

気象・水文観測値から融雪期の ダム流入量を予測する一手法

A METHOD TO FORECAST DAM INFLOW IN SNOWMELT SEASON USING METEOROLOGICAL AND HYDROLOGICAL OBSERVATION DATA

西原照雅¹・数馬田貢²

Terumasa Nishihara and Mitsugu Kazumata

^{1,2}正会員 (独) 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)

Dam inflow in snowmelt season shows diurnal variation and it reaches the peak of the day from evening to night. But it is difficult to forecast both quantity and time of the peak. In addition, the forecast of the beginnings of the peak season of the snowmelt is difficult. Therefore in the snowmelt season the system to monitor strictly the dam inflow is continued for a long term.

We conduct meteorological and hydrological observation in the Jozankei dam basin. Using the observation data, the relationship among the snowmelt heat at the surface of the snow pack, the runoff from the bottom of the snowpack and the dam inflow was investigated. As a result, we found that the relationship can be used for forecasting both quantity and time of the peak of dam inflow and beginnings of the peak season of the snowmelt.

Key Words : dam inflow, snowmelt heat, runoff from the bottom of the snowpack, snowmelt season

1. はじめに

積雪寒冷地の多目的ダムでは、春先の融雪水を貯留して夏季にかけての水需要を賄っている。一方で、融雪水は融雪洪水の原因ともなる。このため、融雪期のダムでは、貯留と放流の相反する操作の両立が求められる。

融雪期には、太陽放射により、日中に積雪の表面に発生した融雪水が、夕方から夜の間にダムに流入する。このため、融雪期のダム流入量は日変動し、夕方から夜の間に日ピークに達する傾向がある。また、本格的な融雪出水が始まると、ダム流入量は急激に上昇し、流入量が多い状態が数週間続く。融雪期のダムでは、このような特徴が見られるダム流入量に対して適切な操作が求められるが、本格的な融雪出水（以降、「融雪最盛期」と標記する）が始まる時期、ダム流入量の日ピークやその時刻の予測は困難である。したがって、融雪期のダム管理の現場では、長期間にわたって融雪出水に対応する体制を維持している。

融雪期におけるダムや河川の流入量を予測するため、多くの融雪流出モデルが提案されている。その多くは、雪面における融雪量を推定するモデルと、河川の流出量を推定するモデルを組み合わせている^{1),2),3)}。例えば、白

谷ら³⁾が提案したモデルは、積雪の表面で発生した融雪水が土壌に到達するまでの時間（積雪内の浸透時間）を考慮したものとなっている。このモデルを用いて融雪期の流入量を予測した結果、融雪期全体の長期的な流入量を良好に再現できたことが報告されている。

また、ダム流入量の予測精度には、気象予測情報の精度も関係する。臼谷らは⁴⁾、融雪流出モデルに気象予測情報を入力し、融雪期のダム流入量の予測精度と気象予測の精度の関係を考察している。結果、管理上有効なリードタイムは6時間程度であること、降雨を伴わず融雪のみで出水した場合はダム流入量を良好に予測できることを報告している。これらの報告を概観すると、降雨時や融雪最盛期といった融雪期の出水に着目したものが多い。日々のダム管理に必要な、ダム流入量の日ピークとその時刻の予測に関して詳細に検討した例や、融雪最盛期の開始時期の予測を行った例は少ない。

著者らは、札幌市の上流に位置する定山溪ダムにおいて、気象・水文観測を実施している。そこで、本研究では、この気象・水文観測値から、融雪期におけるダム流入量の日ピーク量とその時刻、さらに、融雪最盛期の開始時期の予測を試みた。本手法の特徴は、ダム管理の現場を意識し、観測データを用いて予測できる点、不確実要素のある予測値を用いず、確定値を用いる点である。

