

# 寒冷地河川における水深上昇を考慮した 解氷時期推定手法の開発

## DEVELOPMENT OF BREAK-UP PERIOD ESTIMATION METHOD IN ICE-COVERED RIVERS

吉川泰弘<sup>1</sup>・寺崎海斗<sup>2</sup>・横山洋<sup>3</sup>

Yasuhiro YOSHIKAWA, Kaito TERASAKI and Hiroshi YOKOYAMA

<sup>1</sup>正会員 博(工) 北見工業大学工学部 准教授 (〒090-8507北見市公園町165)

<sup>2</sup>非会員 前 北見工業大学工学部 (〒090-8507北見市公園町165, 現 中央コンサルタンツ株式会社)

<sup>3</sup>正会員 博(工) 土木研究所寒地土木研究所寒地河川チーム (〒062-8602札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

It is important to estimate the timing of the ice jam before it occurs. This study's aim is the development of break-up period estimation method that uses easily available meteorological data as an input value, focusing on the break-up that occurs before the ice jam phenomenon. The break-up phenomenon was newly summarized based on the field observation. We constructed a computational model that reproduces the phenomenon. This means that the temperature rises and the snow melts, and this snowmelt water and rainwater flow into the river, increasing the water depth. The peak value of the calculated water depth appeared before the ice jam. This result indicates that countermeasures can be prepared before ice jam occurs. If you enter the predicted value of the weather, you can estimate in advance.

**Key Words :** *Ice-covered rivers, ice jam, break-up, computational model, water depth, air temperature, snowmelt water, rainwater*

### 1. はじめに

冬の寒冷地河川では、河道内の氷の挙動によって特有の被害が発生する。河氷の挙動を①形成、②解氷(融解・破壊)、③流下堆積、④再流下に区分すると、③流下堆積時において被害が発生しやすい。その主なものとして以下が挙げられる。「河氷が河道内で堆積するアイスジャムによって、流水を堰き止めて急激に水位を上昇させて溢水を引き起こす」「河氷が取水口に堆積し閉塞させることによって、取水障害を引き起こす」。特に、河川管理および河川工事を実施する上では、急激な水位上昇を引き起こすアイスジャムが、いつ、どこで、どの程度の規模で発生するのかについての知見が求められており、また事前に推定する技術が求められている。

「どこで、どの程度」については、アイスジャムスケール<sup>1)</sup>で把握する手法が提案されている。「どこで」は、実際にアイスジャムが発生した場所をアイスジャムスケールにより抽出が可能である。「どの程度」は、検討が必要ではあるが、アイスジャムスケールの値との関係が推察されている。「いつ」に関する既往研究<sup>2)3)</sup>で

は、計算モデル<sup>4)</sup>を用いて河氷の厚さの経時変化を求め、河氷厚が減少する時期とアイスジャムが発生した時期を比較して、河氷厚から推定する手法が試みられている。しかし、河氷厚だけでは十分には推定できず、要因として気温上昇による融雪や降雨による水深上昇による解氷現象を考慮していないことが指摘<sup>5)</sup>されている。

本研究は、アイスジャムが「いつ」発生するのかを事前に推定することを念頭に置き、現場での運用を考慮して入手しやすい気象データを用いて、アイスジャムが発生する前の現象、特に河氷破壊による解氷に着目し、解氷の予兆である水深変動を計算する解氷時期推定手法の開発を目的とした。現地観測に基づいて解氷現象を整理し、気温上昇により融雪が促され、融雪水と降雨が河川へと流入して水深が上昇する現象を再現する解氷時期推定モデルを構築し、本計算モデルの検証を実施した。

