

積雪・融雪状況に適応した 寒冷地ダムの流水管理について

- 積雪重量計を用いた積雪密度の連続観測 -

(独) 土木研究所寒地土木研究所 道央支所 数馬田 貢
(独) 土木研究所寒地土木研究所 水環境保全チーム 西原 照雅

ダム管理所では、融雪前に積雪調査を行うことにより、ダム流域内の積雪包蔵水量を推定し、融雪出水の貯留および利水容量の確保に努めているところであるが、当該調査は雪崩などの危険が伴う上、多大な労力を要する作業となるため、融雪期を通しての調査は不可能となっている。一方、定山溪ダム流域内の気象観測露場では積雪状態の遠隔監視等を目的に、積雪重量計、ライシメータの他、諸々の気象観測機器を設置し、2005年12月から各種データを記録している。これらの観測データは毎正時に転送することにより、入山することなく、かつ融雪期を通じた積雪包蔵水量および雪質の経時的な観測を可能にしている。本報告はこれらのデータを分析し、ダム管理に有用な部分を報告するものである。

キーワード：積雪重量計、積雪包蔵水量、融雪熱量、積雪底面流出量、ダム管理

まえがき

積雪寒冷地の多目的ダムでは、冬季に積もった山間部の雪が春の訪れとともに融け出す「融雪出水」による河川の氾濫を防ぐため、予めダム流域内の積雪包蔵水量を推定した上で、融雪が始まる前に貯水位を下げ、融雪水を貯留すべく必要な空き容量を確保すると同時に、融雪水を貯留し利水容量の確保に努めている。ダム流域内には積雪量を把握する目的で積雪深計を設置し、その年の雪の量を把握しようとしているが、積雪深だけでは積雪密度まで判らないので、ダム流域内の積雪包蔵水量を算出することができない。そこで、融雪前にダム流域内の数カ所に設定された定点において積雪調査を行って積雪密度を実測し、積雪包蔵水量を算出している。

しかしながら、積雪調査は厳冬期に入山するため、雪崩や天候の急変などにより冬山における遭難の危険が高い。また、林道は除雪されていないので、雪上車やスノーモービルでの移動となり、更に林道から外れた斜面は、調査機材を背負って、橇(かんじき)やスキーでの移動となるため、多大な時間と労力を要する作業となる。以上から積雪調査は、安全面、費用、所要時間、労力等の面から融雪期間中の継続的な実施が不可能であり、融雪期前の2月下旬～3月上旬に年1回の調査となっている。

このため、積雪調査後の3月中旬～融雪終了までの間の降水量(雪や雨)は過去の平均値を用いるなどして必要なダムの空き容量を算出しているため、この時期に降水量が多いと空き容量不足となるばかりか、逆に降水量が少ない場合には利水容量不足を招くことにもなる。

また、ダム管理所職員は、融雪が始まると日々の気象予報やダム流入量および貯水位の変化を注視し、それらがダム操作規則の基準に達すると、警戒体制の執行および警報、ゲート操作など、一連の作業を遅滞なく実施しなければならない。しかし、融雪出水はその発生時期の予測が困難であるため、夏期の出水とは異なり、事前の準備ができず、短時間で体制を整える必要が生じる。

通常の融雪は、気温の上昇等に伴って積雪表面で発生した融雪水および降雨が積雪内部を流下(積雪内浸透)して地表に達した後、地表を流下あるいは地中に浸透するなどして河川あるいはダム貯水池内に流出するという過程を経る。融雪初期のうち、融雪水および降雨は積雪内部に浸透するものの、積雪内部に貯留され、地表に流出するに至らない状態で一定期間を経る。融雪が進むに伴い、積雪内部の浸透速度が徐々に早くなってきて、融雪水および降雨は更に雪を融かしながら地表に流出して、ダム流入量が急増する事態に至るのである。つまり、融雪期に入ってから経時的な雪質の変化を観測することで、融雪水および降雨が地表に染み出やすい雪質にどれだけ近づいているのかが把握できることになる。

