

水文情報の総合化による融雪期ダム流入量の推算

Estimation of Inflow to the Dam Reservoir in the Snowmelt Season by Integrated Hydrological Information

中津川誠¹・臼谷友秀²

Makoto NAKATSUGAWA and Tomohide USUTANI

¹ 国土交通省 中部地方整備局 豊橋河川事務所長
(元 北海道開発局 石狩川開発建設部 豊平川ダム統合管理事務所長)

² 財団法人 日本気象協会 北海道支社

要 旨

2005年(平成17年)の冬期は豊平川流域での降積雪量が多く、融雪洪水が懸念された。そのことを背景に、豊平川上流にある2個所の国直轄管理ダム(定山溪ダム、豊平峡ダム)を対象に、どの程度の流入量を見込めばよいのか、また、洪水調節は必要かどうかなどについて前もって見通しが立てられないかを、実際のダム管理上の対応を通して検討した。本報告は、この検討結果から、「長期的な流入量の推算手法」と「短期的な(時間オーダー)流入量の推算手法」を提案するものである。

融雪最盛期にあたる「5月のダム流入量」は、「積雪包蔵水量」、「4月の降水量」、「4月のダム流入量」を用いた回帰式で概ね推定できることがわかった。さらに、5月の洪水調節の必要性に関しては、a.[ダムの空き容量(常時満水位までの容量)+利水放流量(既往平均)]と、b.[積雪包蔵水量(既知)+4月の降水量(既知)-4月の流入量(既知)+5~6月の降水量(過年度平均)]×流出率とを比較することで、ある程度の判断が可能であった。

短期的な流入量の推算に関しては、デグリーアワー法と適切な流出モデル(2段型貯留関数法)により、融雪量とダム流入量を時間単位で推算できることがわかった。さらに、融雪過程において熱収支法と積雪浸透効果を考慮した手法を適用することで、融雪期全般を通して流入量の再現性が向上することを確認した。

これらの分析の中では、2005年の融雪期の水文状況が、1996年に極めて類似していることも明らかになった。以上で提案する手法に加え、過去の情報をデータベース化し利用しやすいようにしておくとともに、類似パターンを見いだすような手法やシステムがダム管理において効果的であることを示す結果も得た。

《キーワード：ダム流入量；融雪期；積雪包蔵水量；洪水調節；積算暖度法；熱収支法；積雪浸透；2段型貯留関数法》

1. はじめに

平成 17 年(2005)の冬期(2004 の年末から 2005 の春先にかけて)は豊平川流域での降積雪量が多く、融雪洪水が懸念された。これを背景に、豊平川上流にある 2 個所の国直轄管理ダム(定山溪ダム, 豊平峡ダム)を対象に、どの程度の流入量を見込めばよいか、また、洪水調節は必要かどうかなどについて、前もって見通しが立てられないかを検討してみた。北海道のような積雪寒冷地にある多目的ダムでは、4 月から 6 月頃の時期は利水のため融雪水を貯留する、言い換えれば貯水水位が高い状態を目指して運用する必要があり、治水上リスクの高い状態とトレードオフの関係となる。したがって、流域に残っている雪の量とダムの容量に応じ、この時期の運用が事前に見通せればダム管理や流域水管理にとって有益であろうと考えられる。

さらに、この時期に大雨に見舞われると、洪水調節機能が制約されている中で厳しいダム運用が要求される。現にそのような典型事例として平成 12 年(2000)5 月に豊平峡ダムで起きた大きな出水があり¹⁾、近年の気候変化から従来洪水期とされていた時期以外の大雨も懸念されている²⁾。したがって、各種気象・水文情報に基づき流入量を予測し、事前に放流するなどして洪水調節容量を確保しておくなどの対応が考えられる。そのためには融雪および降雨にともなうダム流入量を的確に推定することが必要となる。これまで、降雨流出量の推算や予測については多くの報告事例³⁾や現業への適用例があるが、融雪流出量についてはとくに現業への適用やシステム化を目指して検討された事例は少ない。ダム流入量の推算・予測については、降雨、融雪に関わらず通年使えるシステムが必要であり、降雨と融雪が相まった状況でも的確に流入量を推算できる手法が求められる。

本報告は、前段で述べた融雪期全般のダム運用を見通すための「長期的な流入量の推算手法」、後段で述べた融雪期の出水対応を行うための「短期的な(時間オーダーの)流入量の推算手法」を提案するものである。

2. 2005 年融雪期の状況

平成 17 年(2005)は、図-1 の新聞記事に示すように、例年になく雪が多く融雪洪水が心配された。とくに豊平川流域での積雪が顕著であり、豊平川および上流にあるダムでは例年以上に融雪洪水への警戒が促された。このような情勢を踏まえ、豊平川上流域にある定山溪ダムと豊平峡ダムを対象に、1)融雪期におけるダム運用の見通し、2)融雪にともなうダム流入量の推算手法について検討した。参考までに両ダムの位置を図-2、諸元を表-1 および表-2 に示す。



図-1 平成 17 年の融雪に関する記事 (平成 17(2005)3 月 30 日, 朝日)

(1) 定山溪ダム

図-3 には定山溪ダム貯水池への流入ハイドログラフを示す。2005年は雪が多いことに加え、春先の気温が低かったことから平年値(1992～2004の13年間、以後定山溪ダムの「平年値」とはこの期間の平均とする。)より流出の立ち上がりはかなり遅いことがわかる。図-4には4/1を起点とした流入量マスカープを示すが、これからも4月から5月中旬は平年値より少なく推移していることがわかる。実は過年度データを調べていくうち、積雪や気温、流入量などの経過が1996年(平成8年)とほぼ同様であることを見いだした。図からもそ

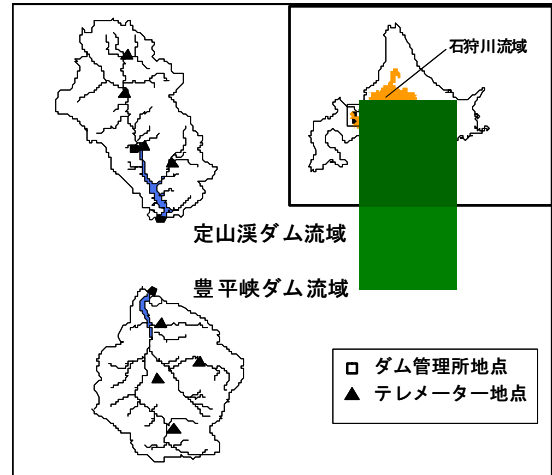


図-2 ダム流域の位置と形状

表-1 定山溪ダムの諸元

型 式	重力式コンクリート
堤 高	117.5m
堤 頂 長	410m
堤 体 積	1,185(千m ³)
流域面積	104km ²
湛水面積	2.3km ²
総貯水容量	82,300(千m ³)
有効貯水容量	78,600(千m ³)
洪水調節容量(洪水期)	19,000(千m ³)
洪水調節容量(非洪水期)	19,000(千m ³)
利水容量	59,600(千m ³)
洪水量	60m ³ /s
計画高水流量(1/150)	600m ³ /s
計画最大放流量	140m ³ /s
ダム天端高	392.39m
サーチャージ水位	390.39m
常時満水位	381.49m
最低水位	325.29m

表-2 豊平峡ダムの諸元

型 式	アーチ式コンクリート
堤 高	102.5m
堤 頂 長	305m
堤 体 積	285(千m ³)
流域面積	134km ²
湛水面積	1.5km ²
総貯水容量	47,100(千m ³)
有効貯水容量	37,100(千m ³)
洪水調節容量(第1期洪水期)	20,200(千m ³)
洪水調節容量(第2期洪水期)	8,100(千m ³)
洪水調節容量(非洪水期)	0(千m ³)
利水容量	37,100(千m ³)
洪水量	60m ³ /s
計画高水流量(1/150)	820m ³ /s
計画最大放流量	140m ³ /s
ダム天端高	477.50m
サーチャージ水位	475.00m
常時満水位	475.00m
制限水位(第1期)	458.90m
制限水位(第2期)	469.20m
最低水位	437.80m