### 2. 解氷時期推定モデルの構築

水面に氷が存在しない秋から水面に氷が存在しなくなる春までの河氷の挙動について、Shen<sup>6)</sup>は流れ図で解説

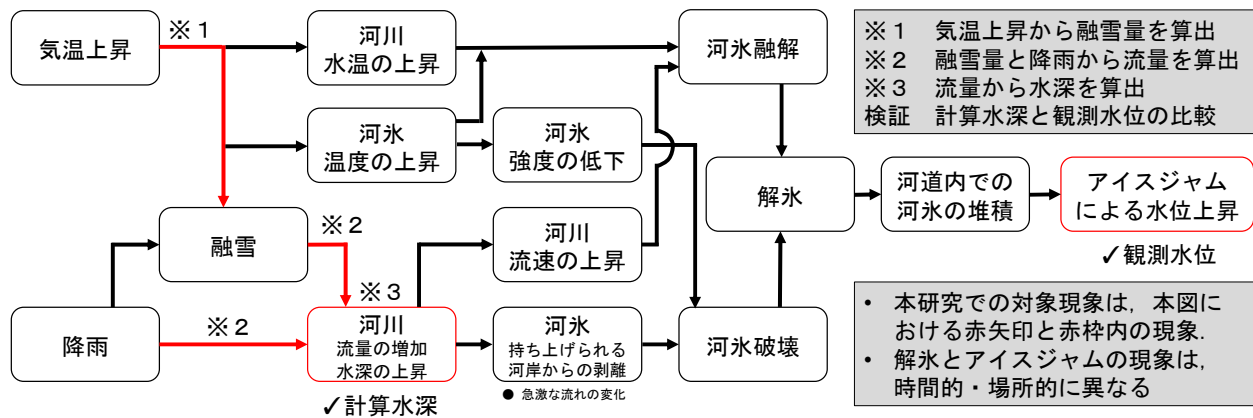


図-1 解氷現象に関する流れ図

している。一方で、この流れ図において解氷に至るまでの過程は十分には明らかにされていない。本研究では、著者らの過去の現地観測結果<sup>9)</sup>に基づき、新たに解氷現象を流れ図で整理した。作成した流れ図を図-1に示す。なお図-1は、上記の河氷の挙動である②解氷(融解・破壊)、③流下堆積の現象を対象とした。

本研究で対象とする現象は、図-1において赤矢印と赤枠内の現象である。本計算モデルでは、気温上昇により融雪が促され、融雪水および降雨が河川へと流入して、水深を上昇させる現象を再現した。その後、計算水深とアイスジャムによる観測水位の関係を検討した。

### (1) 気温上昇から融雪量 (図-1 ※1の現象)

気温上昇による融雪量の増加は、既往研究<sup>7)</sup>を参考に1時間毎の融雪量を求める次式のDegree-hour法を用いた。

$$SM = T \cdot K \quad (1)$$

$SM$ [mm/h]: 1時間毎の融雪量,  $T$ [°C]: 1時間毎の気温(入力値),  $K$ [mm/h・°C]: 融雪係数であり $1.7 \div 24$ を与えた<sup>8)</sup>。気温が $0^\circ\text{C}$ 以上<sup>7)</sup>の場合に融雪するものとした。なお本式の適用時期は、流域内に積雪が存在している解氷前の時期となる。

### (2) 融雪量と雨量から流量 (図-1 ※2の現象)

流量を算出する前に、次式を用いて有効融雪量と有効雨量を求めた。

$$SM_e = SM \cdot f \quad (2)$$

$$r_e = r \cdot f \quad (3)$$

$$r'_e = SM_e + r_e \quad (4)$$

$SM_e$ [mm/h]: 有効融雪量,  $f$ [無次元]: 流出係数であり、各河川の流出係数は山地河川の値<sup>9)</sup>である $0.75$ を与えた。  
 $r_e$ [mm/h]: 有効雨量,  $r$ [mm/h]: 雨量(入力値),  
 $r'_e$ [mm/h]: 有効融雪量と有効雨量の和である。

次に準線形貯留型モデル<sup>10)</sup>を用いて流出高を求めた。概念図を図-2に示し、計算式を次式に示す。

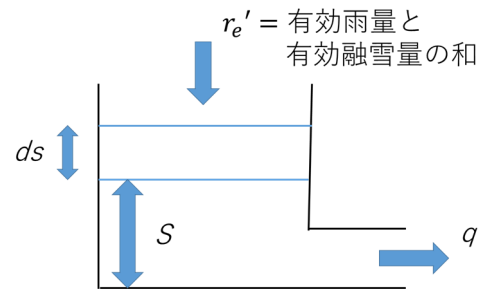


図-2 準線形貯留型モデルの概念図

$$\frac{ds}{dt} = r'_e - q \quad (5)$$

$$S = k'q \quad (6)$$

$$k' = \frac{t_c}{2} \quad (7)$$

$q$ [mm/h]: 流出高,  $S$ [mm]: タンクの貯留量,  $k'$ [h]: 貯留係数,  $t_c$ [h]: 洪水到達時間であり、次式に示す角屋・福島の式<sup>11)</sup>を用いた。

$$t_c = CA^{0.22}r_e'^{-0.35}/60 \quad (8)$$

$A$ [km<sup>2</sup>]: 流域面積,  $C$ [無次元]: 土地利用形態に準ずる定数<sup>11)</sup>であり、自然丘陵山地として $290$ を与えた。 $t_c$ の単位はminからhourにするために単位変換を行った。本研究の $t_c$ は、過去のアイスジャムによる氾濫が発生した時期の $r_e'$ を式(8)に与えて洪水到達時間を算出し、それらの値を平均して値を与えた。

