

人工衛星画像を融雪期のダム管理に活用する可能性

A possibility to utilize satellite images for dam operation during snowmelt season

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 ○正 員 西原照雅 (Terumasa Nishihara)
正 員 谷瀬 敦 (Atsushi Tanise)

1. はじめに

積雪寒冷地においては、融雪水をダムに貯留して夏にかけての水需要をまなかつている。さらに、融雪水は融雪出水及び土砂災害の原因となる。このため、融雪期が始まる前に山間部の積雪の状況をできるだけ正確に把握し、融雪期において流域の積雪の状況の変化を追跡することは、水資源管理及び融雪期における防災の両面で非常に重要である。

現在のダム管理の現場においては、テレメーターにより積雪深を連続観測すること、毎年3月に積雪調査を行い、流域の積雪包蔵水量（積雪相当水量の流域における合計）を推定することが行われている。このうち、積雪深の連続観測については、ダム管理所地点において行われている場合がほとんどである。ダム管理所地点は、ダム流域内における標高が低い地点であり、融雪初期に消雪を迎える。このため、融雪期におけるダム流域の積雪の状況を把握できるデータとは言い難い。また、いくつかのダムにおいては、ダム管理所地点に加え、流域内の比較的標高が高い地点において積雪深を連続観測しているが、特定の地点におけるデータであるため、ダム流域における積雪の状況を面で把握することは困難である。一方、毎年3月に積雪調査を行い、流域の積雪状況を面的に推定しているものの、調査は3月にのみ行われており、融雪期における積雪の状況は把握されていない。また、積雪調査は調査者が入山して行うため、雪崩等の危険を伴うことから、調査地点が限られ、積雪の状況の推定精度には限界がある。

近年、衛星リモートセンシング技術が向上し、高分解能、高頻度、高鮮度な情報取得が可能となっており、人工衛星により得られた情報は、研究利用に加え、地図の作成、気象予報、災害時における被災状況の把握といった様々な分野への活用が進んでいる。人工衛星による地球観測の長所として、山間部等の立ち入りが困難な範囲を観測できること、広範囲を一度に捉え、長期にわたり観測ができることが挙げられる。人工衛星を用いた積雪の状況の推定に関しては、全球スケールから地域スケールまで、多数の研究が行われているが、国内の山間部を対象とした例として、高橋ら¹⁾、風間ら²⁾、陸ら³⁾、島村ら⁴⁾、朝岡ら⁵⁾が挙げられる。高橋らは、LANDSAT データから得られた流域の積雪面積率と流域において観測されている水文情報から求めた積雪水量との間の関係を用いて、LANDSAT データが得られた時点における積雪水量の推定を可能とした¹⁾。風間らは、NOAA 衛星画像から得られた積雪図を用い、雪線からの高度差を情報

として積雪深の分布を調査し、東北地方の積雪水資源量の推定を試み、積雪量としては妥当な結果が得られたことを報告している²⁾。陸らは、新潟県魚野川流域を対象に、分布型流出モデルを用いて降雪・融雪のシミュレーションを行う際、シミュレーションにより計算される積雪面積分布が LANDSAT 衛星による積雪面積情報に一致するようにパラメータを設定している³⁾。島村らは、LANDSAT 画像から積雪域を抽出し、抽出された積雪域の標高をスノーサーベイ結果より求めた積雪相当水量の高度分布式に当てはめ、新潟県巻機山の積雪水資源量を推定している⁴⁾。朝岡らは、Degree-day 法を用いて融雪量を推定する際、衛星データ SPOT/VEGETATION から積雪域を抽出し、衛星から求めた消雪日と積雪モデルから推定された積雪水量が0となる日が一致するように融雪係数を最適化し、積雪水量及び積雪期間を良好な精度で再現できたことを報告している⁵⁾。これらの研究を概観すると、衛星画像は、直接用いるのではなく、ある範囲の積雪量を算出する際にその範囲における積雪の有無を判定することや、シミュレーションを行う際に使用するモデルの係数を決定するために使用されている。

一方、主に民俗学の分野に属しており、自然科学的な視点からの研究はほとんどないが、日本の積雪寒冷地では、古くから、農事の開始時期といった季節の進行を把握するための指標として「雪形」が用いられてきた⁶⁾。雪形は、融雪が進み、積雪域が山岳部だけになる頃、山の斜面に残雪の白い部分と山の地肌の黒い部分が作り出す白黒のパターンであり、地域によっては、雪形を「種まき爺さん」、「川の字」といった人、動物、文字などの形に見立てられている⁶⁾。雪形は毎年、同じ場所に現れるが、その出現時期は毎年異なる。これは、出現時期が毎年の積雪量と融雪の速さに支配されるためであり、このことから、雪形は冬と春の情報を併せた総合的な指標となり得ることが考えられる⁶⁾。