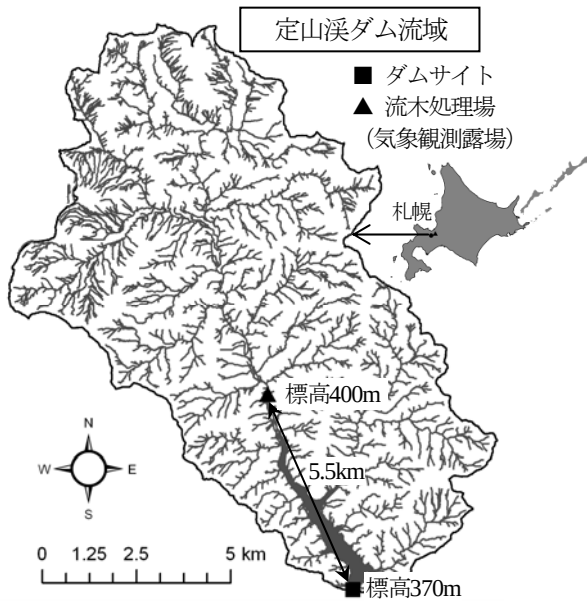


図-1 対象ダム流域と気象・水文観測地点

表-1 気象・水文観測項目

観測項目	計測器名	単位
積雪底面流出量	ライシメータ + 転倒ます型流量計	mm/hr
積雪重量	積雪重量計	kg/m ²
降水量	雨量計	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
下向き短波放射計	長短波放射計	W/m ²
下向き長波放射計		W/m ²
上向き短波放射計		W/m ²
上向き長波放射計		W/m ²
積雪表面温度	放射温度計	℃

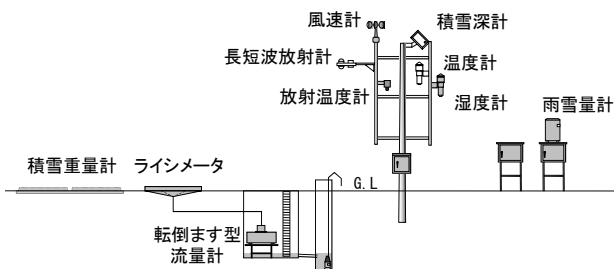


図-2 水文・気象観測機器の構成

2. 対象流域と観測の概要

対象流域は図-1に示す定山溪ダム流域である。定山溪ダムは、石狩川水系豊平川流域の上流部に位置し、流域面積は104km²、標高帯は300m付近～1,300m付近であり、

流域の土地利用の多くは森林である。

気象・水文観測は、ダム湖上流端付近に位置している流木処理場に設置した気象観測露場にて実施した。標高は400mであり、ダムサイトとの直線距離は5.5kmである。観測項目と観測機器の構成を、それぞれ表-1及び図-2に示す。一般的な気象観測項目に加えて、長短波放射、積雪底面流出量、積雪表面温度といった項目を観測していることが特徴である。観測値は毎正時の値である。使用したデータは、2008年から2012年までの5融雪期である。

3. 融雪熱量、積雪底面流出量、ダム流入量の関係

はじめに、流木処理場で観測した気象・水文観測値を用いて計算した融雪熱量、同地点で観測した積雪底面流出量、ダム流入量の関係を考察する。融雪熱量は、式(1)で求められる⁵⁾。

$$QM = NR - SH - LH + QR \quad (1)$$

ここで、 QM ：融雪熱量(W/m²)、 NR ：放射収支量(W/m²)、 SH ：顕熱伝達量(W/m²)、 LH ：潜熱伝達量(W/m²)、 QR ：雨からの伝達熱量(W/m²)である。融雪熱量 QM は正の時に融雪、負の時に融雪水再凍結を意味する。なお、雪温が0℃未満の場合、 QM は積雪層内の貯熱量の変化を表す。なお、積雪中の伝達熱量及び地中伝達熱量は、融雪時期のため積雪温度を一律0℃とみなせ、地中熱も冷えて小さいことから共に無視した⁶⁾。式(1)の各項の計算方法は以下に示される。