式(6)を式(5)に代入し既往研究<sup>12)</sup>を参考にして、1次のテイラー展開で表すと次式となる。

$$q_2 = \frac{\frac{\Delta t}{2}(r_{e1}' + r_{e2}') - q_1(\frac{\Delta t}{2} - k')}{k' + \frac{\Delta t}{2}} \quad (9)$$

$q_2$ [mm/h]: 流出高,  $q_1$ [mm/h]: 1時間前の流出高,  
 $r_{e1}'$ [mm/h]: 有効雨量と有効融雪量の和,  $r_{e2}'$ [mm/h]: 1時間前の有効雨量と有効融雪量の和,  $\Delta t$ [h]: 時間であり、 $1$ を与えた。式(4)と式(7)の値を式(9)に代入して流出高を求めた。

次に流量 $Q$ [m<sup>3</sup>/s]を次式により求めた。

$$Q = \frac{A \times q_2}{3.6} \quad (10)$$

### (3) 流量から水深 (図-1 ※3の現象)

水深は、次式のマンニングの平均流速公式を用いて流量から求めた。なお、求める水深は等流水深となる。

$$h = \left( \frac{Qn}{\sqrt{i_0}B} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (11)$$

$h$ [m] : 水深,  $n$ [s/m<sup>1/3</sup>] : 粗度係数で0.03を与えた。  
 $i_0$ [無次元] : 河床勾配,  $B$ [m] : 川幅である。

以上の手法により、気温上昇により融雪が促され、融雪水および降雨が河川へと流入して、水深を上昇させる現象を計算式で再現した。なお、以後の検討で用いた各河川の定数を表-1に示す。

### 3. 解氷時期推定手法の現地への適用

本計算モデルは、解氷現象自体を推定するものではなく、解氷の要因となる水深の上昇を推定するものである。検証に当たり、実際にアイスジャムが発生し水位が上昇している現象を対象にして、アイスジャム発生による水位上昇の前に、本計算モデルによる計算水深が上昇するかに着目して検証した。

対象としたアイスジャム現象は、降水量が多く、かつ気温が上昇したことが影響したと推察されている以下の2つとした。2018年3月8日から9日にかけて、温帯低気圧が発達しながら北海道を通過し季節外れの大雨と暖気をもたらした結果、北海道の多くの河川で比較的規模の大きい出水がみられ、その出水により結氷河川でのアイスジャムが発生した。2020年3月10日から11日にかけて気温上昇と降雨が重なり、2018年よりは規模は小さいものの道内の複数河川でアイスジャムが発生した。対象河川は、2018年3月では網走川、浦幌川、2020年3月では網走川、浦幌川、オサラッペ川とした。

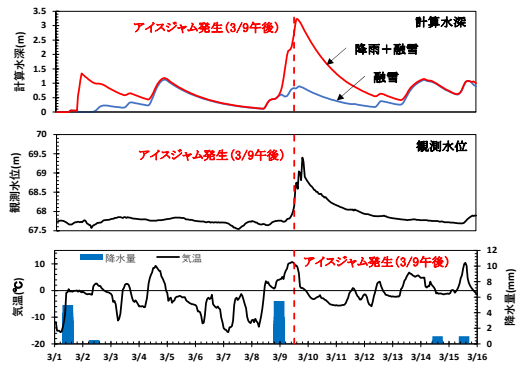
図-3は2018年3月の2河川、図-4は2020年3月の3河川の観測水位と計算水深、近傍観測所の毎時の気温と降水量を示す。計算期間は、3月1日から3月16日までとした。なお、降雨と融雪の計算水深への影響を把握するために、全流量に対する雨量による流量の比と、全流量に対する融雪量による流量の比を用いて、計算水深を分離した。