一方、定山溪ダム流域内の気象観測露場では、2005年12月から2011年5月までの6年間、積雪重量、積雪底面流出量、長短波放射量、積雪表面温度、その他気象諸量の観測、積雪断面調査を実施してきており、積雪期、及び融雪期における様々なデータが蓄積されている¹⁾²⁾³⁾。

そこで、これらのデータを分析してみたところ、こうした積雪包蔵水量推定に関する問題(経時的な観測の必要性)や、融雪開始(ダム流入量が増加してくる)時期

の把握（雪質の変化の把握）に関して、融雪期のダム管理に有用な傾向を掴むことができた。

本研究では、融雪期における、より適応性が高く、余裕を持った効率的なダム管理、更にダム管理職員の負担低減につながればと願い、ここに報告するものである。

1. 観測概要

本章では定山溪ダム観測露場における過去6年間の積雪観測および気象観測の概要を述べる。

(1) 観測場所

定山溪ダムは札幌市南部に位置し、一級河川石狩川水系小樽内川に建設された、流域面積 104km² の多目的ダムである。観測露場 (EL=400m) は図-1 に示す定山溪ダム流域内の1カ所で、ダム堤頂 (EL=392.4m) とほぼ同標高となる貯水池上流端付近である。流域の周囲は 900m ~ 1300m 程度の尾根となっており、観測露場は流域内の底部にあたる。

(2) 観測項目

観測露場における観測項目は表-1 に示すもののほか、雪質の把握を目的に積雪断面調査を行っている。また、観測機器の配置は図-2 に示すとおりである。

観測期間は2005年から2011年までの冬期間に行われ、毎年、積雪が観測され始める12月から融雪が完了する翌年の5月にかけて、1時間毎のデータを記録している¹⁾²⁾³⁾。

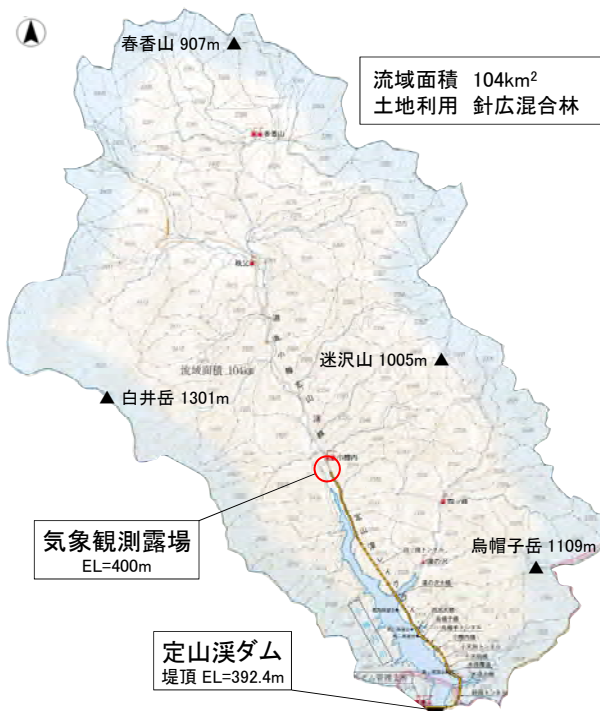


図-1 定山溪ダム流域図

(3) 融雪熱量

本研究では、先に述べた観測項目のほかに、積雪した雪の表面の融け易さを示す指標として、融雪熱量⁴⁾を用いている。融雪熱量とは、気象学分野で用いられるもので、主に太陽の日差しが強くなったり、気温の上昇などに伴って上昇する値であり、融雪熱量が正の時には融雪、負の時には融雪水の再凍結を意味するものである。ちなみに、融雪熱量は、表-1の観測項目のうち、「降水量」から下の観測項目より求めることができる。

2. 積雪包蔵水量の推定

積雪寒冷地における多目的ダムの重要な役割のひとつに融雪出水の貯留がある。融雪出水を貯留するために必要な空き容量を確保し、利水容量として貯留する必要があるが、そのためにはダム流域内の積雪深と積雪密度を調査し、積雪包蔵水量を推定しなければならない。以下に、積雪包蔵水量を推定する上で、従来の積雪調査に比べ、積雪重量計による連続観測の優れている点を述べる。