※標高は平成17年(2005)4月現在の数値

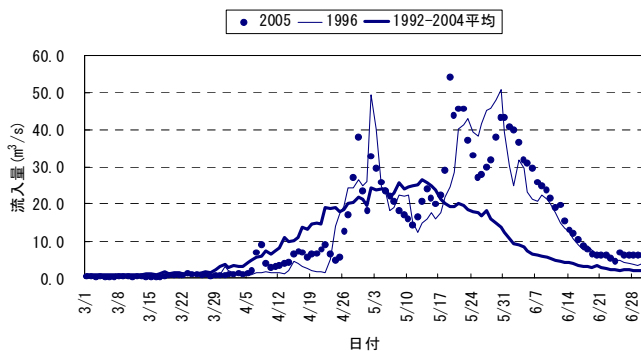


図-3 融雪期のハイドログラフ
(定山溪ダム)

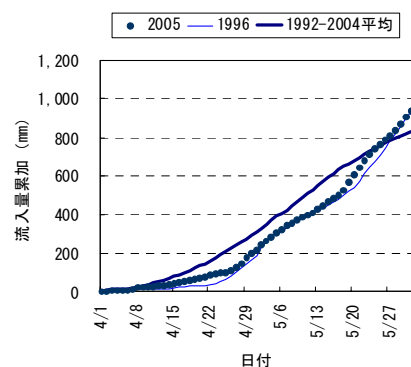


図-4 融雪期の流入量マスカープ
(定山溪ダム)

のことがよくわかる。図-5にはダム流域上流部に設置されているテレメータ積雪深計（春香山地点）の記録であるが、平年より雪解けが遅く1996年とよく似ていることがわかる。なお、洪水放流の開始・終了のタイミング、春香山の積雪が0になってからほぼ1週間後に洪水放流を終了したなど、ダム管理上の対応も1996年とほとんど同じであった。

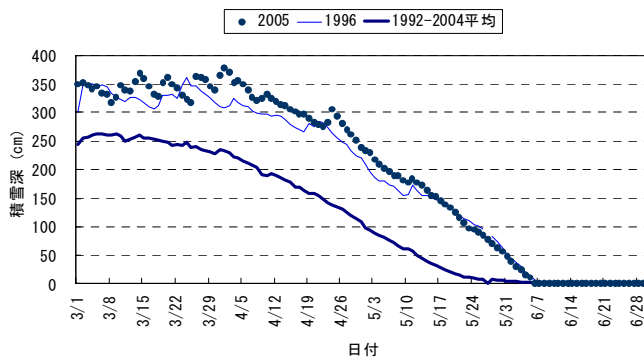


図-5 積雪深の変化(定山溪ダム, 春香山)

(2) 豊平峡ダム

図-6には豊平峡ダム貯水池への流入ハイドログラフを示す。豊平峡ダムでも2005年は平年値(1973～2004の32年間、以後豊平峡ダムの「平年値」とはこの期間の平均とする。)より流出の立ち上がりが遅いことがわかる。図-7には4/1を起点とした流入量マスカーブを示すが、これも定山溪ダムと同様に、平年値より少なく、1996年(平成8年)とほぼ同様な傾向であった。また、図-8にダム流域上流部に設置されているテレメータ積雪深計(大二股地点)の記録を示すが、やはり平年より雪解けが遅く1996年と類似していることがわかる。なお、豊平峡ダムに関しては4月から5月にかけて大きな出水のあった平成12年(2000)の結果も参考までに示している。この年の雪の量は平年並みであったにも関わらず、大雨によってピーク流入量が著しく大きかったことがわかる。

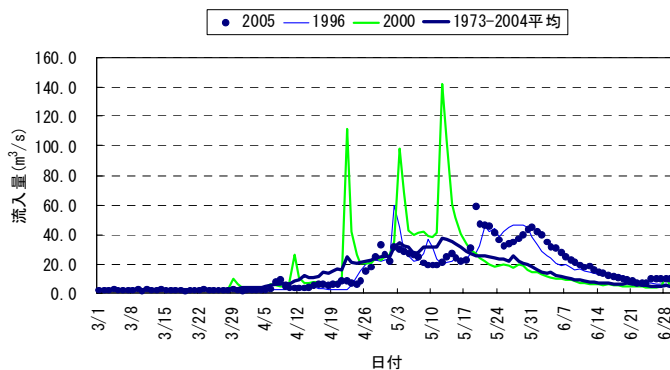


図-6 融雪期のハイドログラフ(豊平峡ダム)

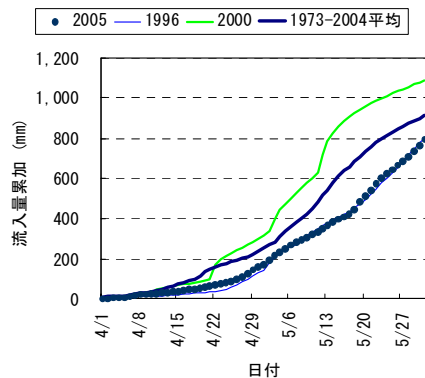


図-7 融雪期の流入量マスカーブ(豊平峡ダム)

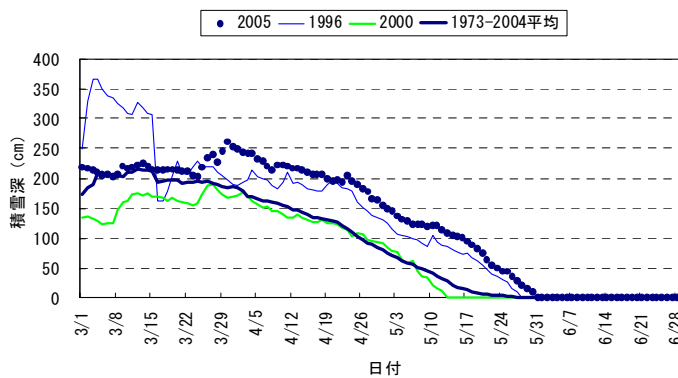


図-8 積雪深の変化(豊平峡ダム, 大二股)

3. 積雪包蔵水量とダム諸量からみた洪水調節の見通し

ダム流域で毎年実施される「積雪調査(スノーサーベイ)」の結果、および「ダム管理月報」、「水象月報」に記録される日単位データから融雪期の流入量が推定できないかどうかを以下で検討してみた。

(1) 積雪包蔵水量と洪水調節

雪の多い年は融雪期の流入量が多くなると考えるのは自然であるが、どの程度の雪でどの程度のダム放流を想定すればよいかかわれば、ダム管理上有益である。その見通しを立てるため、まずは積雪と融雪期の洪水放流の関係をみてみる。

両ダム流域では積雪の最も多くなる3月中旬頃に現地踏査による積雪調査(スノーサーベイ)が実施されている。この際に雪を水量に換算したいわゆる「積雪包蔵水量」が把握される。

これまでのスノーサーベイの結果を整理してみると、2005年は定山溪ダムでは141百万 m^3 (1,360mm)で、1992~2004平均の平年値111百万 m^3 (1,064mm)の1.3倍、豊平峡ダムでは132百万 m^3 (985mm)で、1973~2004平均の平年値111百万 m^3 (832mm)の1.2倍であった。この結果からみて、2005年は確かに雪の多い年ではあったものの極端に多かったわけではなく、事実過去にはもっと多い年もあった。融雪期の洪水調節を左右する要因としては積雪だけではなく、融雪期の降雨も考えられる。図-9では定山溪ダムにおける積雪包蔵水量に融雪期の4月~6月の降水量(ダム管理所地点)を加え、ダムからの洪水放流量(利水放流以外の放流量)と比較したものである。これからダムへの水供給は積雪由来が圧倒的に多く、洪水放流を左右しているようにもみえる。一方、豊平峡ダムでも同様の図を作成したものを図-10に示すが、こちらの方は必ずしも積雪だけに関係しているとは言えない。すなわち、融雪期の降雨が少なからず影響してようにみえる。

