

アイスダム決壊によるダム湖の流入流量の急激な増水

吉川 泰弘* 秋山 泰祐** 山田 知充*** 巖倉 啓子****

1. はじめに

ダム管理者は水位を常時監視しており、治水、利水、環境を念頭に置き、適時、水位を調整するためのダム操作を実施している。積雪寒冷地のダムにおいては、毎年、春先になると融雪出水が起る。融雪は、日出から正午にかけてピークを迎え、日没には終了する。融雪水の流出は、一般に正午から日没頃にかけて増加して、翌日の日出頃には終了する。このため、融雪期のダム操作は、実質、24時間の監視体制となる。

このような状況の中、図-1に示す北海道北部に位置する朱鞠内湖（雨竜第一ダム）において、融雪期の2003年4月17日19時に60m³/sであった流入流量が、その8時間後の18日3時には160m³/s、その1時間後の18日4時には330m³/sとなり、また、その2時間後の18日6時には58m³/sと、わずか1~2時間でダム設計洪水量365m³/sの直近330m³/sまで達する増水が観測された。一方、朱鞠内湖に隣接する宇津内湖（雨竜第二ダム）では、急激な増水は観測されていない。この期間の朱鞠内湖と宇津内湖の流入流量を図-3,4に示す。

今回の急激な増水は、雨竜第一ダムで堰き止められた日本で最大の湛水面積23.70km³を持つ朱鞠内湖に流れ込んだため、湖水位を僅かに上昇させただけで済んだが、このような現象がダムの整備されていない流域で発生したならば、洪水被害が発生した可能性が高い。本論文では、このような現象が条件さえ揃えば日本の融雪期にどこにでも起こり得るので注意を喚起するとともに、この現象の規模と原因を検討した。増水の規模は、融雪量と雨量から推定されるダムへの流入流量と実際の流入流量の差から見積った。この現象が発生した直後に実施した現地調査によって、母子里流域の合流点付近にアイスジャムによる天然ダム形成の痕跡が確認され、アイスダムの崩壊が原因である可能性の高いことが推測されていた。このアイスダムによる貯水量が増水の規模と一致することを検証し、この現象の原因がアイスダムの決壊による洪水であったことを明らかにした。

なお、ダムへの流入流量、即ち河川流量は、湖水位の変化から算出されるダム貯留量と、それ以外のダムへの流入出量を用いて算出される。湛水面積とはダム湖の常時満水時における表面積である。「アイスジャム (Ice Jam)」は日本語で閉塞氷といい、「アイスダム (Hanging (Ice) Dam)」は日本語で懸垂氷堰という。これらの訳は、IAHR (International Association for Hydraulic Research 国際水理学会) の多国語水術語集²⁾の出版に際して、日本では11名で構成される委員会を立ち上げて、この委員会の中で決定した日本語訳¹⁾である。また、アイスジャムとアイスダムは以下のよ

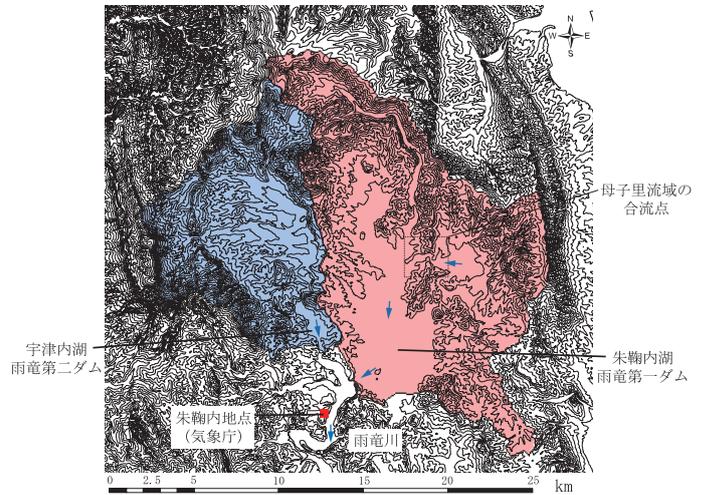
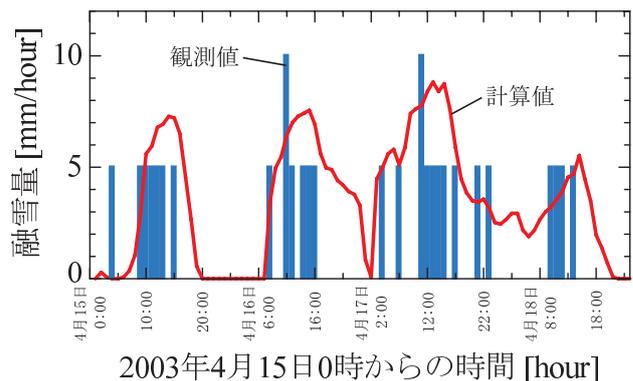