融雪期におけるダム管理の現場では、簡易にかつ低コストでダム流域における積雪の状況を把握する手法が求められている。融雪期に人工衛星からダム流域を撮影した画像を追跡すると、積雪の面積が小さくなるのに合わせて、雪形のような決まったパターンが毎年現れることが想定される。このことから、融雪初期から消雪までに出現する雪面の形状のパターンを事前に把握しておくことにより、ダム流域を撮影した衛星画像を目視するだけで、流域の融雪の状況を把握できる可能性がある。本研究では、このような視点から融雪期のダム管理に人工衛星画像を活用する可能性について検討した。

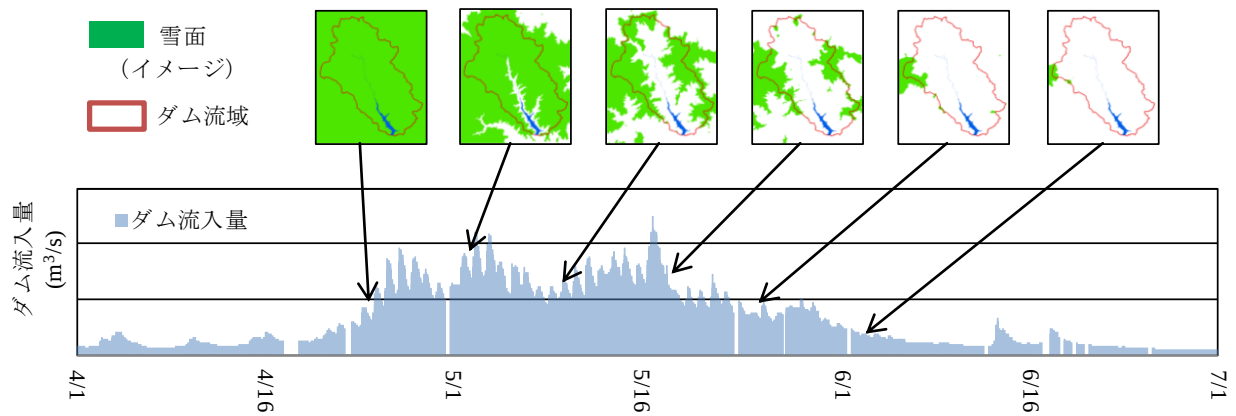


図-1 融雪期において衛星画像上の雪面が変化するイメージ

表-1 有償で画像を入手できる主な人工衛星 (光学)

	RapidEye	WorldView-2	WorldView-3	Pleiades (1A,1B)	SPOT (6,7)
解像度 (カラー)	6.5m	1.85m	1.24m	2m	6m
観測幅	77km	16.4km	13.1km	20km	60km
回帰日数	5.5 日	3.7 日	4.5 日	26 日	26 日
運用国	アメリカ	アメリカ	アメリカ	フランス	フランス

表-2 無償で画像を入手できる主な人工衛星 (光学)

	Landsat-8	Aster (Terra)	Sentinel-2A	MODIS (Terra, Aqua)
解像度 (カラー)	30m	15m	10m	250m
観測幅	185km	60km	290km	2,320km
回帰日数	16 日	16 日	10 日	毎日
運用国	アメリカ	アメリカ	ヨーロッパ	アメリカ

2. 雪面変化のイメージ

融雪期において、衛星画像上の雪面が変化していくイメージを図-1 に示す。図の上段に衛星画像のイメージ図を示しているが、融雪開始時はダム流域全体が雪に覆われた状態である。その後、融雪が進むに伴い、局部的に消雪となる箇所や積雪が残る箇所があるものの、図のイメージのように、標高が高い範囲に向かい、雪線が後退し、雪面が減少していくと考えられる。この際、毎年、雪形のように概ね決まった形状が現れ、融雪の進捗とともに、形状が変化していくと考えられる。決まった形状が現れる時期及び形状の変化の度合いは、毎年の積雪状況や融雪の速度を反映し、毎年異なると考えられるが、融雪期におけるダム流入量の典型的な変動等との関係をあらかじめ把握しておくことで、雪面の形状がダム流域における融雪の進捗を把握するための指標となり得ると考えられる。