(2) 融雪最盛期(5月)の流入量を支配する要因

次にもう少し定量的な分析を進めてみたい。両ダムにおいては例年4月下旬から5月にかけてが融雪の最盛期となる。そこで、「5月のダム流入量」を関連要因から推定できないかどうかを考えてみた。ここで、関連要因として「積雪包蔵水量」、「4月の降水量」、「4月のダム流入量」を考えた。このほかに「5月の降水量」も考慮されるべきと考えるが、1ヶ月前の予測は現状では困難であることから、上記3要素だけでどこまで推定できるかを調べてみた。推定のための重回帰式は下記のとおりとなる。

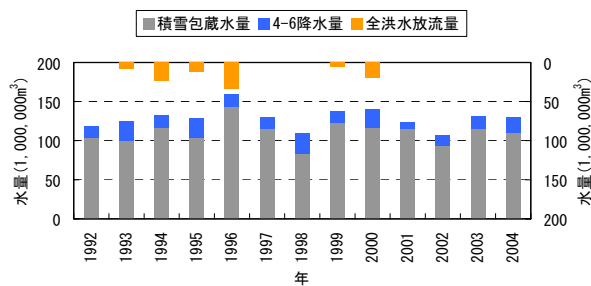


図-9 積雪量・降水量と洪水放流量
(定山溪ダム)

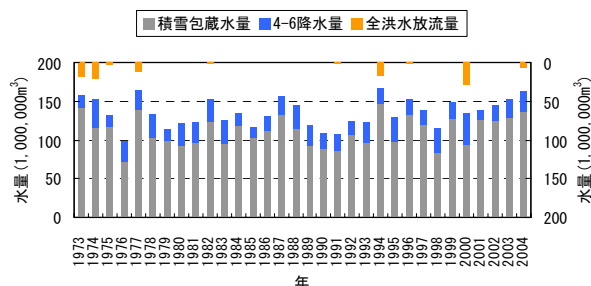


図-10 積雪量・降水量と洪水放流量
(豊平峡ダム)

$$Q_5 = a_1 S + a_2 R_4 + a_3 Q_4 + a_4 \quad (1)$$

ここで、 Q_5 は5月の流入量(mm)、 S は積雪包蔵水量(mm)、 R_4 はダム地点の4月の降水量(mm)、 Q_4 は4月の流入量(mm)、 $a_1 \sim a_4$ は回帰係数で、定山溪ダムでは $a_1 = 0.56$ 、 $a_2 = 1.29$ 、 $a_3 = -0.96$ 、 $a_4 = 151.84$ (重回帰係数 $R = 0.92$)、豊平峡ダムでは $a_1 = 0.59$ 、 $a_2 = 1.94$ 、 $a_3 = -0.72$ 、 $a_4 = 121.34$ (重回帰係数 $R = 0.84$)となった。図-11 および図-12 では上式の推定結果と実測を比較し、再現性を検証してみたが、大雑把な傾向は把握できることがわかった。ただし、ダム管理所の観測値から流域全体の降水量を推定する際の誤差や5月に入ってからの降水(雨)量が加味されていないことなどから、推定が十分でない年もある。

なお、先に述べたように4月の流入量が後々の5月の流入量に影響すると考えられるが、それは気温の経過に関係するとみられる。図-13 および図-14 はダム地点の日平均気温から積算暖度(マイナスは0とし、プラスの場合その度数を累加するもので、デグリーデイとも言う)を求め、4月の流入量との関係を示したものである。積算暖度は4月1日からの累加値である。関係式は次式のようなになる。

$$\sum_{j=1}^i Q_4(j) = b_{41} \sum_{j=1}^i T_4(j)' + b_{42} \quad (2)$$

ここで、 $Q_4(j)$ は4月j日の流入量(mm)、 $T_4(j)'$ は4月j日の積算暖度(degree)、 b_{41} 、 b_{42} は回帰係数で、定山溪ダムでは $b_{41} = 2.13$ 、 $b_{42} = 33.96$ (回帰係数 $R = 0.89$)、豊平峡ダムでは $b_{41} = 2.08$ 、 $b_{42} = 38.52$ (回帰係数 $R = 0.73$)となる。これより、両ダムとも1日1度あたり2mm ずつ流入が増え、例えば4月末の積算暖度が100度ならば約250mmの流入となる。ちなみに250mmは定山溪ダムで $104 \times 10^6 \times 0.25 = 26$ 百万 m^3 、豊平峡ダムには $134 \times 10^6 \times 0.25 = 34$ 百万 m^3 に相当する。

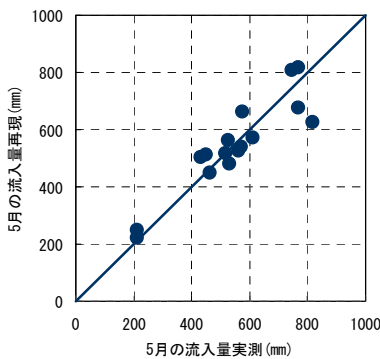


図-11 重回帰分析による5月の流入量の再現性 (定山溪ダム)

(3) ダムの貯水量と流入量からみた洪水調節の可能性について

ダムは非洪水期においては、常時満水位を超えるような場合

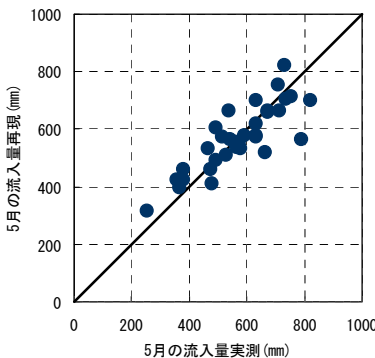


図-12 重回帰分析による5月の流入量の再現性 (豊平峡ダム)

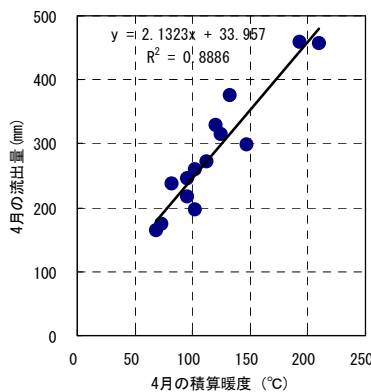


図-13 4月の積算暖度と流入量の関係 (定山溪ダム)

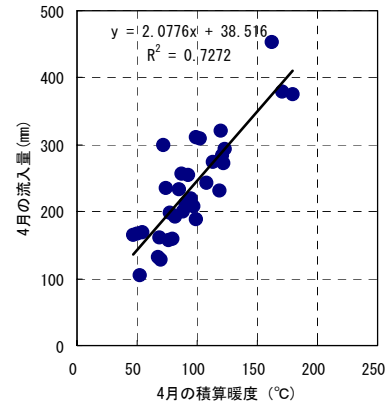


図-14 4月の積算暖度と流入量の関係 (豊平峡ダム)

に洪水調節をおこなう。両ダムの常時満水位は表-1 および表-2 に示すとおりである。なお、豊平峡ダムでは非洪水期の常時満水位はサーチャージ水位と等しく、ダムおよび下流の安全上、常時満水位-4m(=471.00m)を予備放流水位として、これを超えるような場合に洪水調節をおこなうことにしている。その基準のもと、洪水調節にともなう放流量がどのような要因に関連するかを分析してみた。

常識的に考えると洪水調節は、(流入量) > (空き容量) となる場合必要となる。この場合の(流入量)とは、融雪と期間中の降水がもたらすものである。また、正味の(空き容量)は、常時満水位までの容量に対象期間中に利水(発電、水道)目的で放流できる容量を加えたものとなる。