$$NR = L^{\downarrow} + S^{\downarrow} - L^{\uparrow} - S^{\uparrow} \quad (2)$$

ここで、 $L^{\downarrow}$ ：下向き長波放射量、 $S^{\downarrow}$ ：下向き短波放射量、 $L^{\uparrow}$ ：上向き長波放射量、 $S^{\uparrow}$ ：上向き短波放射量を表す。顕熱伝達量 SH 及び潜熱伝達量 LH はバルク法により式(3)及び式(4)にてそれぞれ算出した。

$$SH = \rho_a C_p \cdot K_H \cdot (T_s - T) \cdot U \quad (3)$$

$$LH = \rho_a l \cdot K_E \cdot (q_s - q) \cdot U \quad (4)$$

ここで、 T ：気温、 q_s ：積雪表面温度に対する飽和比湿、 q ：比湿、 U ：風速、 T_s ：積雪表面温度、 K_H 及び K_E ：無次元バルク数、 ρ_a ：空気密度、 C_p ：空気の比熱、 l ：気化潜熱である。雨からの伝達熱量 QR は次式により表される。

$$QR = R \cdot C_w \cdot (T_R - 0) \Delta t \quad (5)$$

ここで、 R ：単位時間 Δt 間の降水量、 T_R ：雨水の温度、 C_w ：雨水の比熱である。

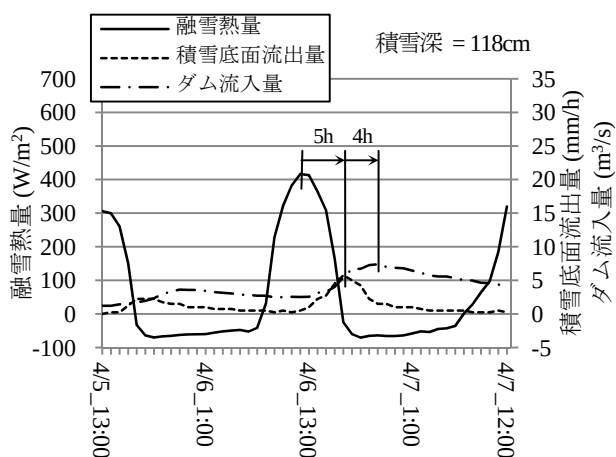


図-3 融雪熱量、積雪底面流出量、ダム流入量の関係
(2011年4月6日)

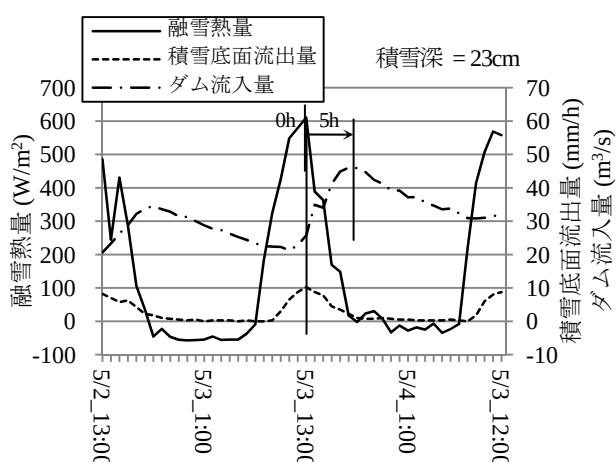


図-4 融雪熱量、積雪底面流出量、ダム流入量の関係
(2010年5月3日)

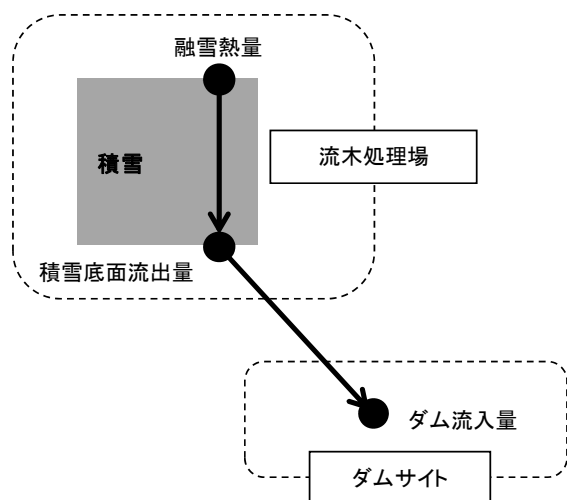


図-5 融雪熱量、積雪底面流出量、ダム流入量の関係の模式図

融雪熱量、積雪底面流出量、ダム流入量の関係を示す例として、図-3及び図-4に融雪初期にあたる2011年4月6日及び融雪最盛期にあたる2010年5月3日の値を示す。両日とも無降雨日であり、それぞれの日の積雪深は図に示