3. 使用する人工衛星の検討

世界各国が多数の人工衛星を打ち上げており、多くの衛星画像を入手することが可能であるが、融雪期におけるダム管理に衛星画像を活用する場合、対象とするダム流域全体が、雲の無い状態で、雪面の形状を把握できる解像度で、定期的に撮影されている必要がある。有償で

画像を入手できる人工衛星及び無償で画像を入手できる人工衛星に分け、現在運用されている代表的な人工衛星を表-1 及び表-2 に示す。表を概観すると、人工衛星の回帰日数は数日から1カ月弱まで幅広く分布している。また、解像度及び観測幅を見ると、有償で画像を入手できる人工衛星は、解像度が高く観測幅が狭い傾向があり、無償で画像を入手できる人工衛星は、解像度が低く観測幅が広い傾向がある。

2 章で述べたように、本手法により、衛星画像を融雪期のダム管理に活用する場合は、融雪期に衛星画像に現れる雪面の形状とダム流入量等との関係をあらかじめ把握しておく必要があり、このような分析に当たっては、雪面の形状を明瞭に把握できる、高解像度の画像を使用することが望ましい。加えて、衛星画像から雪面を抽出する際、複数の観測バンドによる画像を用いて、バンド間演算を行うことにより抽出が容易になるため、複数のバンドにより撮影された画像を入手することが望ましい。このため、有償で画像を入手できる人工衛星が有利と想定されるが、北海道において国が管理しているダムの流域は、東西もしくは南北の幅が数10kmであるダムがあり、有償で画像を入手できる人工衛星では、1度の撮影でダム流域全域を撮影しきれない可能性がある。

一方、ダム管理の現場で衛星画像を活用する場合は、

表-3 有償で可像を入手できる人工衛星画像の撮影状況（定山溪ダム）

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
RapidEye	0(0)	0(0)	0(0)	0(4)	0(0)	1(3)	1(2)	1(2)	2(9)	3(9)
WorldView GeoEye	0(0)	0(1)	0(1)	1(3)	1(3)	1(5)	1(3)	1(1)	1(4)	1(1)
Pleiades SPOT	1(1)	0(0)	2(2)	0(1)	1(1)	1(3)	2(4)	0(0)	4(11)	4(10)
計	1(1)	0(1)	2(3)	1(8)	2(4)	3(11)	4(9)	2(3)	7(23)	8(20)

表-4 有償で可像を入手できる人工衛星画像の撮影状況（定山溪ダム・2016年）

	4-1	4-2	4-3	4-4	5-1	5-2	5-3	5-4	6-1	6-2	6-3	6-4
RapidEye	1(3)	0(0)	0(0)	1(3)	0(0)	1(2)	0(0)	0(0)	0(1)	0(0)	0(0)	0(0)
WorldView GeoEye	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	1(1)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
Pleiades SPOT	1(1)	0(0)	1(2)	1(2)	0(0)	0(0)	0(1)	0(1)	0(0)	0(1)	1(1)	0(1)
計	2(4)	0(0)	1(2)	2(5)	0(0)	1(2)	0(1)	1(2)	0(1)	0(1)	1(1)	0(1)

雪面の形状を概ね認識できれば画像の解像度が多少低くてもよく、1度の撮影でダム流域全域が撮影されていることが重要と考えられる。加えて、無償で容易に画像を入手できることが重要と考えられる。以上より、表-1に示した有償で画像を入手できる人工衛星を雪面の分析に用いること、表-2に示した無償で画像を入手できる人工衛星をダム管理の現場において活用することを想定し、人工衛星によるダム流域の撮影状況を調査した。