両ダムにおいて4月から6月までの水収支でこのことを整理したのが表-3 および表-4 である。これをみると、定山溪ダムは積雪包蔵水量に期間中降水量を合わせたものが129百万 m^3 で、蒸発散などの損失があるので実際にダムに流入するのが98百万 m^3 となる。したがって流出率は0.76となる。それに対して正味の空き容量は94百万 m^3 (内訳は常時満水位時(=381.48m)の貯水量59.6百万 m^3 から4/1の平均貯水量12.9百万 m^3 を引いて3ヶ月間6.0 m^3/s 相当の利水放流量47.2百万 m^3 を足す。)となり、水収支上は洪水調節が常に必要な状態にあることが示唆される。なお、正味の空き容量は利水放流量に左右されるが、定山溪ダムでは既往実績から6.0 m^3/s とした。利水放流は機能上最大10.0 m^3/s まで可能であるが、それを平均的に継続することは現実的でないため、既往実績からの設定とした。

豊平峡ダムは積雪包蔵水量に期間中降水量を合わせたものが135百万 m^3 で、実際にダムに流入するのが131百万 m^3 となる。この結果だけみると流出率は0.97と高いが、他流域からの導水があることや、降雨量がダム管理所データから整理されているため過小評価されていることが理由として考えられる。それに対して正味の空き容量は139百万 m^3 (内訳は常時満水位時(=471.00m)の貯水量31.4百万 m^3 から4/1の平均貯水量2.6百万 m^3 を引いて3ヶ月間14.0 m^3/s 相当の利水放流量110.1百万 m^3 を足す。)となり、水収支上は辛うじて空き容量が流入量を上回っている。なお、豊平峡ダムの場合、正味の空き容量が利水放流量に大きく左右されるが、既往実績から14.0 m^3/s とした。利水放流は機能上最大26.4 m^3/s まで可能であるが、それを平均的に継続することは現実的でないため、既往実績からの設定とした。

融雪期の水収支について年度別にもう少し吟味してみる。表-5 および表-6 は両ダムの年度別の積雪包蔵水量、期間中(4-6月)降水量、期間中(4-6月)流入量を一覽にし、流出率も整理してみたものである。また、諸量の月別内訳を表-7 および表-8 に示す。これらの平均値は先に表-3 および表-4 に示した結果と同じである。平均的には定山溪ダムの流出率が0.76、豊平峡ダムが0.97程度となることは先にも示したとおりである。以上を踏まえ、次の諸量を比較し、洪水調節の目途が事前(1ヶ月ほど前)に立たないかどうかを検討してみた。

表-3 融雪期水収支
(定山溪ダム)

	1992-2004年の平均値 1,000,000 m^3
積雪包蔵水量 a	111
4-6月の降水量 b	18
a+b	129
4-6月の流入量 f	98
常時満水位までの容量 c	47
4-6月の利水放流量(6 m^3/s 相当) d	47
c+d	94

表-4 融雪期水収支
(豊平峡ダム)

	1973-2004年の平均値 1,000,000 m^3
積雪包蔵水量 a	111
4-6月の降水量 b	24
a+b	135
4-6月の流入量 f	131
常時満水位までの容量 c	29
4-6月の利水放流量(14 m^3/s 相当) d	110
c+d	139

表-5 融雪期の年別水収支
(定山溪ダム)

年(西暦)	年(和暦)	積雪包蔵水量		降水量(4-6月)		流出率 C/(A+B)
		A 1,000,000m ³	B 1,000,000m ³	C 1,000,000m ³	C 1,000,000m ³	
1992	H4	103	16	85	0.71	
1993	H5	101	25	93	0.74	
1994	H6	116	17	122	0.92	
1995	H7	104	24	101	0.79	
1996	H8	143	17	132	0.82	
1997	H9	114	15	96	0.74	
1998	H10	83	27	75	0.69	
1999	H11	123	16	105	0.76	
2000	H12	116	23	114	0.82	
2001	H13	115	9	86	0.69	
2002	H14	93	14	76	0.71	
2003	H15	115	16	96	0.74	
2004	H16	111	20	97	0.74	
2005	H17	141	22	132	0.81	
平均値(1992-2004)		111	18	98	0.76	
平均値(1992-2004)		111	18	98	0.76	

表-7 融雪期水文諸量の月別内訳(定山溪ダム)

年(西暦)	年(和暦)	積雪包蔵水量 1,000,000m ³	降水量			流入量		
			4月 1,000,000m ³	5月 1,000,000m ³	6月 1,000,000m ³	4月 1,000,000m ³	5月 1,000,000m ³	6月 1,000,000m ³
1992	H4	103	6	7	2	28	46	10
1993	H5	101	11	6	8	18	60	15
1994	H6	116	5	10	1	23	85	15
1995	H7	104	11	9	5	34	58	8
1996	H8	143	5	10	3	17	80	35
1997	H9	114	2	11	3	27	59	10
1998	H10	83	5	10	11	48	22	5
1999	H11	123	3	10	3	39	55	11
2000	H12	116	11	8	4	25	80	10
2001	H13	115	3	2	3	33	45	8
2002	H14	93	3	5	6	48	22	6
2003	H15	115	6	2	8	31	55	11
2004	H16	111	5	11	4	26	63	8
2005	H17	141	7	7	7	21	70	42
平均値(1992-2004)		111	6	8	5	30	56	12
平均値(1992-2004)		1,064	57	74	45	293	540	113

表-6 融雪期の年別水収支
(豊平峡ダム)

年(西暦)	年(和暦)	積雪包蔵水量		降水量(4-6月)		流出率 C/(A+B)
		A 1,000,000m ³	B 1,000,000m ³	C 1,000,000m ³	C 1,000,000m ³	
1973	S48	141	17	162	1.02	
1974	S49	115	38	170	1.11	
1975	S50	117	15	148	1.11	
1976	S51	73	27	103	1.04	
1977	S52	140	24	154	0.94	
1978	S53	102	31	120	0.90	
1979	S54	98	16	118	1.04	
1980	S55	93	28	115	0.95	
1981	S56	95	28	129	1.05	
1982	S57	125	28	150	0.98	
1983	S58	95	31	122	0.97	
1984	S59	118	17	124	0.92	
1985	S60	102	14	120	1.04	
1986	S61	113	18	139	1.06	
1987	S62	134	23	147	0.94	
1988	S63	115	31	146	1.01	
1989	H1	92	27	103	0.87	
1990	H2	89	20	108	0.99	
1991	H3	85	22	114	1.06	
1992	H4	107	17	109	0.88	
1993	H5	96	27	114	0.92	
1994	H6	146	20	163	0.98	
1995	H7	97	32	126	0.98	
1996	H8	132	21	143	0.93	
1997	H9	120	18	125	0.90	
1998	H10	84	32	97	0.83	
1999	H11	128	22	135	0.90	
2000	H12	94	41	165	1.22	
2001	H13	126	12	130	0.94	
2002	H14	124	20	124	0.86	
2003	H15	130	23	121	0.79	
2004	H16	136	27	142	0.87	
2005	H17	132	25	143	0.91	
平均値(1973-2004)		111	24	131	0.97	
平均値(1973-2004)		111	24	131	0.97	

表-8 融雪期水文諸量の月別内訳(豊平峡ダム)

