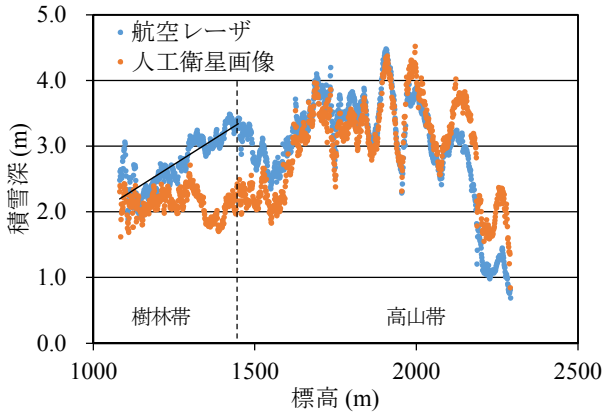

図-6 標高と積雪深の関係

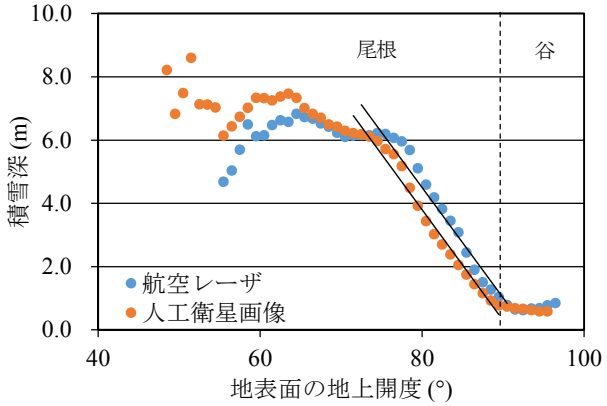

図-7 高山帯における地表面の地上開度と積雪深の関係

積雪深と地形との関係等を用いて，この範囲の積雪深を推定する必要が生じる．既往研究[3]によると，樹林帯においては標高と積雪深との間に線形の関係があること，高山帯においては地表面の地上開度と積雪深との間に線形の関係があることが示されていることから，人工衛星画像から計算した積雪深がこのような特徴を有しているかどうか検証する．ここで地上開度[11]とは，着目する地点が周辺に比べて地上に突き出ている程度及び地下に食い込んでいる程度を数量化したものであり，地表面のDEMから計算することができる．着目地点が谷の場合に地上開度は90°以下，尾根の場合に90°以上となる．なお，標高及び地上開度と積雪深との関係を示す際，航空レーザ測量データから計算した積雪深に対しては航空レーザ測量データから計算した標高及び地上開度を用い，人工衛星画像から計算した積雪深に対しては人工衛星画像から計算した標高及び地上開度をそれぞれ用いる．対象範囲の高山帯における地上開度は概ね40°～110°に分布し，75°～90°の出現頻度が高い．ここでは，全体的な傾向を捉えることに着目し，パンクロマチック画像を使用した範囲とマルチスペクトル画像を使用した範囲を区別しない．

図-6に標高と積雪深との関係を示す．図示した積雪深は標高1mの区間に含まれるメッシュの積雪深の平均値である．航空レーザ測量データから得られた結果には，樹林帯を対象とした線形回帰式（決定係数R^2 =0.73）を

併せて示す．図より，樹林帯や森林限界周辺の植生が遷移していると考えられる範囲において，人工衛星画像から計算した積雪深が過小となっており，標高が高くなるに伴い積雪深が大きくなる傾向が得られていない．一方で，高山帯においては，人工衛星画像から計算した積雪深が過大である標高帯があるものの，標高に対する積雪深の増減の傾向は概ね一致している．

図-7に高山帯における地表面の地上開度と積雪深との関係を示す．図示した積雪深は地上開度1°の区間に含まれるメッシュの積雪深の平均値である．図には，高山帯の面積に対して，地上開度を1°区間に区分した際の出現割合が1%を超える範囲を対象に作成した回帰直線を併せて示している．決定係数は人工衛星画像から得られた回帰式がR^2 =0.96，航空レーザ測量データから得られた回帰式がR^2 =0.98であった．図より，人工衛星画像から計算した積雪深は若干過小であるものの，地上開度の出現割合が大きい範囲において，地上開度と積雪深との間の線形の関係を良く捉えている．

(4) 積雪量

ダム流域のような山間部の水資源に焦点を当てた場合，積雪量が重要な指標の1つである．**表-3**に区域毎の積雪量を示す．人工衛星画像の欄の括弧内の数値は，航空レーザ測量から求めた積雪量との相対誤差である．全体的に人工衛星画像から計算した積雪量が過小である．樹林帯と比較して高山帯における精度が高く，マルチスペクトル画像を使用した範囲と比較してパンクロマチック画像を使用した範囲の精度が高い．