図-1 朱鞠内湖と宇津内湖の流域図



2003年4月15日0時から時間 [hour]

図-2 融雪量の観測値と計算値

うに訳されている¹⁾。アイスジャム：与えられた場所における氷の蓄積で、川の中において水の流れを制限するもの。アイスダム：流水の速度の小さい場所において、結氷板の下にある氷泥または壊れた氷から、主として成り立つ氷の塊。

2. 融雪期のダム湖への流入流量の算出

朱鞠内湖と宇津内湖の流域図である図-1は、国土数値情報標準地形メッシュ(50m) データから、ArcGIS((株)ESRI ジャパン)を用いて流域界、流域面積を求め、標高30m毎のコンターで図示している。流域面積は、朱鞠内湖203.21km²、宇津内湖107.44km²で、朱鞠内湖は宇津内湖の約2倍の流域面積である。各流域において、流域平均の融雪量と雨量を入力値として、融雪流出計算を実施した。

(1) 流域の平均融雪量

融雪量の算出は、簡便のため、式(1)に示す気温を独立変数とする融雪係数法³⁾を用いた。

$$M = k_m (T - T_0) \quad (1)$$

M [mm/hour]: 融雪量、 k_m [mm/hour/°C]: 融雪係数、 T [°C]: 時刻気温、 T_0 [°C]: 融雪が起こり得る対象期間中の最低時刻気温である。観測データは、図-1に示す気象庁の朱鞠内地点の1時間毎のデータを用いた。 T_0 は観測データから $T_0=2$ °Cとした。

k_m の算出について、まず、式(2)から融雪量 M を算出した。

$$M = \frac{\rho_s}{\rho_w} h_s \quad (2)$$

式(2)の融雪深 h_s [mm/hour]は観測された積雪深の差を与え、雪の密度 ρ_s [kg/m³]は融雪期の値⁴⁾である500kg/m³、水の密度 ρ_w [kg/m³]は1000kg/m³とした。

次に、算出した融雪量 M と観測データの時刻気温 T を式(1)に代入して、1時間毎に k_m を求め、その平均値 $k_m=0.7$ を得た。図-2に、式(1)から求めた融雪量(計算値)と、式(2)から求めた融雪量(観測値)を示す。図-2より、観測値と計算値は良く一致している。

流域の平均融雪量の算出について、まず、ArcGISから得られたデータを用いて、式(3)から流域平均標高 \bar{z} を求めた。

$$\bar{z} = \frac{\sum (z_i N_i)}{N_a} \quad (3)$$

ここで、 \bar{z} [m]: 流域平均標高、 z_i [m]: 標高、 N_i : 標高 z_i のメッシュ(50m × 50m)の総数、 N_a : 流域内のメッシュの総数である。式(3)から、朱鞠内湖流域の平均標高376.36m、宇津内湖流域の平均標高485.93mが得られた。

次に、式(4)から気温の標高補正を行った。

$$\bar{T} = T' - \lambda(\bar{z} - z') \quad (4)$$

ここで、 \bar{T} [°C]: 流域平均気温、 T' [°C]: 観測地点の気温、 λ [°C/m]: 気温減率で0.006与えた。 z' [m]: 観測地点の標高とした。気象庁の朱鞠内地点は標高255mである。式(4)から得られた流域平均気温 \bar{T} を、式(1)に代入して流域の平均融雪量を算出した。