(1) 積雪相当水量の算出

従来の積雪調査では、積雪深 (cm) と積雪密度 (g/cm³)

表-1 観測項目

観測項目	計測器名	単位
積雪重量	積雪重量計 (2基)	kg/m ²
積雪底面流出量	ライシメータ(2m×2m) + 転倒ます型流量計	mm/hr
降水量	雨雪量計	mm/hr
積雪深	積雪深計	cm
気温	温度計	
湿度	湿度計	%
風速	風速計	m/s
下向き短波放射量	長短波放射計	W/m ²
下向き長波放射量		W/m ²
上向き短波放射量		W/m ²
上向き長波放射量		W/m ²
積雪表面温度	放射温度計	

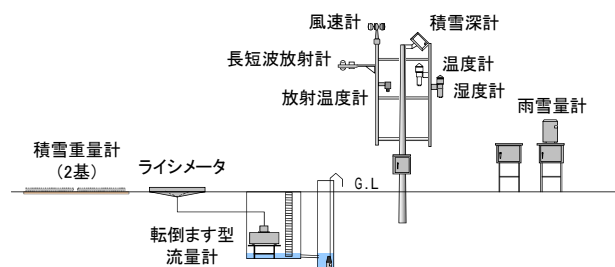


図-2 観測機器

を計測して調査地点における積雪相当水量 (mm) を算出している。

一方、積雪重量計では積雪地 1m² あたりの重量 (kg) を計測しているの、水の比重を 1g/cm³ とすると、積雪重量 (kg/m²) はそのまま積雪相当水量 (mm) に読み替えることができる。このため、感覚的にも容易に積雪相当水量を把握できる。

また、ダム流域内の積雪包蔵水量 (千 m³) を求める場合は、積雪相当水量 (mm) に流域面積 (km²) を乗じることで容易に算出することができ、貯水池運用計画策定にあたって、非常に使い易いものとなっている。

(2) 経時的な観測

従来の積雪包蔵水量の推定は、冒頭にも述べたとおり、年 1 回の積雪調査によって行われるため、調査時点における値のみで推定している。積雪調査後の降水量については、過去 10 カ年の平均値等を融雪完了までの降水量として積雪包蔵水量に加算し、貯水池運用計画 (空き容量および利水容量の確保、放流量の設定) を策定している。このため、実績の降水量が大きく異なると、積雪調査時点の積雪包蔵水量に誤差が生じてしまうのである。

一方、積雪重量計は遠隔監視であり、積雪開始直後から融雪完了直前までの積雪包蔵水量を経時的に把握できるので、積雪状況の変化に応じて貯水池運用計画を随時見直し、修正することが可能になるわけである。

(3) 実操作への適用例

では、積雪重量の連続観測から推定された積雪包蔵水量を用いた場合のダム操作は、従来の年 1 回の積雪調査のみの場合と比較して、どの様に改善されるのか。以下に、実際のダム管理に適用する場合のイメージを掴めるように、簡単な水収支を考えてみる。

図-3 は、定山溪ダム観測露場における 2008 年 (H20) の融雪期 (3 月 ~ 5 月) に観測された毎正時のデータであるが、ここでは、これをこの年の流域全体の平均的な挙動を示すものとして扱うものとする。なお、積雪重量については、積雪重量計 2 基の平均値を示している。また、図中の下向き矢印はその年の積雪調査を実施した日を示していて、2008 年は 3 月 11 日に実施している。