4. 有償で画像を入手できる人工衛星の撮影状況

有償で画像を入手できる人工衛星は観測幅が狭いため、札幌市近郊の定山溪ダムを対象として、流域全体が含まれる画像の撮影状況を調査した。加えて、雪面の分析に用いる場合を想定し、ダム流域上空に雲が無いことを条件として衛星画像を抽出した。また、汎用性の高い雪面の形状を捉えるには複数年の画像を分析する必要があると考え、2007年～2016年の10融雪期（4月～10月）を対象とした。結果を表-3に示す。表の数値はダム流域全体が撮影されている画像の中から、ダム流域上空に雲が無いことを条件として抽出した画像の数を示し、()内にダム流域全体を撮影した画像の数を示す。表を概観すると、2007年～2014年までは、どの衛星も定山溪ダム流域の撮影回数自体が少なく、融雪期における流域の雪面の変化を追跡することは困難である。しかし、2015年及び2016年は、衛星による差はあるものの、ダム流域全体が撮影された回数が多くなり、このうち、30～40%の画像は雲がない状況において撮影されている。融雪期においてダム流域における雪面の変化を追跡する場合、1週間程度の間隔で、定期的に画像を得られることが望ましい。このため、撮影された画像の数が多い2016年を例として週単位の撮影状況をまとめ、表-4に示す。表中の標記「4-1」は「4月第1週」を示している。複数の衛星による撮影の全数を見ると、概ね1週間に1度は撮影がなされている。しかし、雲が無いことを条件とすると、撮影頻度は2週間に一度程度となる。

5. 無償で画像を入手できる人工衛星の撮影状況

画像を無償で入手できる人工衛星は撮影幅が広いため、北海道内の国が管理しているダムを対象に、2016年4月から6月の撮影実績を検索した。

結果を図-2に示す。地図上の着色した範囲は国が管理しているダムの流域を示し、衛星による撮影範囲を枠線で示している。はじめにLandsat-8を見ると、3つの軌道上の決められた位置において16日おきに撮影が実施されており、このうち、2つの軌道により全ダム流域がカバーされている。加えて、概ね日高山脈を境に東西の2箇所において2つの軌道による撮影範囲が重複している。次に、Asterを見ると、公称の回帰日数は16日であるものの、決められた位置において定期的な撮影がなされておらず、撮影幅が狭い。続いて、Sentinel-2Aを見ると、2つの軌道上の決められた位置において10日おきに撮影が実施されており、このうち、1つの軌道により全ダム流域がカバーされている。加えて、北海道の中央部において2つの軌道による撮影範囲が重複している。なお、2016年5月11日頃に若干軌道が変更されており、その前後において撮影範囲が若干異なっている。最後に、MODISを見ると、決められた位置において毎日撮影がなされており、1回の撮影により全ダムの流域がカバーされている。ただし、MODISは他の3衛星の画像と比較して、解像度が低い欠点がある。

このような結果から、Landsat-8及びSentinel-2Aを主力として用い、Aster及びMODISを補助として用いることができると考えられる。Landsat-8及びSentinel-2Aによる撮影頻度の例を挙げると、札幌市近郊の定山溪ダムは概ね1～2週間に一度、豊平峡ダムは概ね1週間に一度、北海道のほぼ中央に位置する忠別ダムは概ね1週間に一度である。前述したように、複数の軌道から範囲が重複するように撮影がなされていることから、重複する範囲にダムの流域が位置している場合に撮影回数が多くなっている。

