

寒冷地河川における水深上昇に基づいた簡易的な解氷時期予測手法の検討

Examination of a simple ice-breakup time prediction formula based on rising water depth in cold region rivers

北見工業大学
北見工業大学
寒地土木研究所

○学生員 寺崎海斗 (Kaito Terasaki)
正員 吉川泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)
正員 横山洋 (Hiroshi Yokoyama)

1. はじめに

冬期の北海道の河川では、気温が低下すると河道内に河氷が形成され、解氷期になると気温上昇や降雨により河氷が融解・破壊されて流下する。これらの流下した河氷が流速の遅い箇所などで堆積しアイスジャムが発生する。アイスジャムは急激な水位上昇や浸水、死亡事故¹⁾、取水口の閉塞²⁾などの被害を引き起こす。アイスジャムによる被害を抑えるためには、事前に解氷時期を予測することが望ましい。アイスジャムによる取水障害については、 F_b 値を用いて取水障害の危険度を評価³⁾している。アイスジャムによる浸水については、氷板厚による検討⁴⁾が実施されているが、この検討に用いられている氷板厚の計算式では、解氷時期を十分には予測できていない。その要因として、気温上昇による融雪や降雨による水深上昇を考慮していないことが指摘されている⁴⁾。

本研究は、入手しやすい気象データを用いて、簡易的に解氷時期を予測する手法を開発することを目的とし、気温上昇により融雪が促され、融雪水が河川へと流入して水深が上昇する現象を再現できる解氷時期予測モデルを構築し、構築したモデルの検証を実施した。

2. 解氷時期予測モデルの構築

解氷時期予測モデルの構築にあたって、気温上昇から融雪量、融雪量と雨量から流量、流量から水深の3つの現象に分けてモデルを構築した。融雪量と雨量による水深上昇は、準線形貯留型モデル⁵⁾を用いた。概念図を図-1に示し、計算モデルを次に示す。

$$\frac{ds}{dt} = r_e' - q \quad (1)$$

$$S = k'q \quad (2)$$

$$k' = \frac{t_c}{2} \quad (3)$$

r_e' [mm/h]: 有効雨量と有効融雪量の和, 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⁶⁾を用いた。

$$t_c = CA^{0.22}r_e'^{-0.35}/60 \quad (4)$$

A [km²]: 流域面積, C [無次元]: 土地利用形態で決まる定数⁶⁾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。また、 t_c の値は、過去のアイスジャムによる氾濫が発生した際の r_e' を用いて、洪水到達時間を算出し、その値を平均した値を与えた。

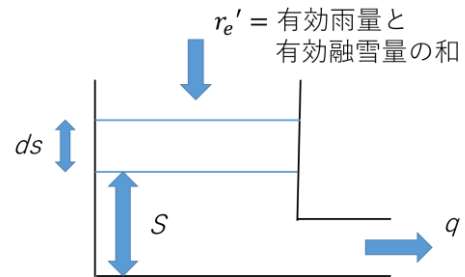


図-1 準線形貯留型モデルの概念図

(1) 気温上昇から融雪量

気温上昇から融雪量を求めるために、Degree-day 法⁷⁾を用いた。本研究では1時間毎の融雪量を求めるため、次式を用いた。

$$SM = T \cdot K \quad (5)$$

SM [mm/h]: 1時間毎の融雪量, T [°C]: 1時間毎の気温, K [mm/h・°C]: 融雪係数であり 1.7÷24 を与えた⁸⁾。融雪時期は、気温が 0°C以上の時に融雪するものとした⁷⁾。

(2) 融雪量と雨量から流量

流量を求めるために、まず、次式を用いて有効融雪量と有効雨量を求めた。

$$SM_e = SM \cdot f \quad (6)$$

$$r_e = r \cdot f \quad (7)$$

$$r_e' = SM_e + r_e \quad (8)$$

SM_e [mm/h]: 有効融雪量, SM [mm/h]: 式(5)より求めた1時間当たりの融雪量, r_e [mm/h]: 有効雨量, r [mm/h]: 観測雨量, f [無次元]: 流出係数であり、本研究では、各河川の流出係数が不明だったため山地河川とし、0.75を与えた⁹⁾。