したとおりである。両図を見ると、どの値も日変動し、融雪熱量、積雪底面流出量、ダム流入量の順に日ピークに達していることがわかる。それぞれの傾向を見ると、融雪熱量は日の出とともに上昇し、13:00頃に日ピークに達する。次に日ピークとなる積雪底面流出量のピーク時刻は、融雪初期にあたる2011年4月6日は17:00、融雪最盛期にあたる2010年5月3日は13:00である。このように、融雪熱量の日ピーク時刻と積雪底面流出量の日ピーク時刻の時間差（積雪表面で発生した融雪水が積雪内の浸透に要する時間に相当すると考えられる）は、融雪が進むにしたがい、積雪深の減少や雪質の変化により、短くなる傾向がある⁷⁾。最後にダム流入量が日ピークとなる。その時刻は、2011年4月6日が21:00、2010年5月3日が18:00である。ダム流入量がピークとなる時刻も、融雪が進むにしたがい早くなる傾向がある。このような傾向は図-5に示す模式図で説明できると考えられる。流木処理場地点で融雪熱量がピークとなる時刻に、同地点の積雪表面で発生する融雪水量がピークとなる。この融雪水が積雪内を浸透した後に積雪底面から流出するため、数時間後に積雪底面流出量がピークとなる。この浸透に要する時間は、融雪が進むにともない短くなる。最後に、流木処理場地点の積雪底面から流出した融雪水が、ダムサイトに到達し、ダム流入量がピークとなる。

4. ダム流入量の日ピーク量の予測

(1) 予測方法

日中の融雪熱量が大きいほど、発生する融雪水の量が多いため、その日のダム流入量のピーク量が大きくなる傾向がある⁷⁾。そこで、融雪熱量の1:00から12:00までの積算値とその日のダム流入量のピーク量との関係を考察し、この結果からダム流入量の日ピーク量を予測することとした。ここで、積算値を12:00までの値とした理由であるが、融雪が進むにしたがい、ダム流入量のピーク時刻が早くなり、18:00頃にピークとなる日がある。ピークとなる数時間前にその日のピーク量を予測し、ダム管理の現場においてその日の対応方針を検討できるよう、12:00までの積算値を用いることとした。

対象期間は2008年から2012年までの5融雪期である。具体的には、融雪初期はダム流入量の日変動が小さく、明確なピークを捉えることが困難なため、それぞれの融雪期において、日ピーク量が $5\text{m}^3/\text{s}$ を超えた日から、流木処理場地点における消雪の前日まで（言い換えれば、積雪が観測されていた期間）とした。なお、降水日はダム流入量に対する降水の影響があり、融雪熱量との関係が小さくなると考え、除外した。