まず、2008 年の実際の貯水池運用を振り返ってみる。

定山溪ダムでは例年、融雪出水を貯留すべく空き容量の確保のため、3 月に入ると発電放流を最大限に増加して貯水位を低下させている。2008 年は少し早めの 2 月 20 日から、ダム流入量約 1m³/s に対して、発電放流はほぼ最大の約 8m³/s を放流 (605 千 m³/日の貯水量減少となる) し、3 月末までに発電最低水位まで貯水位を低下させている。3 月 11 日の積雪調査から推定された積雪相当水量は平年の約半分と、かなり少なかったが、この時点では放流量を絞ることなく、貯水位の低下を続けた。ところが、その後の降水量が少なかった上、3 月の気温が高めに経過したことで、早い時期に融雪が進んでしまい、気づいたときには、ダム流域内の融雪がほとんど終わってしまっていた。積雪寒冷地の多目的ダムでは、融雪出水を貯留すべく空き容量を確保しなければならないと同時に、利水容量も確保しなければならないという役割も持つ。つまり、融雪水を貯留して定められた水位 (確保水位) まで貯水位を上昇させなければならないのである。例年だと、4 月中旬から 5 月中旬は、融雪出水によってダム流入量が大きく増加するので、発電放流を最大限で行ってもダムの貯水位は急激に上昇を続け、確保水位を確保できるのだが、2008 年は、前述の事象により、この時期に流入量の増加が少なかったため、4 月 15 日から発電放流を 0 にして、確保水位を確保していた。

では、積雪重量の連続観測が可能な場合はどうだろうか。まずは実際と同様に 2 月 20 日から発電放流を最大限まで増やして貯水位を低下させていくとする。積雪重量を毎日観測していると、その後も積雪重量計の値は上昇することなく、3 月 20 日には 400kg/m² を割り込んできていることに気づく。この積雪重量 400kg/m² に流域面積 104km² を乗じて積雪包蔵水量 41,600 千 m³ が算出される。これは定山溪ダムの最大空き容量 48,400 千 m³ に対して 6,800 千 m³ の余裕があるのだが、実際の 3 月 20 日 9 時の貯水量 15,458 千 m³ を考慮すると、その後の降水量が無かった場合、このまま放流を続ける (605 千 m³/日の貯水量減少) と、あと半月ほどで利水容量を割り込むことがわかるので、早めに放流量を絞る判断が可能となる。

このように、積雪寒冷地におけるダムでは、ダム流域内の積雪重量を経時的に観測し、その動向によって貯水池運用計画を随時見直し、修正することが適正なダム管理を行う上で必要であるといえる。

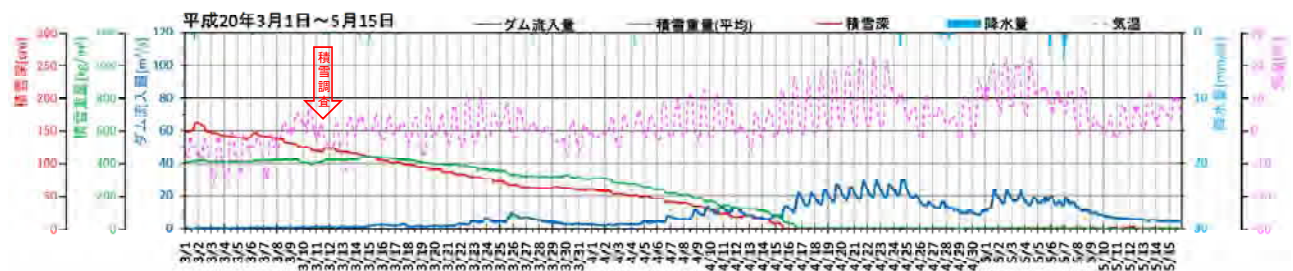


図-3 2010 年 (H20) の積雪重量計観測結果 (融雪期)

3. 融雪出水開始時期の予測

融雪出水が始まると、ダム貯水位は上昇を続け、やがて上限に達する。前章で算出した積雪包蔵水量が過大で、降水量もそれほど多くない場合は、ダム貯水位はゲート操作なしでも上限を超えないこともあるが、ダム貯水位が上限に近づき、気温の上昇とともに融雪が活発になったところ（以下、融雪最盛期という）に大雨が重なると、ほぼ間違いなくゲート操作に至る。

しかしながら、ゲート操作は人為的に下流河川の流量を増加させることになるため、放流設備の点検、警報や巡視、関係機関への通知、放流量の設定等、一連の作業を迅速に遅滞なく実施しなければならず、たとえ僅かな放流であってもダム管理所職員にとっては一大事である。特に融雪出水時の対応は本論文の冒頭でも述べたように、融雪最盛期となる時期の雪質の変化の把握が困難なので、夏期出水とは異なり、事前の準備ができず、短時間で体制を整える必要が生じる。こうした問題を解消するためには、融雪期の雪質の変化を把握し、融雪最盛期の発生時期を予測する必要がある。以下に、定山溪ダム観測露場の観測項目の内、ライシメータによって観測される「積雪底面流出量」と、長短波放射計等のデータを用いて算出される「融雪熱量」とを対比させることで、ダム流域内の雪質の変化を把握する方法を述べる。