(2) 流出計算

計算期間は2003年4月15日0:00から4月19日0:00の96時間とした。流出計算は、式(1)より算出した流域平均融雪量と流域内で観測されている流域平均雨量を足した値を入力値として、星ら⁷⁾の損失項を含む貯留関数法(1段タンク型貯留関数モデル: 単流域解析)を用いた。流出計算で最適化されたモデル定数を表-1に示す。C1はハイドロ形、C2はピーク時期、C3は流出率に関する値である。なお、この流出計算モデルは、融雪出水へと適用した既往研究⁵⁾⁶⁾があり、計算値は観測値を良く再現している。

表-1 流出計算のモデル定数

ダム	C1	C2	C3
朱鞠内湖(第一ダム)	56.6350	0.0288	2.8086
宇津内湖(第二ダム)	43.2904	0.0593	2.5661

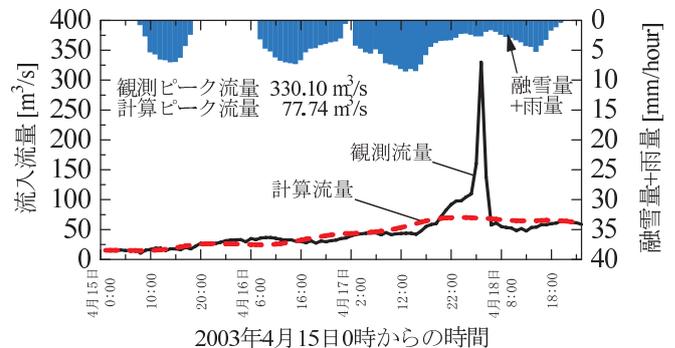


図-3 朱鞠内湖(雨竜第一ダム)への流入流量の観測値と計算値

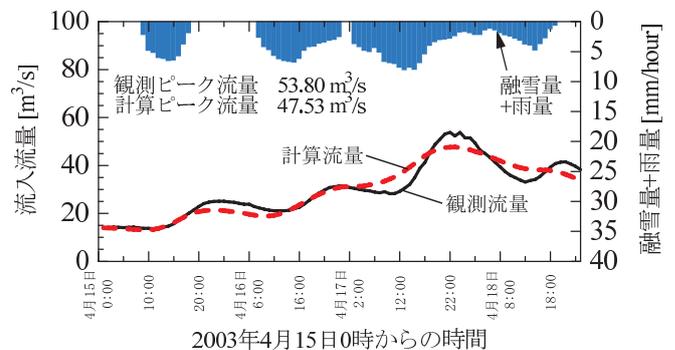


図-4 宇津内湖(雨竜第二ダム)への流入流量の観測値と計算値

流入流量の観測値と計算値について、朱鞠内湖を図-3に、宇津内湖を図-4に示す。流入流量の急激な変化があった朱鞠内湖では、特にピーク付近で観測値と計算値が一致していないのに対して、急激な変化がなかった宇津内湖では、計算値は観測値を良く再現している。

計算値である融雪による朱鞠内湖への通常の流入量と観測された流入量との差は、急激な変化前の4月17日19:00から変化後の4月18日6:00の11時間の期間において、2,090,000m³に達していることが分かった。このことは、今回の流入流量の急激な増水は、従来から実施されている雪が解けて時間の経過とともに融雪水が流出する計算モデルでは、説明できないことを示している。

(3) 流入流量の急激な増水の原因

北海道電力では、流入流量の急激な変化後の4月24日に朱鞠内湖に合流する太釜別川および母子里流域の合流地点の調査を実施している。この調査結果では、母子里流域の合流点付近において、3~4m程度の水位上昇の痕跡が確認されており、写真-1に示す合流点付近の河岸においては、河水が解氷している状況が確認さ



写真-1 母子里流域と朱鞠内湖との合流点付近の河岸
(提供：北海道電力)