5．考察

(1) 地表面のDEMと積雪表面のDEMの精度

本研究では，人工衛星画像から作成した積雪表面のDEMと地表面のDEMの差分として積雪深を算出しているが，積雪表面のDEMと地表面のDEMの精度は異なると考えられる．パンクロマチック画像が適用された範囲を対象に，地表面のDEMの精度と積雪表面のDEMの精度[9]をRMSEで比較すると，地表面のDEMの樹林帯が1.218，高山帯が0.797，積雪表面のDEMの樹林帯が1.486，高山帯が0.804であり，RMSEに関しては積雪表面のDEMと地表面のDEMとの間に大きな差は見られなかった．しかし，地表面のDEMの精度と積雪表面のDEMの精度[9]を絶対誤差の平均値で比較すると，地表面のDEMの樹林帯が0.683，高山帯が-0.096，積雪表面のDEMの樹林帯が-0.049，高山帯が-0.220であり，地表面のDEMの樹林帯及び積雪表面のDEMの高山帯については，誤差に偏りが見られた．これは，樹林帯においては地表面を過大に計算する傾向，高山帯においては積雪表面を過小に計算する傾向があることを示している．樹林帯において地表面を過大に計算する傾向は，無雪期に，人工衛星画像において色の違いにより地表面から除去すべき樹木を特定できないこと（積雪ピーク期には下層植生が完全に積雪下に埋没しているため，色の違いにより積雪表面から除去すべき樹木を抽出することができる），下層植生下にある地表面を判読することが困難であることが一因と考えられる．また，影響の程度を定量的に示すことは困難であるが，人工衛星画像を撮影した範囲の北西側に1ヶ所しかGCPを設けられなかったことも誤差の偏りに影響している可能性がある．現状では，**表-1**に示したようにGCPの設置が必須であると考えられるが，山間部のダム流域は立ち入りが困難な範囲が多く，特に，冬期にGCPを設置できない場合が予想される．このため，GCPを必要とせずに精度の高いDEMを作成することが可能となれば，ダム流域のような山間部を対象に本手法の適用が進むと考えられる．

なお，詳細は割愛するが，積雪表面のDEMを作成した際にマルチスペクトル画像を使用した範囲の積雪深は，誤差が大きく，偏りが見られる[9]．

表-3 積雪量 ($10^6 \times m^3$)

(a)	全体
航空レーザ	53.91
人工衛星画像	46.73 (-13.3%)

(b)	樹林帯	高山帯
航空レーザ	11.13	42.77
人工衛星画像	8.44 (-24.1%)	38.29 (-10.5%)

(c)	樹林帯		高山帯	
	Pan.	Multi.	Pan.	Multi.
航空レーザ	10.73	0.40	22.61	20.16
人工衛星画像	8.17 (-23.9%)	0.28 (-30.5%)	20.92 (-7.5%)	17.37 (-13.8%)

(2) 積雪深の精度

積雪深の精度をRMSEで評価すると，高山帯においてパンクロマチック画像を使用した範囲の精度が最も高く，その他の範囲は概ね同等である．また，絶対誤差の平均値は，全体的に負の値となっており，高山帯においてパンクロマチック画像を使用した範囲の偏りが小さく，その他の範囲は偏りが大きい．絶対誤差の平均値が全体的に負となっているのは，積雪表面のDEM及び地表面のDEMに，積雪深を過小に計算することにつながる誤差の偏りが見られることが要因と考えられる．また，高山帯においては，樹木がほとんどなく地表面や積雪表面を容易に捉えることができること，パンクロマチック画像から作成したDEMの精度が高いことから，高山帯においてパンクロマチック画像を使用した範囲の積雪深の計算精度が高くなったと考えられる．

なお，本研究では，積雪深を算出する際に人工衛星画像から作成した地表面のDEMを使用したが，近年，国

土地理院により，航空レーザ測量データを基に作成した地表面のDEM（水平解像度5m）がWebで公開され，広く普及している．このような地表面のDEMが整備されている地域においては，積雪表面のDEMのみを人工衛星画像から作成し，積雪深を算出することも可能である．国土地理院が公開しているDEMと水平解像度が異なるが，本研究で用いた人工衛星画像から作成した積雪表面のDEMと航空レーザ測量から作成した地表面のDEMを用いて積雪深を計算した場合，人工衛星画像から作成した地表面のDEMを用いた場合と比較して，積雪深の計算精度が高いことが報告されている[9]．