年(西暦)	年(和暦)	積雪包蔵水量 1,000,000m ³	降水量			流入量		
			4月 1,000,000m ³	5月 1,000,000m ³	6月 1,000,000m ³	4月 1,000,000m ³	5月 1,000,000m ³	6月 1,000,000m ³
1973	S48	141	10	6	1	34	101	27
1974	S49	115	16	9	13	29	98	42
1975	S50	117	7	5	3	42	89	17
1976	S51	73	5	9	13	21	64	18
1977	S52	140	14	8	2	23	98	33
1978	S53	102	7	13	10	18	79	23
1979	S54	98	7	2	7	22	76	20
1980	S55	93	10	4	13	22	72	20
1981	S56	95	9	8	12	25	77	27
1982	S57	125	9	12	7	27	96	28
1983	S58	95	9	8	14	51	49	22
1984	S59	118	4	6	7	14	84	25
1985	S60	102	10	3	0	42	66	13
1986	S61	113	9	7	2	31	84	23
1987	S62	134	12	6	4	26	95	26
1988	S63	115	9	9	12	34	85	28
1989	H1	92	7	11	8	39	51	13
1990	H2	89	10	3	8	36	51	21
1991	H3	85	11	6	4	38	63	13
1992	H4	107	6	9	2	28	62	19
1993	H5	96	12	7	8	22	66	26
1994	H6	146	5	14	1	27	110	26
1995	H7	97	14	14	4	33	69	25
1996	H8	132	3	15	3	17	90	36
1997	H9	120	4	12	2	28	77	19
1998	H10	84	6	12	13	50	34	13
1999	H11	128	3	14	5	43	71	21
2000	H12	94	17	17	7	40	106	19
2001	H13	126	4	3	5	37	75	18
2002	H14	124	5	7	8	61	47	16
2003	H15	130	9	5	9	31	72	18
2004	H16	136	7	13	6	32	90	21
2005	H17	132	8	9	9	21	77	45
平均値(1973-2004)		111	8	9	7	32	76	22
平均値(1973-2004)		832	63	65	50	238	570	167

A. 洪水調節のための（利水放流以外の）放流量実績

B. 流入量実績－正味の空き容量

C. 流入量推定－正味の空き容量

目的は、A が C によって事前推定できればよいことになる。B の流入量実績は結果としてわかることなので、参考値として整理しておく。ここで、C の流入量推定とは積雪包蔵水量と期間中降水量の和に流出率を乗じて実態にあった流入量を求めるものである。ただし、降水量については1ヶ月先の予測は現実的でないので、過年度の平均値を用いる。例えば5/1時点での流入量推定とは、（積雪包蔵水量(既知) + 4月の降水量(既知) - 4月の流入量(既知) + 5~6月の降水量(過年度平均値、表-7および表-8参照))に流出率を乗じて求めることとする。流出率は先に示した結果に基づき、定山溪ダムでは0.75、豊平峡ダムでは0.95とした。同様の考え方をすれば、降水量に関して実態と既往平均の誤差の分精度は落ちるが、4/1時点などでも放流の見通しをつけることも可能である。また、正味の空き容量は各時点水位での常時満水位までの容量に利水放流量を加えたもので、利水放流量は先に示したように定山溪ダムで6.0m³/s分、豊平峡ダムで14.0m³/s分を見込んでいる。

以上の評価について、5/1時点での結果を表-9および表-10に示す。これをみると、実際に洪水放流を行う場合(A>0, 表中網掛けの部分)は、正味の空き容量より流入量がポテンシャルとして大きい状態(C>0)として推測できていることがわかる。概して定山溪ダムの方が精度は良いようにみえるが、その原因として、豊平峡ダムでは利水放流量が「正味の空き容量」を大きく左右し、この設定次第で洪水調節の程度も変わってくることや、融雪期に大雨が降るケースがあり、その場合精度が下がることが考えられる。言い換えれば中小の出水に対しては利水放流をうまく(雪の多い年には早くから多めに放流するなど)やればCの値が大きくても洪水放流を回避できること、一方、2000年(平成12年)のように大雨が降る場合にはC値(ポテンシャル)は0でも洪水放流を余儀な

表-9 洪水放流量の推定
(定山溪ダム)

年(西暦)	年(和暦)	洪水放流量実績		
		A 1,000,000m ³	B 1,000,000m ³	C 1,000,000m ³
1992	H4	0	0	0
1993	H5	8	7	7
1994	H6	23	28	6
1995	H7	11	12	7
1996	H8	33	44	33
1997	H9	0	0	0
1998	H10	0	0	0
1999	H11	5	9	7
2000	H12	19	19	10
2001	H13	0	0	1
2002	H14	0	0	0
2003	H15	0	1	5
2004	H16	0	0	0
2005	H17	34	39	27
平均値(92-04)		8	9	6

表-10 洪水放流量の推定
(豊平峡ダム)

年(西暦)	年(和暦)	洪水放流量実績		
		A 1,000,000m ³	B 1,000,000m ³	C 1,000,000m ³
1973	S48	18	26	23
1974	S49	21	45	15
1975	S50	3	10	0
1976	S51	0	0	0
1977	S52	11	26	34
1978	S53	0	0	0
1979	S54	0	0	0
1980	S55	0	0	0
1981	S56	0	0	0
1982	S57	1	20	13
1983	S58	0	0	0
1984	S59	0	5	11
1985	S60	0	0	0
1986	S61	0	7	0
1987	S62	0	18	25
1988	S63	0	14	0
1989	H1	0	0	0
1990	H2	0	0	0
1991	H3	2	0	0
1992	H4	0	0	0
1993	H5	0	0	2
1994	H6	16	31	27
1995	H7	0	7	1
1996	H8	1	25	25
1997	H9	0	0	3
1998	H10	0	0	0
1999	H11	0	0	4
2000	H12	28	31	0
2001	H13	0	0	0
2002	H14	0	0	0
2003	H15	0	0	22
2004	H16	7	15	23
2005	H17	0	19	23
平均値(73-04)		3	9	7

くされることを意味している。以上のような既往データと時点データの分析に基づき、融雪期の洪水調節について事前の見通しがある程度は立てられることがわかった。

4. 時間単位の融雪量・流入量の推定

前節までで、融雪期間中の流入について全体量(Volume)はある程度推定できることがわかった。しかし、出水対応では全体の Volume とともに短時間での変化、いわば強度(Intensity)が必要となる。以下ではダム管理上計測されている情報から時間オーダーでの融雪量、ダム流入量を推定する手法について示す。

(1) 積算暖度法(デグリーアワー法)による融雪量の計算手法

時間単位の融雪とそれにもなう流出量を計算するために、最もシンプルな方法としては積算暖度法(デグリーアワー法、以後 DHM とする。)がある。これは各時間毎に計測された気温のうち 0℃を上回った度数(デグリーアワー)に相当する融雪量を次式から計算するものである。

$$m = T_{dhf} T_{dh} \quad (3)$$

ここで、 m は融雪量(mm/hr)、 $T_{dh}(t)$ は時刻 t でのデグリーアワー(degree)、 k_{dhf} はデグリーアワーファクター(mm/deg/hr)といわれるものである。式から一見して分かるように、融雪量は比例定数であるデグリーアワーファクターに左右され、言い換えればどうとでも調整できることがわかる。

なお、デグリーアワーを求める際の気温はダム管理所で毎時計測されているものを利用するが、高いところで 1,000m 以上もある流域全体に適用するには標高補正をおこなう必要がある。標高補正は、ダム管理所の標高(定山溪ダムで EL=393m、豊平峡ダムで EL=485m)に対し 100m 上昇すると気温を 0.65℃下げるとする補正(気温減率 0.65℃/100m)をおこなう。実際の演算では、積雪調査から得られた標高帯別の積雪包蔵水量を初期値とし、DHM で標高帯別に融雪量を計算していく。なお、降水が観測されたときは気温 0℃以上か以下かで雨か雪かの判別をおこない、雪の場合はその分はそのまま蓄積されるとする。また、当然のことだが、積雪が無くなった時点で融雪量は 0 とする。

ところで、先に述べたように両ダムでは 1 日当たりの積算暖度(デグリーデイ)に対し、約 2mm の流入があることが示された(図-13 および図-14 参照)。したがって、デグリーアワーファクターは 0.1mm/deg/hr 程度のオーダーにあることが推察できる。過年度の検討では 0.2mm/deg/hr という報告⁴⁾もあるが、最終的には実際のダム流入量にフィットするようにチューニングした結果、0.15mm/deg/hr とした。