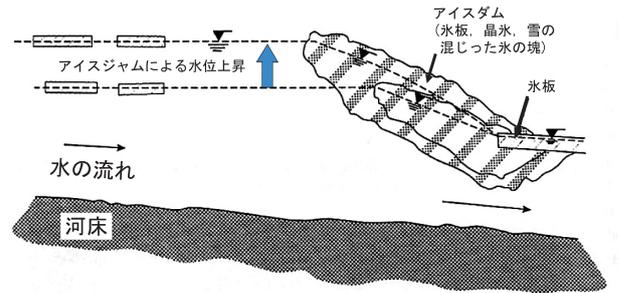


図-6 アイスジャムによる水位上昇の概念図⁹⁾

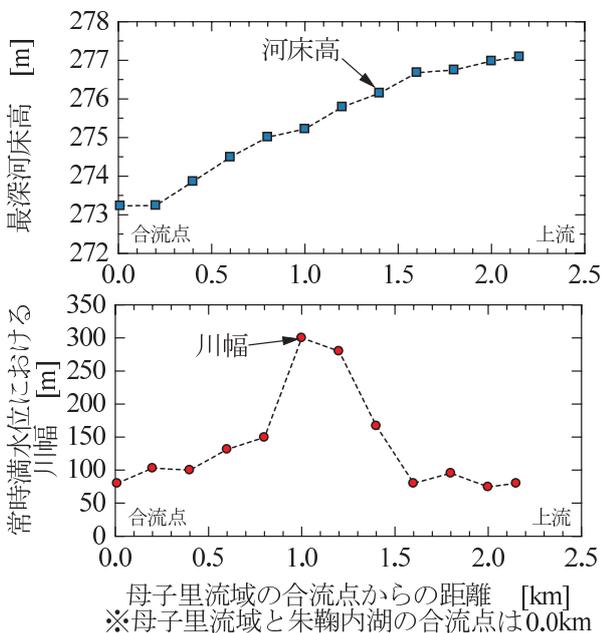


図-5 母子里流域の縦断的な川幅と河床高 (2009年8月測量)

れている。

河水の厚さについては、Stefan の式 (5) を用いると約 30cm が見積もられた。式 (5) において、 h_i [cm]: 氷板厚、 S [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$]: 積算寒度、 a : 定数であり $a=1$ を与えた⁸⁾。積算寒度とは計算開始日からマイナスの気温を積算した絶対値である。

$$h_i = \alpha \sqrt{S} \quad (5)$$

母子里流域の合流点から上流の痕跡水位から推定した水量は $1,820,000\text{m}^3$ 、融雪に起因する通常の流入量に比べて多く流入してきた流量は計算結果から $2,090,000\text{m}^3$ であり、この両者はオーダーでみると近い水量となっている。一方、図-5 に示す母子里流域の縦断的な川幅をみると、合流点から 1km 上流では 300m であるが合流点では 80m であり、合流点に近づくほど川幅が狭くなっている。また、図-5 の河床高をみると、合流点付

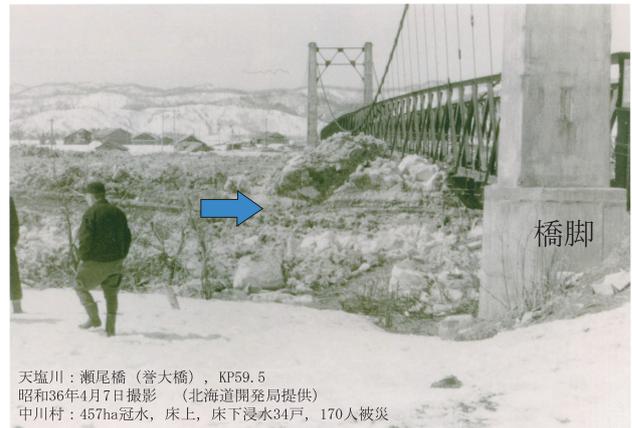


写真-2 天塩川の旧瀬尾橋 (誉大橋) におけるアイスジャムの状況 (提供：北海道開発局)

近で河床勾配が緩やかになっている。このことは、上流から流下してきた約 30cm 厚の河水および雪が、川幅が狭く河床勾配が緩い合流点において滞留および閉塞してアイスジャムが発生し、アイスジャムによりアイスダムが形成され、融雪水はこの地点を起点として上流に一時的に貯留され、その後、アイスダムが急激に壊れて朱鞠内湖へと融雪水が急激に流入したことを示している。なお、ダム貯留量は湖水位の変化により算出され、結氷期においては水位計が結氷することによる測定誤差が考えられるが、増水中の 4 月 18 日 3 時頃の水位計の点検から問題がないことを確認している。