網走川(図-3(a)、図-4(a))において、アイスジャム発生時刻は、2018年3月9日午後(時刻は不明)であり、2020年3月11日9時である。2018年は発生時刻が不明であるが、各ピークは同時期となり、計算水深はアイスジャム発生前に推定出来ていると考察した。2020年は計算水深のピークはアイスジャム発生時よりも早く、アイスジャム発生前に推定が出来ている。

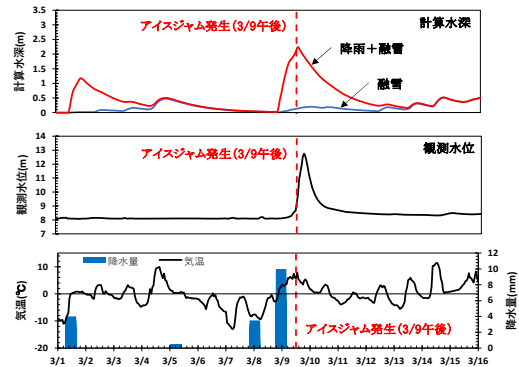
浦幌川(図-3(b)、図-4(b))において、アイスジャム発

表-1 解氷時期推定モデルに用いた各河川の定数

河川名	河床勾配	水面幅 [m]	流域面積 [km <sup>2</sup> ]	洪水到達時間 [h]	アメダス観測所
網走川	1 / 232	24.00	1380.0	43.45	津別
浦幌川	1 / 1106	92.00	483.0	33.90	浦幌
オサラッペ川	1 / 697	24.00	195.5	36.50	旭川



(a) 網走川津別観測所 (津別アメダス)



(b) 浦幌川KP0.2 (浦幌アメダス)

図-3 各河川のアイスジャム発生時の観測水位と計算水深 (2018年3月)

生時刻は、2018年3月9日午後(時刻は不明)であり、2020年3月11日9時である。網走川と同様に計算水深は、アイスジャム発生前に推定出来ている。一方で、浦幌川の計算水深のピーク値は、網走川に比べて小さい。表-1より、浦幌川は網走川に比べて、水面幅が大きく流域面積が小さいことが、計算水深が小さい要因として考えられる。

オサラッペ川(図-4(c))において、アイスジャム発生時刻は、2020年3月11日14時である。計算水深のピークはアイスジャム発生時の観測水位と同時期である。

アイスジャム発生時の観測水位と計算水位のピーク値の差異について考察する。図-3、4より、本計算モデルの計算水深は、アイスジャム発生時の観測水位よりも前にピーク値を示している。2018年の網走川では4時間、浦幌川では5時間ほど計算水深が観測水位よりも先行している。2020年でも網走川では10時間、浦幌川では7時間、オサラッペ川では1時間と計算水深が観測水位よりも先行している。この要因として図-1より、本計算モデルの計算水深(図-1の赤枠下「✓計算水深」)に関する現

象)と、アイスジャムによる観測水位(図-1の赤枠下「✓観測水位」に関する現象)では、現象の時間的な遅れがあるためと考えられる。

#### 4. まとめ

アイスジャム発生を事前に推定する手法として、解氷の要因となる水深の上昇を推定する計算モデルを開発した。計算水深は、アイスジャム発生前にピーク値が現れるため事前に体制を組みやすい。入力値は入手しやすい気象データであり、日本気象協会の10日間天気予報データも利用可能であり汎用性が高く、事前の推定が可能である。さらに、解氷現象の河氷破壊に着目した本計算手法と、解氷現象の河氷融解に着目した既往手法<sup>2)</sup>を併用することで、アイスジャム発生が「いつ」発生するかを事前に精度よく推定することが可能となる。