(2) 2 段型貯留関数法による流入量の計算手法

次にデグリーアワー法で推算された融雪量および降雨量を入力値として、流出モデルにより、ダム流入量を計算する。流出モデルとしては、星ら⁵⁾によって提案された以下の 2 段型貯留関数モデルを適用する。このモデルでは、出水時の表面・中間流出成分を損失項を含む非線形貯留関数によって表

し、地下水流出成分は線形貯留関数で定式化したものである(図-15)。1 段目タンクは、次に示す非線形貯留関数法によって表される。

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= k_{11}q_1^{p_1} + k_{12} \frac{d}{dt}(q_1^{p_2}) \\ \frac{ds_1}{dt} &= r - q_1 - f_1 \\ f_1 &= k_{13}q_1 = (c_3 - 1)q_1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

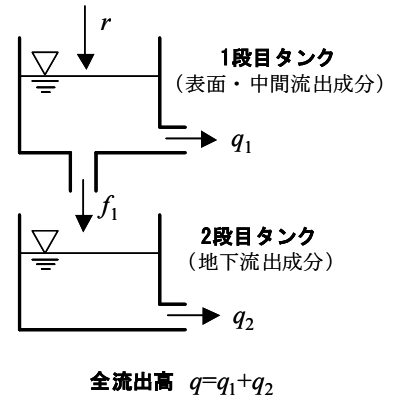


図-15 2 段型貯留関数モデルのイメージ図

ここで、 s_1 は 1 段目タンクの貯留高(mm)、 r は融雪量(式(3)の m)と降雨量の合計値(mm/hr)、 q_1 は表面・中間流出成分の流出高(mm/hr)、 f_1 は 1 段目タンクから 2 段目タンクへの浸透供給量(mm/hr)、 k_{11} と k_{12} は貯留係数、 k_{13} は浸透係数、 p_1 と p_2 は貯留指数を表す。 p_1 、 p_2 、 k_{11} 及び k_{12} は表面流にマニング則を用い、次のように表せる。

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= 0.6 \\ p_2 &= 0.4648 \\ k_{11} &= c_1 A^{0.24} \\ k_{12} &= c_2 k_{11}^2 (\bar{r})^{-0.2648} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 A は流域面積(km²)、 \bar{r} は出水時の r の平均(mm/hr)、 c_1 と c_2 はパラメータを表す。一方、2 段目タンクは次に示す線形貯留関数法で表される。

$$\left. \begin{aligned} s_2 &= k_{21}q_2 + k_{22} \frac{dq_2}{dt} \\ \frac{ds_2}{dt} &= f_1 - q_2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここで、 s_2 は 2 段目タンクの貯留高(mm)、 k_{21} と k_{22} は貯留係数、 q_2 は地下流出成分の流出高(mm/hr)を表す。貯留係数 k_{21} と k_{22} は、1 段目タンクのパラメータ c_3 によって次のように決まる。

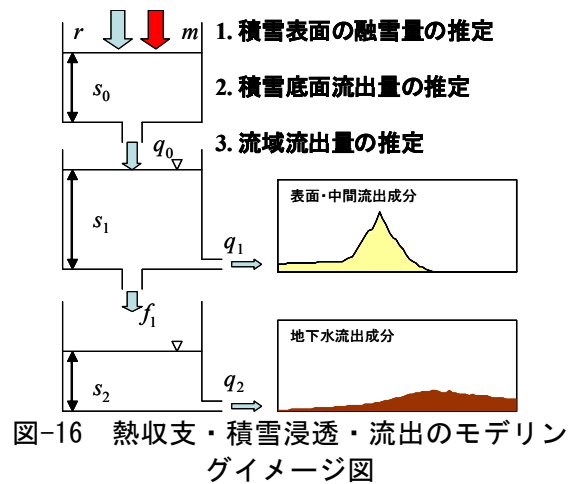
$$k_{21} = c_{01}k_{22} \quad , \quad k_{22} = \frac{c_3 - 1}{c_{00}} \quad (7)$$

ここで、 c_{00} と c_{01} は次のとおりである。

$$c_{00} = \left(\frac{\delta}{T_c} \right) \quad , \quad c_{01} = \frac{\delta^2}{T_c} \quad (8)$$

ここで、 T_c は地下流出成分の分離定数(hr)、 δ は減衰係数(=2.1)を表す。分離定数 T_c は夏期の出水事例より決め、豊平峡ダムでは $T_c = 34$ hr(解析事例；1996 年 9 月 20 日、1997 年 8 月 10 日、1998 年 9 月 16 日)、定山溪ダムは $T_c = 27$ hr(解析事例；1997 年 8 月 9 日、1998 年 9 月 16 日、1999 年 8 月 1 日)とした。

以上のように、2 段目タンクのパラメータ k_{21} と k_{22} は 1 段目タンクのパラメータ c_3 によって決まる。このため、2 段型貯留関数法では c_1, c_2, c_3 (もしくは k_{13}) の 3 個のパラメータを与えることで流量が計算できる。よって c_1, c_2, c_3 を適切に与える必要があるが、2000 年(平成 12 年)5 月 12 日出水の融雪量・降雨量と流入量の関係に最適化手法を適用して求めた。この結果、定山溪ダムでは $c_1 = 3.48, c_2 = 0.59, c_3 = 1.91$ 、豊平峡ダムでは $c_1 = 1.68, c_2 = 1.58, c_3 = 1.76$ となった。



(3) 熱収支法と積雪浸透を考慮した融雪量・流入量の計算手法

融雪現象は単純に温度の違いだけでなく、大気と積雪の熱のやりとり全般(熱収支)に左右される。また、積雪表面で融けた水が地面に到達する時間は積雪の状態によって異なる。そこで、より汎用性を高めるため、融雪量の計算に熱収支法を適用し、積雪深に応じて浸透貯留効果が見込めるモデルを提案した⁶⁾。モデル構成としては、図-16 に示す以下のサブモデルからなる。

- 1) 熱収支法に基づく積雪表面融雪モデル
- 2) 貯留関数法に基づく積雪浸透モデル
- 3) 2 段タンク型貯留関数法に基づく流出モデル

最初に熱収支法による融雪モデルについて説明する。モデルは Kondo *et.al.*⁷⁾ によって提案されたものを基本に、植生の影響や積雪浸透(貯留効果)を考慮できる手法であり、詳細については中津川らの報告⁶⁾を参照されたい。モデルの基礎式を以下に示す。

$$\frac{c_s \rho_s}{2} [Z(T_0 - T_s) - Z_n(T_0 - T_{sn})] + W_0 \rho_s l_f (Z - Z_n) + M_0 \Delta t = G \Delta t \quad (9)$$

$$G = f_v \{ (1 - \alpha) S + \varepsilon L \downarrow \} + (1 - f_v) \varepsilon \sigma T^4 - \varepsilon \sigma T_s^4 - H - IE \quad (10)$$

$$f_v (\varepsilon L \downarrow) + (1 - f_v) \varepsilon \sigma T^4 - \varepsilon \sigma T_s^4 - H - IE + \lambda_s \frac{T_0 - T_s}{Z_n} = 0 \quad (11)$$

ここで、式(9)は時間 Δt で凍結深が Z (m) から Z_n (m)、積雪表面温度が T_s (K) から T_{sn} (K) になったとして、その間のエネルギー収支を、式(11)は厚さ無限小の積雪面の熱収支をあらわしたものである。なお、 c_s, ρ_s は積雪の比熱(J/kg/K)と密度(kg/m³)、 T_0 は 273K、 l_f は融解潜熱(J/kg)、 W_0 は積雪の最大含水率、 M_0 は融雪エネルギー(W/m²)、 G は大気から積雪に与えられるエネルギー(W/m²)、 α はアルベド、 S は全天日射量(W/m²)、 $L \downarrow$ は下向き長波放射量(W/m²)、 ε は積雪面の射出率(0.97)、 σ は Stefan-Boltzmann 定数(=5.670×10⁻⁸Wm⁻²K⁻⁴)、 T は気温(°C)、 H は顕熱量(W/m²)、 IE は潜熱量(W/m²)、 λ_s は積雪の熱伝導率(W/m/K)をあらわす。なお、顕熱量および潜熱量はバルク法により推定する。モデルは植生の影響が考慮できるようになっており、 f_v ; 放射に対する植被層の透過率($f_v = \exp(-F \cdot LAI)$)、 F ; 放射に対する葉面の傾きを表すファクター(=0.5)、 LAI ; 葉面積指数である。上記パラメータの