(3) 地形と積雪深の関係

樹林帯においては標高と積雪深との間に線形の関係があることが報告されているが，人工衛星画像から計算した積雪深には，このような関係が見られなかった．これは，樹林帯において，積雪深が過小に計算されたことが要因と考えられる．一方で，高山帯においては，既往研究で報告されているような，地上開度と積雪深の線形の関係が見られる．これは，高山帯において，パンクロマチック画像を使用した範囲の積雪深の計算精度が高いことが要因と考えられる．

(4) 積雪量

対象範囲における積雪量は，積雪深の計算精度を反映し，全体的に過小である．しかし，高山帯において，パンクロマチック画像を使用した範囲は，相対誤差が10%を下回っている．また，マルチスペクトル画像を使用した範囲を含め，高山帯全域を対象とした場合でも，相対誤差は10%程度に留まっている．

6．まとめ

本研究では，北海道旭岳付近の積雪ピーク期を対象とし，2時期の人工衛星画像から作成したDEMの差分として求めた積雪分布の精度を，2時期の航空レーザ測量データから作成したDEMの差分として求めた積雪分布を用いて検証した．

樹林帯においては，積雪深が過小に計算され，山間部における積雪分布の特徴を有しておらず，DEMの精度向上が必要であることがわかった．一方で，高山帯については，比較的高い精度で積雪深や積雪量を計算でき，山間部における積雪分布の特徴を有していることがわかった．人工衛星画像をダム流域におけるピーク期の積雪状況の把握に活用できる可能性を示すとともに，今後の課題を示すことができたと考えている．

既往文献[9]において検証した内容を含め，現時点で，人工衛星画像から作成したDEMを用いて山間部の積雪深を算出する際に考慮すべき事項を以下に列挙する．

- 1点であってもGCPを設ける
- 樹木がほとんどない範囲（高山帯や広い空地）を対象とする
- 積雪期の人工衛星画像の撮影の際は，積雪表面からの反射によりピクセルの画素値が飽和しないように注意する
- 航空レーザ測量データから作成した地表面のDEMが存在する場合は，この使用を検討する

謝辞：GCPは大雪山白樺荘及び旭岳ロープウェイの敷地に設定した．AW3Dの作成について，リモート・センシング技術センター及びNTTデータの協力を受けた．無雪期の航空レーザ測量による地表面のDEMは国土交通省から提供を受けた．ここに記して謝意を表す．

参考文献

1) (独) 土木研究所寒地土木研究所: ダムにおける積雪包蔵水量推定ガイドライン(案), 2012.
2) 秋山一弥, 花岡正明, 佐野寿聰: 航空レーザ測量を用いた山地積雪深の計測と積雪深分布の地形的特徴, 日本雪工学会誌, Vol.25, No.3, pp.3-11, 2009.
3) 西原照雅, 谷瀬敦: 航空レーザ測量を用いた風衝斜面及び風背斜面における積雪分布の分析, 土木学会論文集, B1(水工学) Vol.74, No.4, I_883-I_888, 2018.
4) 小花和宏之, 河島克久, 松元高峰, 伊豫部勉, 大前宏和: 小型UAVを用いた積雪分布の3次元計測, 雪氷, 78巻, 5号, pp.317-328, 2016.
5) 松山洋, 泉岳樹: 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－, 財団法人国土地理協会平成27年度学術研究助成研究成果報告書, 2016.
6) 内山庄一郎, 鈴木比奈子, 上石勲, 中村一樹: 雪崩災害調査へのUAV-SfMの適用: 2017年那須町雪崩災害の事例, 自然災害科学, Vol.37, 特別号, pp.119-135, 2018.
7) 筒井健, 市川真弓, 高久淳一: AW3D®全世界デジタル3D地図提供サービスの展開－「見る3D地図」から「使える3D地図」へ－, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.36, No.5, pp.515-522, 2016.
8) Marti, R., Gascoin, S., Berthir, E., de Pinel, M., Houet, T. and Laffly, D.: Mapping snow depth in open alpine terrain from stereo satellite imagery, The Cryosphere, 10, pp.1361-1380, 2016.
9) 西原照雅, 谷瀬敦: 航空レーザ測量データを用いた人工衛星画像から求めた積雪深分布の精度検証, 日本リモートセンシング学会第65回学術講演会論文集, pp.135-138, 2018.
10) Farinotti, D., Magnusson, M., Huss, M. and Baudar, A.; Snow accumulation distribution inferred from time-lapse photography and simple modeling, Hydrol. Processes, 24, pp.2087-2097, 2010.
11) 横山隆三, 白沢道生, 菊池祐: 開度による地形特徴の表示, 写真測量とリモートセンシング, 第38巻4号, pp.26-34, 1999.

(2019. 4. 2受付)