謝辞：本研究は、北海道河川財団の研究助成、JSPS科研費、JP18K04361、JP17H01870の助成を受けた。

#### 参考文献

- 1) 横山洋, 吉川泰弘, 伊波友生, 前田俊一, 矢部浩規: 2018年3月北海道アイスジャム洪水による被害の現象解明と今後の課題, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.5, pp.I\_1039-I\_1044, 2018.
- 2) 横山洋, 吉川泰弘, 伊波友生, 矢部浩規: 結氷河川における解氷期の河氷挙動と解氷の簡易予測手法の検討, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.75, No.2, pp.I\_931-I\_936, 2019.
- 3) 横山洋, 吉川泰弘, 伊波友生, 矢部浩規: 2020年3月に発生したアイスジャムの現地調査および発生リスクの評価, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.76, No.2, pp.I\_157-I\_162, 2020.
- 4) 吉川泰弘, 渡邊康玄, 早川博, 平井康幸: 結氷河川における解氷現象と実用的な氷板厚計算式の開発, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.1, pp.21-34, 2012.
- 5) Shen,H.T.: Mathematical modeling of river ice processes, Cold Regions Science and Technology 62, pp.3-13, 2010.
- 6) 小池太郎, 吉川泰弘, 横山洋, 伊波友生, 川邊和人: 2018年3月に常呂川で発生したアイスジャム現象の解明, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.76, No.2, pp.I\_163-I\_168, 2020.
- 7) 河島克久, 飯倉茂弘, 杉山友康, 遠藤徹, 藤井俊茂: 鉄道防災に適用可能な日融雪量の簡易推定方法, 日本雪氷学会誌, 64巻, 6号, pp.605-615, 2002.
- 8) 宮田俊介, 朝岡良浩, 風間聡: 全国のAMeDAS観測点におけるDegree-day法および融雪係数の検証, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.4, pp.I\_343-I\_348, 2012.

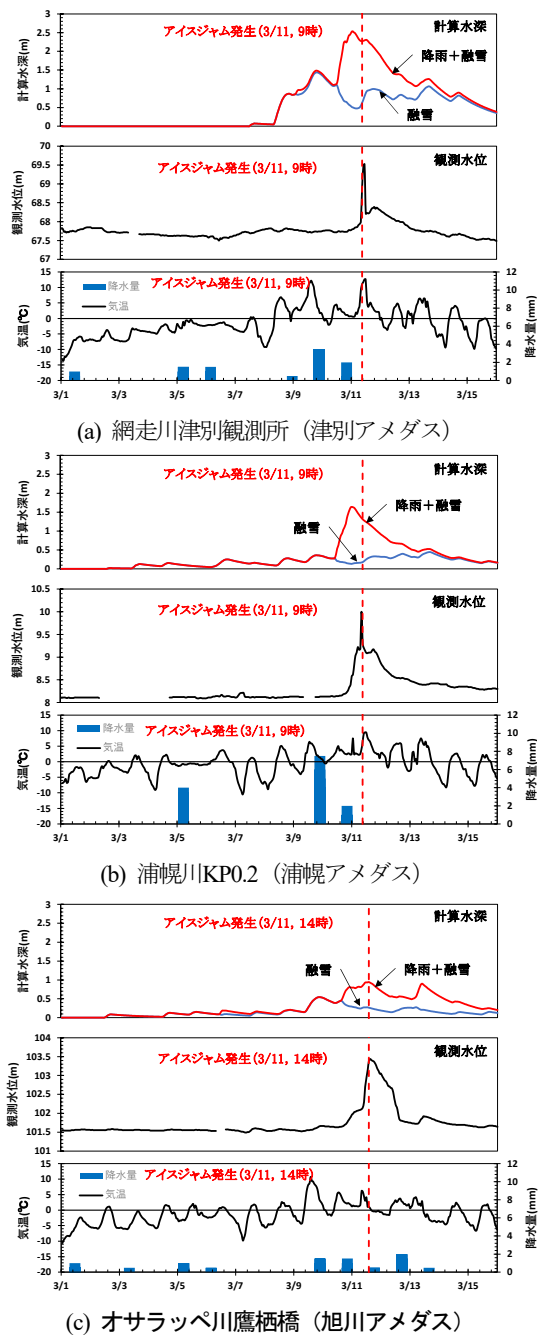


図-4 各河川のアイスジャム発生時の観測水位と計算水深(2020年3月)

- 9) 国土交通省河川砂防技術基準調査編: 国土交通省, 水管理・国土保全局, 第3章, 第2節, p.11, 平成26年4月.
- 10) 橋本健, 森田正: 土地利用変化を評価する洪水流出モデルに関する研究, 土木学会論文報告書, 第325号, pp.45-50, 1982.
- 11) 角屋睦, 福島晟: 中小河川の洪水到達時間, 京大防災 研究所年報, 第19号B, 昭和51年4月, pp.143-152. 1976.
- 12) 岡本芳美: 流出計算マルチ・タンク・モデルに基づく分割法について (I), 水利科学, 55巻, 3号, pp.1-21, 2011.

(2021.4.2受付)