設定については別途報告⁶⁾を参照されたい。結局，ダム管理所で計測されている気象データ(気温，日射量，湿度，風速)から式(9)で融雪エネルギー M_0 が得られ，融解潜熱と密度で除すことで融雪量を求めることができる。なお，流域の任意個所での融雪量を求めるためには，気温は標高補正(気温減率 $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)したり，日射量は斜面補正をおこなったりする。手法は一見複雑に見えるが，ダム管理所でルーチン的に計測されている気象データだけから融雪量が熱収支的にわかるし，気温だけでなく，日射や風(乱流輸送)によって融雪量が増減する効果も結果に反映できる。

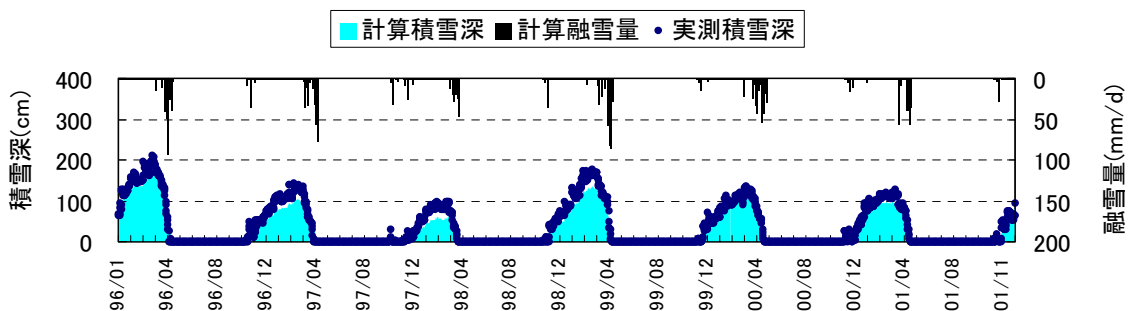
次に積雪浸透を経た後の底面流出量は，次のような一価の線形貯留関数法で表すこととする。

$$s_0 = (k_{01}H_s + k_{02})q_0 = k_0q_0 \quad (12)$$

$$\frac{ds_0}{dt} = [M + R - E] - q_0 \quad (13)$$

ここで， s_0 は積雪貯留量(mm)， q_0 は積雪底面流出量(mm/hr)， k_{01} および k_{02} は係数で各々の単位は(hr/cm)および(hr)， H_s は積雪深(cm)である。すなわち， k_0 は積雪深でパラメタライズされる貯留係数(hr)であるため，積雪深の与え方が鍵となる。積雪深の計算は，数年にわたって安定した再現性が検証されている長期熱・水収支モデル⁸⁾によって日単位の推算をおこなって与えるものとする(図-17参照)。このほか， M は積雪表面融雪量(mm/hr)で先に示した熱収支法から， R は降雨量(mm/hr)でダム管理所での観測値からそれぞれ与える。また， E は雪面蒸発量(mm/hr)であるが，短期間のイベントを考える場合無視できるとした。なお，既往検討結果⁶⁾より， k_{01} で 0.16 (hr/cm)， k_{02} で -8.24 (hr)という値が得られている。この結果は積雪深が $52\text{cm}(=8.24/0.16)$ 以下では貯留効果が無視できることを意味する。

1) ダム管理所地点，標高485m，1996.1.1.~2001.12.31



2) 大二股テレメータ地点，標高760m，1996.1.1.~2001.12.31

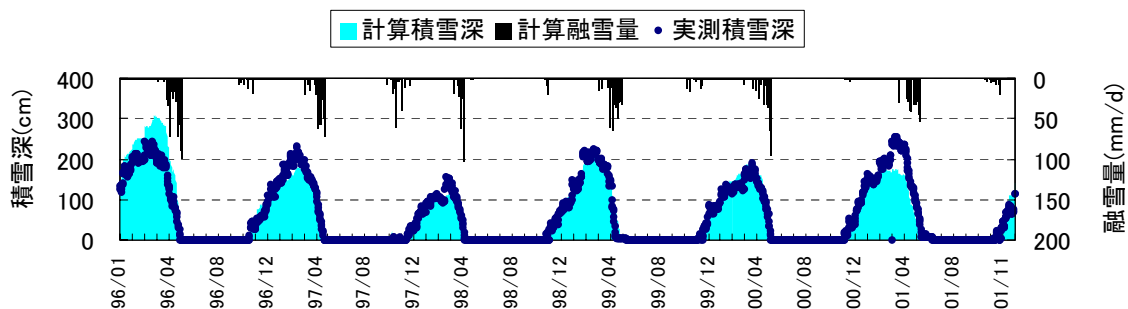


図-17 長期熱・水収支モデルによる積雪深の再現結果(豊平峡ダム)

最後に流出モデルであるが、デグリーアワー法による融雪流出量計算手法と同様に2段階貯留関数法を用いる。この際、式(12)、(13)で計算された q_0 を式(4)の r として与えることになる。流出計算についてはモデル、パラメータとも先に示したものと同じなので説明を割愛する。

(4) 計算結果

最初にデグリーアワー法(DHM)を用いた流入量の計算結果として図-18に定山溪ダムの1996年(平成8年)、図-19に豊平峡ダムの2000年(平成12年)の例を示す。DHMでは定山溪ダムは全般的に再現がうまくいっているが、豊平峡ダムでは2000年5月の出水は概ね再現できているものの、融雪期前半の4月の再現性は悪い。この原因は後で述べるが、融雪期全般を通して汎用的なパラメータ(デグリーアワーファクター)を求め難い場合もある。一方、定山溪ダムのように、一律のデグリーアワーファクターを適用してもある程度の再現性が認められるケースもある。

次に熱収支法と積雪浸透を組み合わせた手法(前節(3))により、DHMで精度の悪かった豊平峡ダム(2000年)のケースについて計算した結果を図-20に示す。2000年の融雪期は3度の豪雨に見舞われており、4月21日1:00から23日24:00までの3日間に168mmの雨が降ったケースでは融雪量を合わせた入力(降雨+融雪)が200mm、総流出高が101mm、ピーク流量が211 m^3/s であった。一方、5月11日1:00から13日24:00までの3日間に102mmの雨が降ったケースでは融雪を合わせた入力(降雨+融雪)が225mm、総流出高が183mm、ピーク流量が300 m^3/s であった。よって、前者は入力(降雨+融雪)に対する流出量の比が0.5と期間中に降ったものが出きらない状態を示すのに対し、後者では0.8とほとんどが流出したと見なせる。つまり、4月22日の時点で流域内に潤沢にある積雪が大きな貯留効果を発揮した一方、積雪のない5月11日の事例では降雨がそのまま流出する状況にあったことが推察できる。結果として図-19

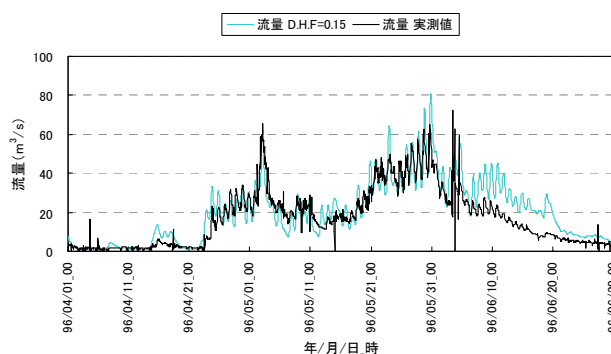


図-18 デグリーアワー法によるダム流入量の再現結果(定山溪ダム 1996年)