ここで、アイスジャムによる水位上昇について概説する。図-6 は、上流から流れてくる河水 (氷板、晶氷、雪) が、ある地点で滞留および閉塞してアイスジャムが発生しアイスダムが形成され、このため水の流れる面積が小さくなり、この地点より上流の水位が上昇する現象を表わしている。河水が滞留および閉塞する地点について、図-6 では氷板が存在する地点となっているが、この他に川幅が狭くなる狭窄部、勾配が緩くなる蛇行部、河積が阻害される橋脚箇所においても、河水が滞留および閉塞する地点となり得る。

今回のような日本のアイスジャムの問題は、結氷した一級河川においても起こっている。昭和 36 年 4 月 4 日から 5 日にかけて北海道の中川村で、天塩川においてアイスジャムによる洪水が発生し、457ha の冠水、床上床下浸水が 34 戸、170 人が被災、農作物を含む肥料

などの被害（当時の貨幣価値で 1,256 千円）を受けた事例¹⁰⁾がある。当時の状況を写真-2に示す。写真-2は左側が上流であり、河水が橋脚の上流側で滞留および閉塞し、アイスジャムが発生していることが分かる。アイスジャムは条件さえ揃えば日本の融雪期にどこにでも起こりえる現象であり、アイスジャムに関する知見は、積雪寒冷地の河川およびダム防災管理を行う上において重要であると言える。

3. まとめ

2003年4月融雪期において朱鞠内湖の流入流量の急激な増水が観測された。この増水量は、観測値および計算値から2百万m³のオーダと見積もられた。急激な増水の原因は、朱鞠内湖へ流入する河川の狭窄部において、アイスジャムが発生し、天然ダムであるアイスダムが形成された。このため一時的に雪解け水が通常水位より3~4mも上昇するほど貯留された後、アイスダムが決壊したことによる。このようなアイスジャムは条件さえ揃えば日本の融雪期にどこにでも起こりえる現象であり、積雪寒冷地の河川およびダム防災管理上、注意を喚起したい。

謝辞：本研究は、北海道電力株式会社からの資料提供により、実施することが可能となりました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 久保義光：氷工学序説，氷工学刊行会，pp173-179，1980.
- 2) IAHR, Section on Ice Problems : MULTILINGUAL ICE TERMINOLOGY , ADDENDUM I, Research Centre for Water Resources Budapest, 1980.
- 3) 兒玉裕二, 福沢卓也, 竹内由香里：大雪山ヒサゴ雪溪の融雪係数, 低温科学, 物理編, 資料集, 第52号, pp.39-47, 1994.
- 4) 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, 土木学会, 水工学論文集, 第52巻, pp.493-498, 2008.
- 5) 中津川誠, 白谷友秀：水文情報の総合化による融雪期ダム流入量の推算, 北海道河川防災研究センター, 研究所紀要 (XVII), 2006.
- 6) 八田茂実：豪雪地帯における貯水池の融雪流入予測に関する研究 (3), 北海道河川防災研究センター, 研究所紀要 (XIX), 2008.
- 7) 北海道開発土木研究所, 北海道防災研究センター：対話式洪水流出計算マニュアル, 第2版, 2005.
- 8) 吉川泰弘, 渡邊康玄, 早川博, 平井康幸：結氷河川における氷板下の晶氷厚の連続測定と氷板の形成要因, 寒地土木研究所月報, No.680, pp.21-31, 2010.
- 9) Beltaos, S : RIVER ICE JAMS , Water Resources Publications LLC , 1995.
- 10) 天塩川治水史：旭川開発建設部, 留萌開発建設部監修, 北海道開発協会発行, pp385, 1988.



吉川 泰弘*
Yasuhiro YOSHIKAWA

寒地土木研究所
寒地水圏研究グループ
寒地河川チーム
研究員



秋山 泰祐**
Yasuhiro AKIYAMA

国土交通省
北海道開発局
旭川開発建設部
特定治水事業対策官



山田 知充***
Tomomi YAMADA

NPO 法人 雪氷ネットワーク
理事長



巖倉 啓子****
Keiko IWAKURA

国土交通省
北海道開発局
開発調整課
課長補佐