(1) 観測結果の概要

図-4 に 2010 年（H22）の融雪期（融雪が始まった 4 月上旬から、融雪がほぼ終了した 5 月末まで）における、積雪底面流出量、融雪熱量、定山溪ダムの流入量、加えて降水量と積雪深の各データを示した。なお、各グラ

フの積雪底面流出量とダム流入量について日々の増減を見やすくするため、スケールを変えて表示している。また、図中の下向き矢印は積雪断面調査を実施した日を示している。

更に、融雪熱量と積雪底面流出量およびダム流入量との関係について詳細に分析するため、融雪初期として 4 月 4 日から 9 日まで、融雪最盛期として 5 月 2 日から 5 日までのそれぞれ降雨の影響が少ない日を検討対象期間として設定した。図-4 に当該期間を図示し、図-5~8 に融雪初期、図-9~12 に融雪最盛期における関連する図を示した。これらの図から読み取った内容を以下に列挙する。

a) ピークの時間差

図-5 および図-9 に融雪熱量のピークから積雪底面流出量のピークまでの時間差を下段に赤字で、融雪熱量のピークからダム流入量のピークまでの時間差を上段に青字で示した。なお、融雪熱量は日中に 2 回のピークを示す場合があるが、事象の初動を把握する目的から、1 回目のピークを対象とした。

融雪初期（図-5）における積雪底面流出量のピークは融雪熱量のピークから 3~6 時間遅れていることがわかる。また、ダム流入量については、まだそれ自体の量が小さいためピークをはっきりと確認するのは難しいが、融雪熱量のピークから 7~12 時間遅れで発生していることがわかる。

融雪最盛期（図-9）における積雪底面流出量のピークは融雪熱量のピークから 0 または 1 時間遅れで発生しており、融雪初期と比べて時間差が著しく短くなっていることがわかる。また、ダム流入量のピークは、融雪熱量