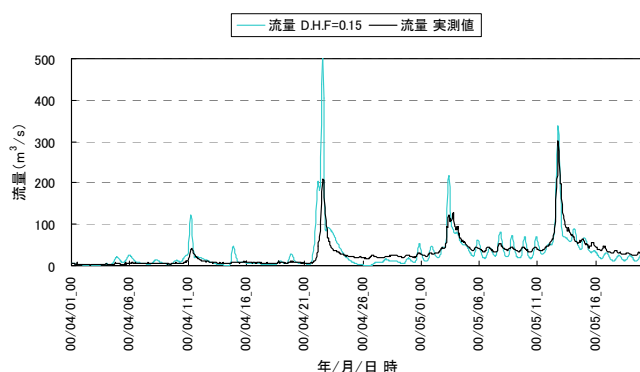


図-19 デグリーアワー法によるダム流入量の再現結果(豊平峡ダム 2000年)

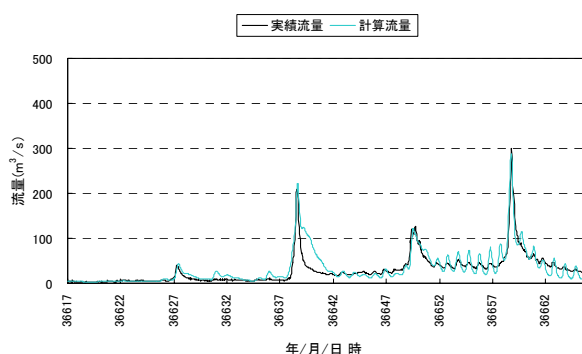


図-20 熱収支法によるダム流入量の再現結果(豊平峡ダム 2000年)

のデグリーアワー法に対し、熱収支・積雪浸透を考慮した方法では融雪期全般にわたるピーク流量がうまく再現できていることがわかる。

図-21 は積雪表面における融雪・降雨量、積雪浸透を経た後の底面流出量、および(流域平均)積雪深の関係を表したものである。結果をみると、積雪の減少にともない、降雨・融雪量ピーク値に対する底面流出量ピーク値が4月22日の大雨

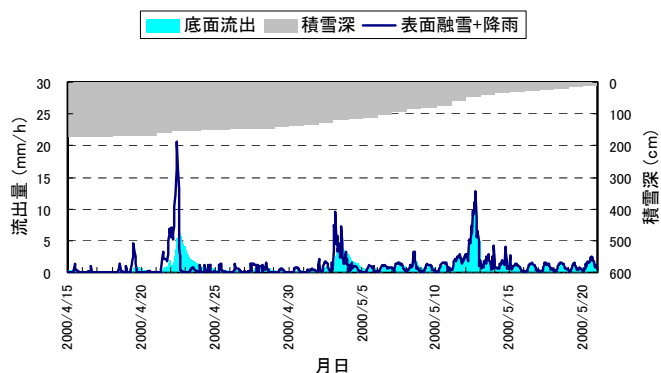


図-21 積雪表面融雪量と底面融雪量の推定結果(豊平峡ダム 2000年)

の際に約3割、5月3日で約5割、5月12日で10割と推移している。すなわち、積雪貯留によるピークカットが流出応答の差となって反映されることをモデルは表現できている。

以上で得られた知見を生かし、今後、ダム管理用のルーチンデータを用い、降雨のみならず融雪についても網羅できる汎用的な流入量の推算、予測手法の構築につなげていきたいと考える。

5. おわりに

得られた知見を以下にまとめる。

- ・ 豊平川上流域の定山溪ダムと豊平峡ダムについて、融雪期のダム流入量を左右する要因を分析した。両者とも積雪量が大きな影響を与えているのは間違いないが、豊平峡ダムについては融雪期の降水量も流入量を左右する重要な要因であることがわかった。
- ・ 統計解析により、両ダムの5月の流入量を積雪包蔵水量、4月の降水量、4月の流入量からある程度推定できることがわかった。
- ・ ダムの空き容量(常時満水位までの容量)と利水放流量、積雪包蔵水量、4-6月降水量の過年度平均を水収支的に整理すると、洪水調節の有無は、定山溪ダムは潜在的に必要なこと、豊平峡ダムは融雪期の降水量に左右されることがわかった。
- ・ ダムの空き容量(常時満水位までの容量)と利水放流量、積雪包蔵水量、4月の降水量、4月の流入量の関係から融雪最盛期である5月の洪水調節(洪水放流)の見通しが概略的に立てられることがわかった。
- ・ デグリーアワー法と適切な流出モデルにより、融雪量とダム流入量を推算できることがわかった。ただし、2000年の豊平峡ダムのように一律のパラメータ(デグリーアワーファクター)を用いた場合、再現性の悪いケースもある。
- ・ 上記の問題を解決するため、熱収支法と積雪浸透効果を考慮した手法を適用し、融雪期全般を通して流入量の再現性が向上できることを確認した。

2005年(平成17年)の冬期は豊平川流域で多量の積雪があり、融雪出水が心配された。そのことを背景に、融雪期はどの程度の出水がいつ起きるのかを前もって見通しが立たないかどうかを考える機

会を得、実際のダム管理でもそのことを気にしながらの運用ができればよいと考えた。融雪期が終了し、それらのことを総括し、分析してみたのが本報告である。この中では、過去と現在においてダムで集約されている水文情報をうまく活用することで、前もって見通しが立てられないか、また、短期的にはどう予測すればよいかについて検討してきた。

なお、過去のデータを分析していくうちに、本年(2005年)融雪期の水文状況は、1996年(平成8年)とかなり類似していることがたまたまわかった。過去の類似例があれば何かと方針が立てやすいのも実際のダム管理上の対応から得られた教訓である。このことから、過去の情報をデータベース化し利用しやすいようにしておくとともに、類似パターンを見いだすような手法やシステム(パターンマッチング法とかNearest Neighbor法など)があれば上記の目的に対し効果的であると考えます。

本報告をまとめる動機は上記のとおりであるが、直接の契機は豊平峡ダム管理支所の越後谷支所長が既往データを用いた洪水調節の見通しについて問題を投げかけたことによる。また、豊平川ダム統合管理事務所、定山溪ダム管理支所、豊平峡ダム管理所の関係者にはとりまとめにあたって協力をいただいた。2005年4月に着任し、放流などで夜中に事務所にいるとき、会計検査で待機しているときの合間をみてこのような材料を収集分析し、書きためたものを7月1日付けで豊橋河川事務所に異動するまでの3ヶ月で何とかまとめることができた。ここに記してご協力いただいた関係各位に深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 中津川誠・星 清：融雪期に豪雨が相俟って生起する出水の予測について，河川技術論文集，第7回，pp.453-458，2001.
- 2) 臼谷友秀・中津川誠：北海道における冬期温暖化の傾向と水循環へ与える影響，地球環境シンポジウム論文集，第13回，pp.1-6，2005.
- 3) 園山裕士・星 清・橋本識秀：実用的2段タンク型貯留関数法の提案，土木学会北海道支部論文報告集，第58号，pp.336-339，2002.
- 4) 石狩川開発建設部豊平川ダム統合管理事務所：平成7年度豊平川流域積雪調査業務報告書，1996.
- 5) 園山裕士・星 清：2段タンク型貯留関数モデルの同定手法の改良，北海道開発土木研究所月報，No.589，pp.67-78，2002.
- 6) 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.
- 7) Kondo, J. and Yamazaki, T. : A prediction model for snowmelt, snow surface temperature and freezing depth using a heat balance method, J. Appl. Meteor. , 29, pp.375-284, 1990.
- 8) 中津川誠・濱原能成・星 清：積雪変化を考慮した長期流出計算，水工学論文集，第47巻，pp.157-162，2003.