次に準線形貯留型モデルにより流出高を求める。既往研究¹⁰⁾を参考にして、式(1)に式(2)を代入して1次のデライナ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_{e2}' [mm/h]: 有効雨量と有効融雪量の和, r_{e1}' [mm/h]: 1時間前の有効雨量と有効融雪量の和, Δt [h]: 時間であり、本研究では 1 を与えた。この式(9)に、式(3)と式(8)で得られた値をそれぞれ代入し、流出高を求める。

次に流量を次式により求めた。

$$Q = \frac{A \cdot q}{3.6} \quad (10)$$

$Q[\text{m}^3/\text{s}]$: 流量, $A[\text{km}^2]$: 流域面積, $q[\text{mm}/\text{h}]$: 式(9)より求めた流出高を与えた.

(3) 流量から水深

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. 求める水深は, 等流水深となる.

$$Q = v \cdot A = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} B h \sqrt{i_0} = \frac{\sqrt{i_0}}{n} B h^{\frac{5}{3}} \quad (11)$$

$$h = \left(\frac{Qn}{\sqrt{i_0} B} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (12)$$

$h[\text{m}]$: 水深, $Q[\text{m}^3/\text{s}]$: 式(10)より求めた流量, $n[\text{s}/\text{m}^{1/3}]$: 粗度係数であり, 本研究では 0.03 を与えた, i_0 [無次元]: 河床勾配, $B[\text{m}]$: 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, 融雪水および雨水が河川へと流入して, 水深を上昇させる現象を計算式により再現した. なお, 本検討で用いた各河川の定数を表-1に示す.

3. 本計算式の取水障害現象への適応

取水障害が発生する可能性の高い晶氷詰まりの発生過程について, 結氷後の発生過程を考えると, 初めに気温上昇による融雪と降雨による河川流量の増加, 次に融解・破壊された河氷の流下と下流側への河氷破壊の進行, さらに流下した河氷の流速低減箇所への堆積(晶氷詰まり)に整理される.

これらを踏まえ, 晶氷詰まり発生直前では, まとまった降雨と気温上昇, それに伴う流量増加(水深上昇)の現象が現れるため, 事前に, 水深上昇を予測できれば, 晶氷詰まりの発生を事前に予測できると考えられる. 本モデルの水深変動と晶氷詰まりの現象の比較を行った.

(1) 調査および現地の概要

取水障害については, 過去4年間の名寄川の観測データを用いて構築した計算モデルの妥当性を確認した. 観測地点は, 天塩川水系名寄川の合流点から上流 7.05km 地点に位置する真勲別頭首工周辺とした. 真勲別頭首工では, 2005年1月, 2009年2月, 2013年1月にアイスジャムによる取水障害が発生している. 観測期間は2016年12月13日から2017年3月21日, 2017年12月8日から2018年3月9日, 2018年12月11日から2019年3月8日, 2019年12月6日から2020年3月12日であり, 計算期間は観測期間と同様にした. 観測機器は水位計, 水温計, ADCP, SWIPを設置している.

なお, ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler 1200kHz, Teledyne RD Instruments 社製)は, 河氷速度と河氷底面の測定¹⁾のために1台設置し10分毎に測定した. SWIP(Shallow Water Ice Profiler, ASL Environmental Sciences 社製)は, SWIP546kHzとSWIP235kHzの2台を河氷の存在を確認¹⁾するために設置し10分毎に測定した.

(2) 晶氷詰まり状況の概要と計算水深

図-3に2016年12月13日から2017年3月21日の

表-1 解氷時期予測モデルに用いた各河川の定数

河川名	縦断勾配	水面幅(m)	流域面積(km ²)	洪水到達時間(h)	アメダス
名寄川	1/480	67.96	743	48.05	名寄
網走川	1/232	24	1380	43.45	津別
浦幌川	1/1106	92	483	33.9	浦幌
オサラッペ川	1/697	24	195.5	26.5	旭川

ADCP, SWIP の観測地の経時変化, 同時に構築した計算モデルで得られた観測期間中の計算水深を表した. 以下に観測した4年間の晶氷詰まり状況の概要と計算水深の変動について記す.

a) 2016年12月13日から2017年3月21日

現地観測では, 図-3に示すとおり, 河氷移動速度が大きく晶氷が詰まり取水障害の危険性が高くなった日時は, 2016年12月22日の18時以降, 2016年12月28日の15時30分以降, 2017年1月13日以降, 2017年1月25日以降, 2017年2月17日以降であった. また, 図-3より名寄川 KP8.4 地点の SWIP にて, 2016年12月28日の15時30分以降, 2017年1月13日以降, 2017年2月17日以降で晶氷詰まりによる水位変化が捉えられている.