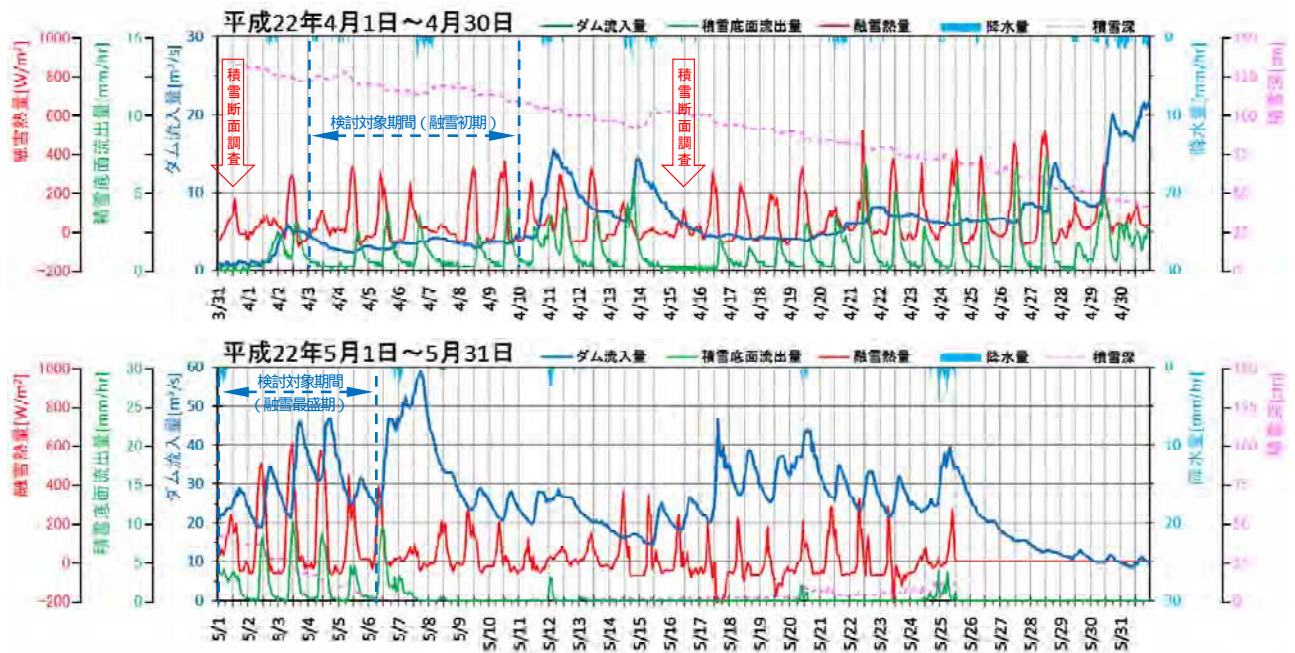


図-4 2010 年の積雪底面流出量と融雪熱量

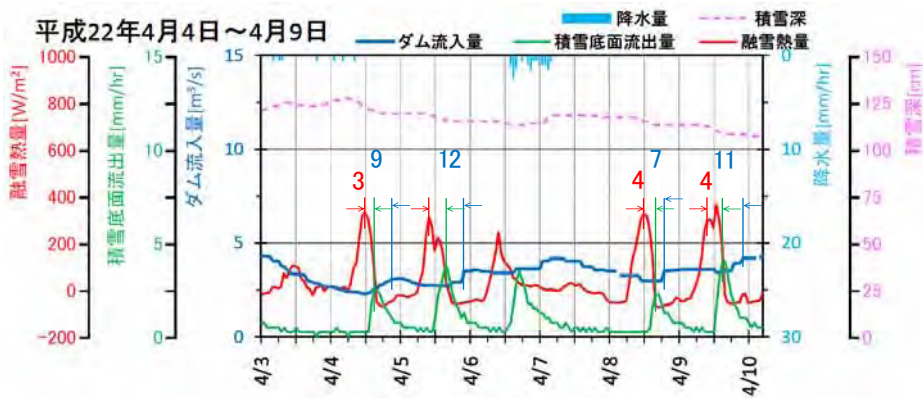


図-5 ピークの時間差（融雪初期）

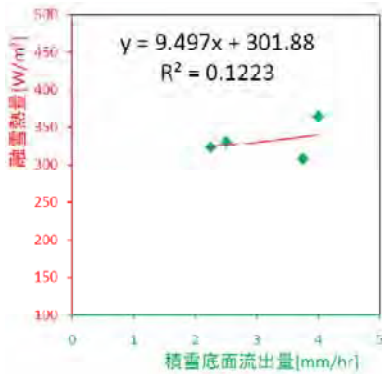


図-6 融雪熱量と積雪底面流出量
の関係（融雪初期）
（H22.4.4-4.9雨天日を除く）

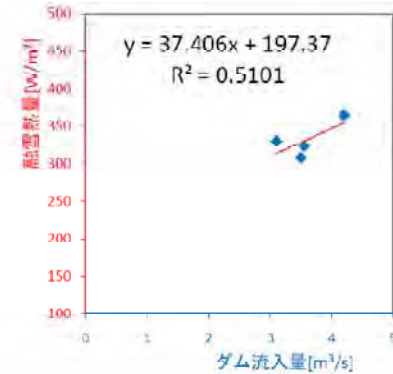


図-7 融雪熱量とダム流入量
の関係（融雪初期）
（H22.4.4-4.9雨天日を除く）

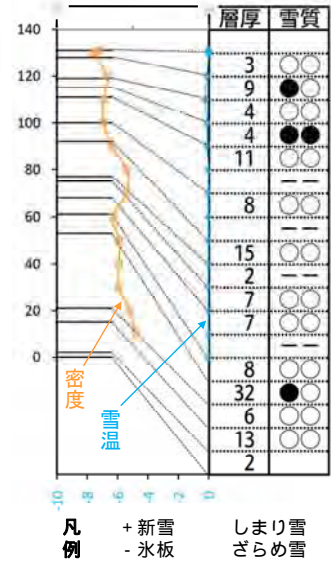


図-8 積雪断面（融雪初期）
（H22.3.31 調査）

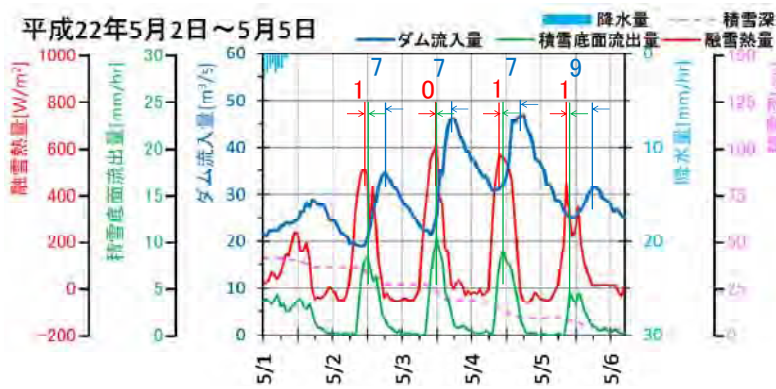


図-9 ピークの時間差（融雪最盛期）

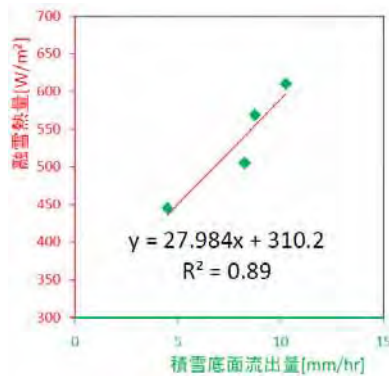