図-6に結果を示す。図中に示した実線は、線形回帰分析を行った結果である。図を見ると、積算融雪熱量が大

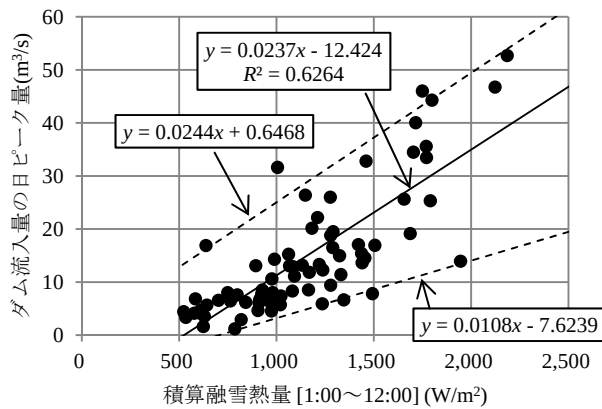


図-6 融雪熱量、積雪底面流出量、ダム流入量の関係の模式図

きいほど、ダム流入量の日ピーク量が大きいことがわかる。線形回帰式の相関係数を見ると、一定の相関があるとがわかる。しかし、融雪熱量が大きくなるにしたがい、ダム流入量の日ピーク量のばらつきが大きくなっている。この結果から、積算融雪熱量を用いてダム流入量の日ピーク量を予測する際は、線形回帰式を用いた結果だけではなく、予想される最大値及び最小値を併せて予測することとした。これらは、図中に点線で示したように、最大値と最小値をほぼ包絡する直線を用いることとした。

また、図-6に示した式をそのまま用いると、積算融雪熱量が小さい場合に、ダム流入量の予測値が0m³/s以下となり、実務上不適当である。このため、図-6の積算融雪熱量が500W/m²付近の値を参考に、予測値の下限値を5m³/s、予測される最大値と最小値の下限値をそれぞれ10m³/s、2m³/sとした。

(2) 予測結果

融雪初期はダム流入量の日変動が小さいため、各融雪期における対象期間は、ダム流入量の日ピーク量が10m³/sを上回っている期間とした。ただし、融雪後期にダム流入量の日ピーク量が10m³/sを下回る前に、流木処理場地点における気象・水文観測を終了した年があり、このような年は観測終了日までとした。また、対象期間内に流木処理場地点で消雪となり、積雪表面温度を計測できなくなる。消雪日以降も積雪のある状態を想定するため、消雪日以降は、放射温度計の観測値を強制的に0℃に置き換えて、融雪熱量を計算している。

最も精度の良かった2009年融雪期の結果を図-7に示す。図中の○が図-6中の実線で示した式を用いたダム流入量の日ピーク量の予測値、×印が観測値である。図を見ると、予測値は観測値の傾向を良く捉えていることがわかる。観測値を真値とした絶対誤差の、予測を行った日数に対する平均値は8.0m³/s、RMSEは9.9m³/sであった。誤差の分布を見ると、5月上旬の融雪最盛期が終わった後、ダム流入量の日ピーク量を過大推定する傾向があり、誤差指標の値を大きくしている。これは、図-6の予測式が、

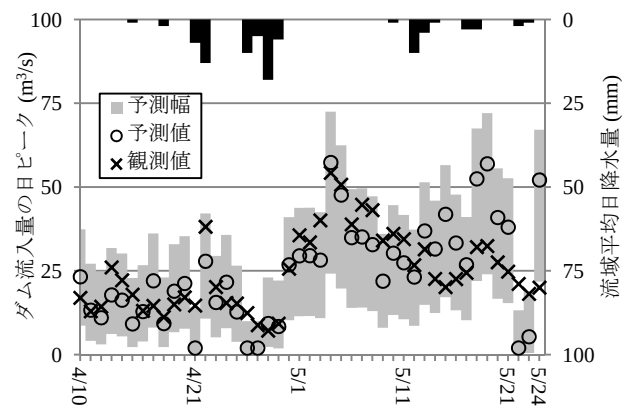


図-7 ダム流入量の日ピーク量の予測結果（2009年）

表-2 ダム流入量の日ピーク量の予測誤差（5融雪期）

	予測日数 (日)	絶対誤差 (m³/s)	RMSE (m³/s)	予測幅を 超えた日数(%)
2008	32	10.0	14.4	9.4
2009	45	8.3	10.7	8.9
2010	46	9.4	12.3	21.4
2011	41	12.2	14.7	26.8
2012	36	14.5	20.0	25.0
平均	40	10.8	13.4	23.9

ダム流域のほぼ全域が積雪に覆われた状況で作成されているのに対し、融雪最盛期が終わった後は、積雪が標高の高い範囲に限られ、発生する融雪量が少ないことが要因と考えられる。