本モデルの計算結果は, 2016年12月21日の18時, 2016年12月26日の16時で水深上昇のピークとなっている. このピークからそれぞれ24時間, 47時間30分後に晶氷詰まりが発生している. 2017年1月25日以降, 2017年2月17日以降では, 水深上昇のピークよりそれぞれ10時間, 9時間早く晶氷詰まりが発生している. いずれも水深上昇が予測されている最中に発生している. 2017年1月13日以降では, 晶氷詰まりが発生したが, 構築した計算モデルでは水深上昇を予測することができなかった. 原因としてはこれらの期間中に気温が0℃を上回ることがなかったため, 気温上昇による融雪や降雨以外の要因が考えられる.

b) 2017年12月8日から2018年3月9日

構築した計算モデルでは0℃を上回る時に若干の水深上昇が予測され, 観測水位も上昇していた. 2017年度は, 晶氷詰まりは発生しなかった.

c) 2018年12月11日から2019年3月8日

晶氷詰まりは2019年1月14日から1月15日, 2019年2月13日から2月14日に発生している. これはダム試験放流により流量が増加することによって発生したものと考えられる. 構築した計算モデルでは, この晶氷詰まりを計算水深で予測することはできなかった.

d) 2019年12月6日から2020年3月12日

晶氷詰まりは2020年1月11日から1月28日と2020年2月25日から3月3日に発生している. 2020年1月11日から1月28日では, 気温が0℃を上回ることがなかったため気温上昇による融雪や降雨による水深上昇は計算されず再現できなかった. 気温上昇による融雪や降雨以外の要因が考えられる. 2020年2月25日から3月3日では, 構築した計算モデルで水深上昇のピークが現れている. この42時間後に晶氷詰まりが発生した.