図-10 融雪熱量と積雪底面流出量
の関係（融雪最盛期）
（H22.5.2-5.5雨天日を除く）

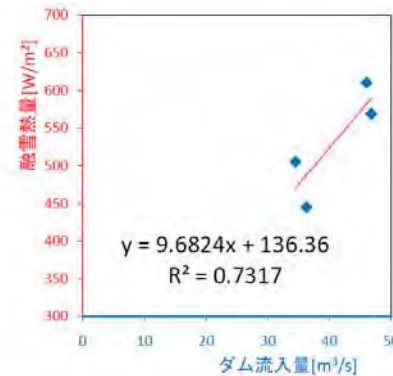


図-11 融雪熱量とダム流入量
の関係（融雪最盛期）
（H22.5.2-5.5雨天日を除く）

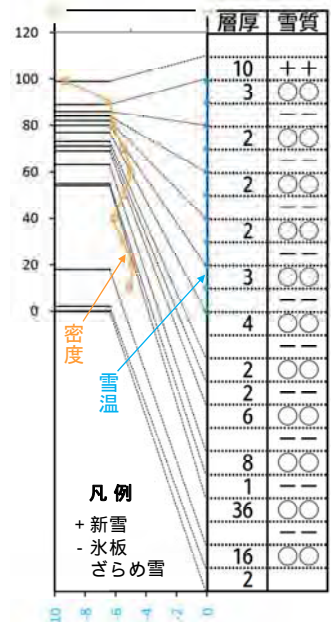


図-12 積雪断面（融雪最盛期）
（H22.4.15 調査）

のピークから 4~9 時間遅れて発生していることがわかるが、融雪熱量と積雪底面流出量のピークの時間差が短縮された分、融雪熱量とダム流入量のピークの時間差が短くなったと考えられるので、積雪底面流出量とダム流入量のピークの時間差はほとんど変わらないと言える。

b) ピーク時の量

はじめに、融雪初期の特徴について述べる。図-6 は融雪熱量と積雪底面流出量の、図-7 は融雪熱量とダム流入量のピーク時の量の関係をそれぞれ示したものである。相関係数 (R^2) はあまり大きくないものの、融雪熱量が大きいとダム流入量も大きくなる傾向が見られる。