次に、図-7の灰色で示した幅は、図-6中に点線で示した最大値と最小値を予測する式より求めた、ダム流入量の日ピーク量の予測幅である。図を見ると、規模の大きな降水のあった日や融雪後期を除き、観測値のほとんどが予測した幅に収まっていることがわかる。降雨日を除外して予測式を作成したものの、規模の小さい降雨であれば、予測幅に収まる結果となった。予測した日数に対する、予測幅を超えた日数の割合は8.9%であった。

紙面の制約があるため2009年融雪期の図のみ掲載したが、5融雪期の予測結果の傾向は、2009年とほぼ同様であった。表-2に5融雪期分の誤差指標をまとめておく。

5. ダム流入量の日ピーク時刻の予測

(1) 予測方法

3章で考察したように、流木処理場地点で発生した融雪水は、図-5のような過程でダムサイトcへ流下すると考えられる。そこで、以下の式を用いてダム流入量の日ピークとなる時刻を予測することとした。

$$t_{peak} = t_m + \Delta t_p + \Delta t_d \quad (6)$$

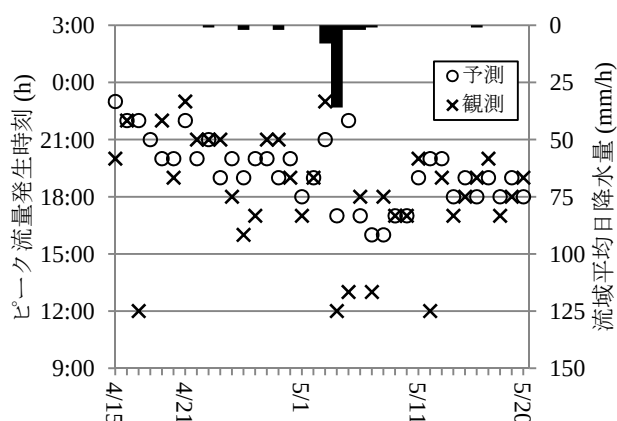


図-8 ダム流入量の日ピーク時刻の予測結果（2012年）

表-3 ダム流入量の日ピーク時刻の予測誤差（4融雪期）

	予測日数 (日)	絶対誤差 (h)	RMSE (h)
2008	32	2.2	3.1
2009	—	—	—
2010	46	3.8	5.2
2011	41	3.3	4.9
2012	36	2.1	3.1
平均	38.8	2.9	4.1

ここで、 t_{peak} ：ダム流入量の日ピークとなる時刻(h)， t_m ：1:00から12:00までの間で融雪熱量がピークとなった時刻(h)， Δt_p ：前日の融雪熱量のピーク時刻と積雪底面流出量のピーク時刻の時間差(h)， Δt_d ：流木処理場地点からダムサイトまでの流下時間(h)である。なお、流木処理場地点の消雪日以降は Δt_p を求められないため、消雪日以降は $\Delta t_p = 0$ とする。

ここで、 Δt_d は次のように決定した。融雪期は流域全体にわたり、湿潤状態であるため、流木処理場地点からダムサイト地点までの流下時間は日時によってほとんど変わらないと考えられる。そこで、積雪底面流出量のピーク時刻とダム流入量のピーク時刻の時間差の平均値で一定値とすることとした。降雨の影響が大きい降雨日を除き、5融雪期のデータから、 $\Delta t_d = 7h$ と求まった。なお、2009年のデータは、ライシメーターのパイプの目詰まりにより、異常値となったため除外した。

(2) 予測結果

対象とした期間は、4章で予測したダム流入量の日ピーク量と同様である。ただし、2009年は前述した理由から対象外とした。精度の良かった2012年融雪期の予測結果を図-8に示す。図を見ると、予測値は観測値の傾向を良く捉えていることがわかる。観測値を真値とした絶対誤差の、予測を行った日数に対する平均値は2.1時間、また、RMSEは3.1時間であった。誤差の分布を見ると、