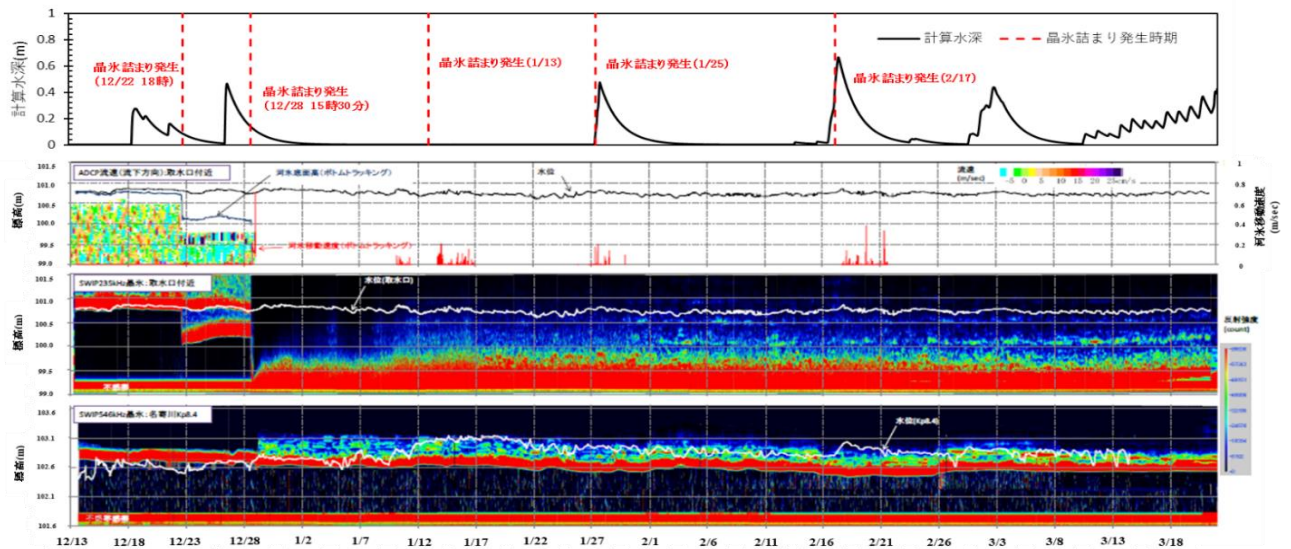


図-3 2016年12月13日から2017年3月21日の計算水深，ADCP，SWIP

4. 本計算式のアイスジャム現象への適応

本計算式による水深変動と現地におけるアイスジャム現象の比較を行った。対象としたアイスジャム現象について記す。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、道内に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石狩川水系辺別川では護岸工事中に現場代理人が流されて死亡する事故が起こる¹²⁾など、その影響は北海道全域で生じた。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発生が確認された。これらはいずれも降水量が多く、かつ気温が上昇したことが影響したと推察されている。

本計算式のアイスジャム現象の適応については、2018年3月に発生した網走川、浦幌川の事例¹⁾、2020年3月に発生した網走川、浦幌川、オサラッペ川の事例¹²⁾を対象として、構築した計算モデルの妥当性を確認した。

(2) アイスジャム発生時の観測水位と計算水深

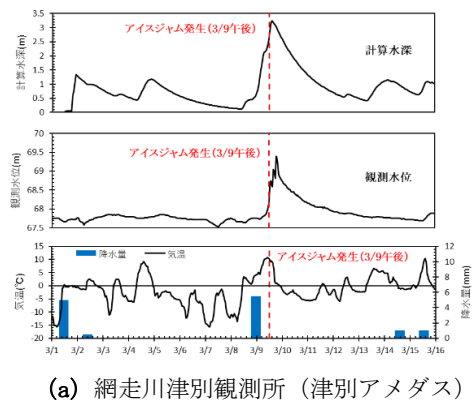
図-4は2018年3月の2河川、図-5は2020年3月の3河川の観測水位と計算水深、近傍観測所の毎時の気温と降水量を示し、以下に各河川の発生状況の概要を記す。なお計算期間は3月1日から3月16日までとした。

a) 網走川 (図-4 (a) , 図-5 (a))

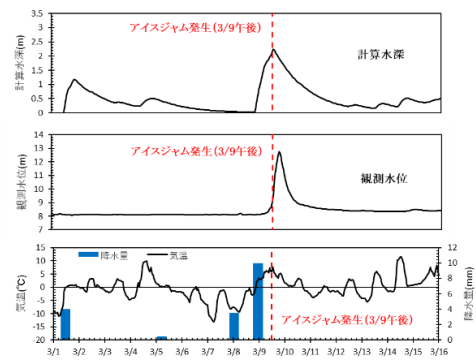
アイスジャム発生時刻は、2018年3月9日午後で時刻は不明であり、2020年3月11日9時である。2018年は発生時刻が不明のため計算水深との比較が困難であった。2020年は計算水深のピークはアイスジャム発生時よりも3時間ほど早い。

b) 浦幌川 (図-4 (b) , 図-5 (b))

アイスジャム発生時刻は、2018年3月9日午後で時刻は不明であり、2020年3月11日9時である。2018年は発生時刻が不明のため計算水深との比較が困難であった。2020年は計算水深のピークはアイスジャム発生時よりも9時間ほど早い。



(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-4 各河川のアイスジャム発生箇所の水位変化量予測値 (2018年3月)

c) オサラッペ川 (図-5 (c))

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と一致している。

図-4, 5より、構築した計算モデルによる計算水深は、アイスジャム発生時よりも前にピーク値を示している。計算水深と観測水位のピーク値を比較すると、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。

一方で、2018年3月1日22時に網走川、浦幌川の水深上昇が予測されたが、実河川では水深は上昇していない。今回構築した簡易的な計算モデルでは、ある期間では実河川の水深を予測できず課題である。しかし、本計算モデルは、既往の手法⁴⁾と比べて、アイスジャムの予測精度は向上している。アイスジャム発生危険性を予測する手法として、本手法と既往の手法⁴⁾と併用することで、より広い現象を踏まえた予測手法となる。