次に、融雪最盛期の特徴について述べる。図-10 は融雪熱量と積雪底面流出量の、図-11 は融雪熱量とダム流入量のピーク時の量の関係をそれぞれ示したものである。相関係数からみて、融雪最盛期になると、融雪熱量が大きいと、積雪底面流出量とともにダム流入量も大きくなる傾向が明確になっていることがわかる。

c) 雪質の変化

前項までに述べた融雪熱量とダム流入量のピークの関係について、観測露場で実施している積雪断面観測から得られた雪質の状態と照合した。

融雪初期と考えられる 3 月 31 日の雪質の状態を図-8 に、融雪最盛期に近づいたと考えられる 4 月 15 日の雪質の状態を図-12 にそれぞれ示した。ピークの時間差は、融雪熱量の上昇によって積雪表面で発生した融雪水が積雪内部を流下して地表に達した後に、地表を流下したり地中に浸透するなどしてダム貯水池内に流出してくる過程を経るため生じる。こうした融雪流出過程における積雪内浸透⁵⁾⁶⁾についてみると、融雪が始まる 4 月上旬から融雪最盛期の 5 月上旬にかけて、積雪深が小さくなり、また、雪質がしまり雪を含む図-8 の状態から、ざらめ雪と氷板が大半を占める図-12 の状態へ変化している。これに伴って積雪内部の浸透速度が増すため、融雪最盛期に近づくと融雪熱量と積雪底面流出量のピークの時間差が短縮されていることの裏付けとなった。

(2) ダム管理への適用

前節までに分析した内容は、以下のようにダム管理に適用できる。

a) 融雪最盛期の予知

融雪熱量と積雪底面流出量のピーク時間差が 0 に近づいてくるということは、積雪内部の浸透速度が増していることである。したがって、ピークの時間差を観測することで、雪質の状態が融雪最盛期に近づいていることがわかるので、警戒体制等の有無について見通しをたてることが可能となる。

b) 最大流入量の推定

融雪最盛期においては、融雪熱量のピーク値とダム流入量のピーク値の相関が高まるので、融雪熱量のピーク値の増減を観察することで、当日のダム流入量のピーク値(最大流入量)をある程度把握できる可能性が示された。しかも、融雪熱量は正午近くにピークとなり、ダム流入量は数時間後(定山溪ダムの場合、18 時頃)にピークとなるため、当日の警戒体制等の有無について見通しをたてることが可能となる。

あとがき

本研究による結果を以下にまとめる。

- 1) 積雪重量の遠隔監視により、積雪調査を行わずとも積雪包蔵水量の経時的な把握が可能なので、融雪期においては、貯水池運用計画を随時見直し、修正することが適正なダム管理を行う上で必要である。
- 2) 融雪熱量と積雪底面流出量のピークの時間差が 0 に近づくと、融雪最盛期が近づいているという判断ができる。
- 3) 融雪最盛期では、融雪熱量のピーク値とダム流入量のピーク値の相関が高まるため、当日の最大流入量を数時間前に推定することが可能となる。

以上より、積雪重量、融雪熱量および積雪底面流出量は、積雪寒冷地の融雪期のダム管理において、有用な指標となり得ることを示した。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、国土交通省北海道開発局札幌開発建設部豊平川ダム統合管理事務所からデータや観測場所の提供を受けるなど多大な協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 谷瀬敦、山下彰司：積雪重量計を用いた積雪層の観測について、水工学論文集第 51 巻、2007 年 2 月
- 2) 新目竜一、山下彰司：積雪重量計を用いた冬季水文観測について、水工学論文集第 52 巻、2008 年 2 月
- 3) 鳥谷部寿人、山下彰司、新目竜一：積雪重量計を用いた融雪観測と積雪相当水量に関する一考察、平成 20 年度土木学会北海道支部論文報告集第 65 号、2008。
- 4) 近藤純正編書：水環境の気象学、朝倉書店、1994。
- 5) 浜田和雄、兒玉裕二、小林大二：融雪水の積雪内浸透、北海道大学低温科学物理篇 47:89-101、1989。
- 6) 石井吉之：融雪水の積雪内浸透に及ぼす雪質の効果、北海道大学地球物理学研究報告 65:53-68、2002。