降水日と降水日以降で誤差が大きい傾向がみられた。降水日のダム流入量がピークとなる時刻は、降水の発生した時刻に依存することが要因と考えられる。紙面の制約があるため2012年融雪期の図のみ掲載したが、4融雪期の予測結果の傾向は、2012年とほぼ同様であった。表-3に4融雪期分の誤差指標をまとめておく。

6. 融雪最盛期の開始時期の予測

融雪熱量の日ピーク時刻と積雪底面流出量の日ピーク時刻の時間差（以降「時間差」と表記する）は、融雪が進むにしたがい短くなる⁷⁾ことを2章で述べた。時間差が短くなることは、積雪が貯留効果を失うことに対応するため、この時間差を日々追跡することにより、融雪最盛期の開始時期を予測することが可能であると考えた。

はじめに、融雪最盛期の開始日を、融雪期におけるダム流入量の最大量で定義しておく。定山溪ダムの2008年～2012年の5融雪期における最大流入量の傾向を見ると、平均的に40 m³/sから60 m³/s程度であった。そこで、本研究では、融雪期の最大流入量の半分程度である、20 m³/sを閾値とし、流入量の日ピーク量が20 m³/sを超えた日を融雪最盛期が始まった日と定義した。

図-9に2012年融雪期のダム流入量の日ピーク量と時間差の関係を示す。図を見ると、融雪初期は4時間から6時間程度あった時間差が、融雪が進むとともに短くなっている。多少の変動はあるが、4月18日より継続して2時間以下となっていると読み取ることができる。また、ダム流入量の傾向を見ると、時間差が2時間となった頃から、日ピーク量が徐々に増加している。融雪最盛期の開始と定義した、ダム流入量の日ピーク量が20 m³/sを超えた日は、時間差が初めて2時間となった日から5日後である。

同様の分析を、2009年を除く4融雪期を対象に行った結果を表-4に示す。前述したように、時間差、ダム流入量の日ピーク量ともに変動がある。このため、日数を求める際は、多少の変動があっても、時間差が2時間以下、ダム流入量の日ピーク量20 m³/s以上が数日間続いたと見なせる場合の初日を特定している。表-4を見ると、時間差が2時間以下となってから、1週間から2週間程度で融雪最盛期が始まっていることがわかる。このことから、時間差を日々追跡することで、融雪最盛期の開始を1週間程度前に把握することができると考えられる。

最後に、時間差と積雪深の関係について考察する。時間差が2時間を下回った初日の積雪深は、60 cmから80 cm程度であり、この日から融雪最盛期が始まった日までに40 cmから60 cm程度に減少する傾向があった。一方、中津川⁸⁾は、Darcy則を導入した貯留関数を用いて、積雪の貯留効果を積雪深によってパラメタライズしたところ、積雪深が52 cm以下では貯留効果を考慮する必要がない結果となったことを報告している。中津川らが特定した

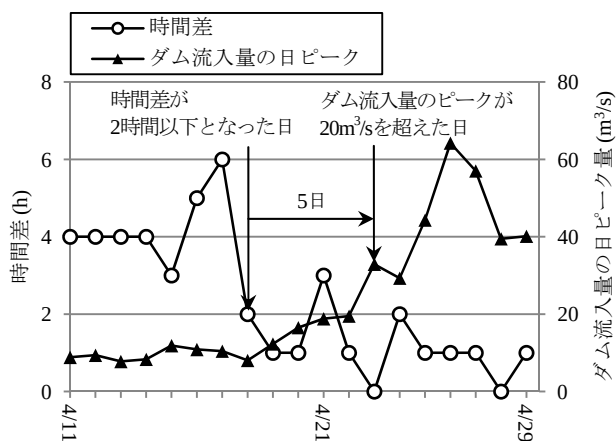


図-9 ダム流入量の日ピーク量と時間差の関係(2012年)

表-4 時間差と融雪最盛期の開始時期の関係(4融雪期)