5. まとめ

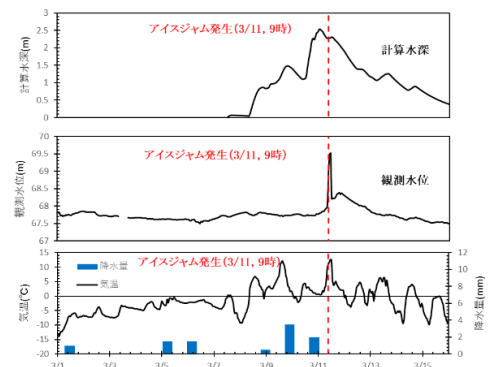
本研究は、入手しやすい気象データを入力値とする簡易的な解氷時期予測モデルを構築した。過去に発生した取水障害およびアイスジャムの事例を用いて、本計算モデルから得られた計算結果と比較し、計算値の妥当性を確認した。得られた知見は以下となる。

- ・本研究の解氷時期予測モデルは、既往の手法⁴⁾と比べて、取水障害およびアイスジャムの予測精度は向上した。一方で、実河川の水深変動を予測できない期間がある。

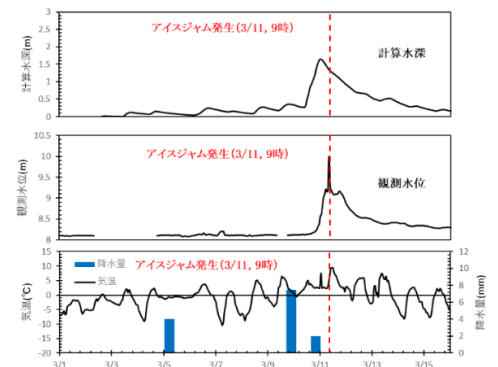
謝辞：本研究は、北海道河川財団の研究助成、JSPS 科研費、JP18K04361、JP17H01870 の助成を受けたものである。

参考文献

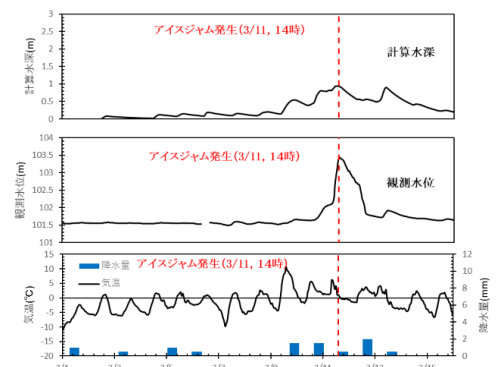
- 1) 横山洋, 吉川泰弘, 伊波友生, 前田俊一, 矢部浩規: 2018年3月北海道アイスジャム洪水による被害の現象解明と今後の課題, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74, No.5, 1_1039-1_1044, 2018
- 2) 入交泰文, 吉川泰弘, 黒田保孝: 天塩川水系名寄川真敷別頭首工における晶氷の発生について, 国土交通省, 北海道開発局技術研究発表会, 第58回, AA-6, 安21(治), 2015
- 3) 諸田匡紀, 吉川泰弘, 横山洋, 森田共胤, 村山文保, 山本新吾: 冬期取水障害における晶氷変動量の勾配を用いた危険度評価手法の検討, 土木学会論文集 B1(水工学), 75, 2, pp.1_931-1_936, 2019
- 4) 横山洋, 吉川泰弘, 伊波友生, 矢部浩紀: 結氷河川における解氷期の河水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, No2, p. 1_931-1_936, 2019
- 5) 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, pp45-50, 1982年9月
- 6) 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
- 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, No4, 1_348,



(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)



(c) オサラッペ川鷹栖橋 (旭川アメダス)

図-5 各河川のアイスジャム発生箇所の水位変化量予測値 (2020年3月)

2012

- 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) 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
- 11) 橋場雅弘, 吉川泰弘: 天塩川における河川解氷時の河水の挙動に関する現地観測, 土木学会, 河川技術論文集, 第17巻, pp.365-370, 2011
- 12) 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, 1_157-1_162, 2020
- 13) 北海道新聞 2018年3月10日朝刊