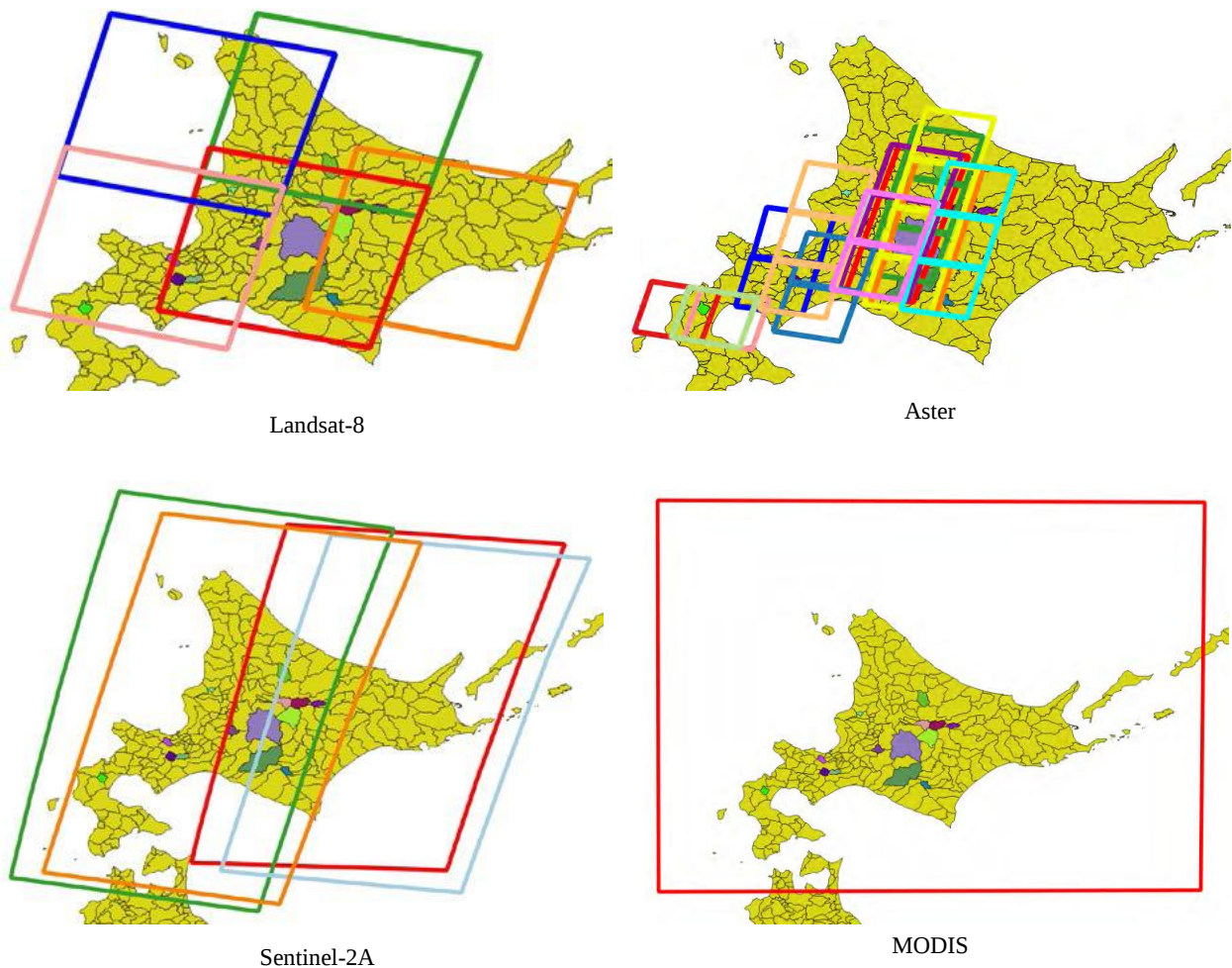


図-2 人工衛星による撮影範囲 (2016 年融雪期)

6. まとめ

本研究では、融雪期におけるダム管理に人工衛星画像を活用する可能性について検討した。北海道において国が管理しているダム流域の融雪期における人工衛星による撮影状況を調査したところ、複数の人工衛星により撮影された画像を併用することにより、概ね1週間に一度の撮影が行われており、撮影された画像から雪面の形状を追跡し、ダム管理に活用できる可能性があることが分かった。しかし、雲の影響を考慮すると、雪面の形状の分析等に使用できる画像の数が少なくなることから、今後、雪面の形状とダム流入量等との関係を分析していくに当たっては、雲の影響により把握できなかった雪面の形状及びその変化を時空間的にどのように補間するかが課題になると考えられる。また、今後も多数の人工衛星が打ち上げられる計画があることから、より高頻度で画像を入手できるようになる可能性もある。このような状況を注視しつつ、検討を進めていく。

謝辞： 本論文をまとめるにあたり、一般社団法人リモートセンシング技術センターに協力頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 高橋裕, 武田要, 森菌繁光, 小池俊雄: LANDSAT積雪面積情報の利用による流域積雪水量推定に関する研究, 第26回水理講演会論文集, pp.171-176, 1982.
- 2) 風間聡, 沢本正樹: 衛星データを用いた東北地方の積雪水資源量推定, 水工学論文集, 第38巻, pp.107-112, 1994.
- 3) 陸旻皎, 早川典生, 吉岡喜浩: 衛星積雪面積情報と分布型融雪流出モデルを用いた広域降雪特性抽出の試み, 水工学論文集, 第41巻, pp.239-244, 1997.
- 4) 島村雄一, 泉岳樹, 松山洋: 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, 第18巻4号, pp.411-423, 2005.
- 5) 朝岡良浩, 小南裕志, 竹内由香里, 大丸裕武, 田中信行: 衛星観測に基づく積雪水量の広域推定と融雪係数の地域特性, 水文・水資源学会誌, 第20巻6号, pp.519-529, 2007.
- 6) 納口恭明, 和泉薫, 遠藤八十一, 河島克久, 小林俊一: 雪形って知ってますか?, 可視化情報学会誌, Vol.25, No. supplement 2, pp.121-122, 2005.