	時間差が2時間以下となった日から融雪最盛期の開始までの日数
2008	15日
2009	—
2010	8日
2011	4日
2012	5日
平均	8日

積雪深は、時間差が2時間を下回った初日と融雪最盛期が始まった日の間にある。したがって、本手法は、積雪の貯留効果を考慮する必要がなくなる日を1週間程度前に予測していると位置づけられる。

さらに、近年、融雪期に規模の大きな降雨があり、浸水被害や土砂災害に繋がっている⁹⁾。時間差が短い時期は融雪出水が発生しやすいため、この時期に規模の大きな降雨が予測された場合、融雪と降雨が相まって、大規模な出水が起こる可能性が高い状態と考えられる。このため、時間差は、融雪期に降雨が予測された際、警戒の体制を検討するにあたっての指標の一つになると考える。

7. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 5年間の融雪期を対象に、定山溪ダム流木処理場及びダムサイトにおける気象・水文観測データを用いて、流木処理場地点における融雪熱量及び積雪底面流出量とダム流入量の関係を分析した。
- 2) 当日の12:00までの観測値を用いて、その日のダム流入量の日ピーク量とその時刻の予測を試みた。5年間の融雪期に適用した結果、一定の精度で日ピーク流量とその時刻を予測できた。

- 3) 融雪熱量の日ピーク時刻と積雪底面流出量の日ピーク時刻の時間差から、融雪最盛期の開始時期を予測することを試みた。結果、時間差を日々追跡することで、融雪最盛期の開始を1週間ほど前に把握することが可能であった。

本手法を検討する中で、定山溪ダムを管理している事務所との意見交換を行ってきた。最後に、ダム管理の現場から頂いたコメントを記しておく。

- ・ 毎日のダム操作を検討する際、試行錯誤により複数の日ピーク流量とその時刻を設定し、ケーススタディを行っている。本手法の結果は、ケーススタディ値を決定する際の目安にできる。
- ・ 融雪最盛期の開始時期を予測することは困難であるため、融雪熱量のピーク時刻と積雪底面流出量のピーク時刻の差（時間差）は、ダム管理にあたっての有用な指標と考える。

本研究により、融雪期のダム管理に活用できる予測値や指標を提供できると考える。本研究の成果がダム管理の現場で活用されると幸いである。

謝辞：国土交通省豊平川ダム統合管理事務所には、実務の見地から貴重なご意見を頂いた。さらに、観測場所やデータを提供して頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 陸旻皎, 小池俊雄, 早川典生: アメダスデータと数値地理情報を用いた分布型融雪解析システムの開発, 水工学論文集, 第42巻, pp.121-126, 1998.
- 2) 中山恵介, 伊藤哲, 藤田睦博, 斉藤大作: 融雪を考慮した山地流出モデルに関する研究: 土木学会論文集, N0.691/ II -57, pp.25-41, 2001.
- 3) 臼谷友秀, 中津川誠, 星清: 積雪浸透を考慮した実用的融雪流出モデルの開発, 水文・水資源学会誌, 第20巻, 第2号, pp.93-104, 2007.
- 4) 臼谷友秀, 中津川誠: 気象予測情報に基づいた融雪洪水の予測精度, 河川技術論文集, 第14巻, pp.41-46, 2008.
- 5) 近藤純正編著: 水環境の気象学, 朝倉書店, 1994.
- 6) 小野延雄, 石川信敬, 新井正, 若土正暁, 青田昌秋: 基礎雪氷学講座IV, 雪氷水文現象, 古今書院, 1994.
- 7) 数馬田貢, 西原照雅: 融雪熱量及び積雪底面流出量の融雪期におけるダム管理への適用に関する検討, 土木学会第67回年次学術講演会, II-153, 2012.
- 8) 中津川誠, 工藤啓介, 星清: 積雪貯留を考慮した汎用的な融雪流出解析, 水工学論文集, 第48巻, pp.37-42, 2004.
- 9) 臼谷友秀, 中津川誠, 松岡直基: 融雪期の土砂災害に関連する土壌水分の定量評価, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.69, No.4, I_403-I_408, 2013.

(2013. 4. 4受付)