

解氷期の水深変動を考慮した 解氷時期推定手法の現地適用

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム ○横山 洋
北見工業大学 工学部 地域未来デザイン工学科 吉川 泰弘
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム 大串 弘哉

解氷期のアイスジャムは浸水や河氷への巻き込まれ事故など、河川防災・維持管理上の課題である。アイスジャムによる被害軽減策の1つとして解氷時期の事前予測があり、河氷厚予測計算である程度予測可能であるが、降雨や気温上昇の影響を十分考慮できない場合があることが指摘されている。本研究は解氷期の河川水深増加を推定するモデルによる解氷時期の予測精度を検討するとともに、実河川への適用に当たっての留意点を整理した。

キーワード：アイスジャム、流出計算、気温・降水量、河川水深

1. はじめに

結氷河川では、冬期に形成された河氷が春期の気温上昇により解氷が進行し、河氷の融解・破壊・流下が発生する。流下した河氷が流速が小さい箇所などで集積し河道が閉塞するアイスジャム現象が発生することがある。アイスジャムは、流れの阻害による水位上昇やそれに伴う浸水¹⁾、取水口の閉塞²⁾、流下する河氷への巻き込まれ事故³⁾など、人的・物的な被害が数多く報告されている。

アイスジャムの被害軽減策の1つとして、寒地土木研究所は北見工業大学と共同で、任意の地点における河氷厚の変遷を簡易に予測できるプログラムを開発した。またこのプログラムを用いて、河氷厚予測値の増減から、解氷開始時期の推定や、アイスジャムの発生危険性上昇期の予測、解氷完了時期の予測がどの程度可能か、実地検証を進めてきた。

一方、解氷の進行は降雨や融雪などによる河川流量および水深増加による河氷の破壊・流下の影響も受ける。そのため、河氷厚予測値の急減時とアイスジャム発生時期または解氷完了時期は必ずしも一致しない場合があり、河氷厚の変遷のみではアイスジャムや解氷完了を予測するのが困難なケースも見られる。特にまとまった降雨と気温上昇の影響が大きい解氷進行の場合にその傾向がうかがえた。吉川らは解氷による河川水深増加推定値の増加からアイスジャム発生時期を予測する手法を提案し、実河川に適用して予測精度の向上を目指している³⁾。

本稿では、過去にアイスジャムの発生が見られた網走川をモデルケースとして、アイスジャム・解氷時期の予測を、河氷厚ならびに解氷による河川水深の増加の2つの変遷をもとに再現性を検証した。アイスジャム発生危険度が高まる時期の適切な事前予測の観点から、適切な

YOKOYAMA Hiroshi, YOSHIKAWA Yasuhiro, OGUSHI Hiroya



図-1 検討対象箇所（網走川）（地理院地図に加筆）

予測が可能かどうかを検討した。また実河川への適用に当たっての留意点を整理した。

2. 現地適用性の検討手法

(1)検討条件の概要

河氷厚変遷および解氷による河川水深増加推定のモデルの現地適用性の検討は、近年アイスジャムが発生している網走川で行った。検討地点は美幌水位観測所（KP29.7）、津別水位観測所（KP48.4）の2地点（図-1参照）、対象年は2017年から2020年の4か年である。アイスジャムは2018年3月10日に美幌観測所付近、2020年3月11日に津別観測所付近で発生し、その他の年はアイスジャムは未発生であった。

解氷進行状況やアイスジャム発生危険性の増加予測な

どは、以下に示す2つの予測モデルの結果から検証した。

(2)河氷厚予測モデルの概要

河氷厚予測モデルでは、河氷厚変遷から解氷進行状況ならびにアイスジャム発生危険性の増加を予測する。河氷厚予測モデルの基本式は以下のとおりである⁴⁾。

$$h_i = h'_i - \left(\frac{65.2}{10^5}\right) \alpha \frac{T_a}{h'_i} - \left(\frac{45.8}{10^2}\right) \beta^{4/5} T_w h_w^{1/3} \quad (1)$$

$$h_w = H - Z - \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} h_s + \frac{\rho_i}{\rho_w} h_i + \frac{\rho_f}{\rho_w} h_f\right) \quad (2)$$

ここで、 h_i ：氷板厚[m]、 h'_i ： Δt 前の氷板厚[m]、 T_a ：気温[°C]、 T_w ：水温[°C]、 H ：水位[m]、 Z ：河床高[m]、 ρ_s ：雪の密度[kg/m³]、 h_s ：積雪深[m]、 ρ_i ：氷板密度[kg/m³]、 ρ_f ：晶氷密度[kg/m³]、 h_f ：晶氷厚[m]、 h_w ：有効水深[m]である。 Δt は1[h]、最小河氷厚は0.001mである。予測計算の対象期間は前年12月1日から3月31日までの4か月間である。式(1)中の係数 α は各年の実測河氷厚を再現するため、調整する。津別観測所については2017年は0.55、2018年以降は0.3で、美幌観測所については0.4で設定した。 β は式(3)で設定した。

$$\beta = \frac{u_w}{h_w^{2/3}} \quad (3)$$

ここで、 u_w ：河川流速[m/s]である。

(3)河川水深増加推定モデルの概要

解氷期の河川水深増加推定モデルは、気温上昇や降雨を反映した水深増加から、解氷進行状況やアイスジャム発生危険性の増加を予測する。計算手順を以下に示す。

まず1時間毎の融雪量をDegree-day法⁵⁾を用い、式(4)で求める。

$$SM = T \cdot K \quad (4)$$

SM ：1時間毎の融雪量[mm/h]、 T ：1時間毎の気温(入力値)[°C]、 K ：融雪係数であり1.7~24[mm/h・°C]を与えた⁶⁾。気温が0°C以上⁶⁾の場合に融雪するものとした。

式(5)~(7)を用いて有効融雪量と有効雨量を求めた。

$$SM_e = SM \cdot f \quad (5)$$

$$r_e = r \cdot f \quad (6)$$

$$r'_e = SM_e + r_e \quad (7)$$

SM_e ：有効融雪量[mm/h]、 f ：流出係数(無次元)であり、各地点の流出係数は山地河川の値⁷⁾である0.75を与えた。 r_e ：有効雨量[mm/h]、 r ：雨量(入力値)[mm/h]、 r'_e ：有効融雪量と有効雨量の和[mm/h]である。

続いて流出高を以下の式で計算する。準線形貯留型モデル⁸⁾をもとに、既往研究から流出高を求める式を導出

表-1 解氷予測計算に用いた係数・条件設定

地点	河床 勾配	水面幅 (m)	流域面 積(km ²)	洪水到達 時間(h)	アメダス観 測所
津別	1/232	24	571	43.45	津別
美幌	1/1027	28	824	43.45	美幌

した⁹⁾。

$$q_2 = \frac{\frac{\Delta t}{2}(r_{e1} + r_{e2}') - q_1(\frac{\Delta t}{2} - k'r)}{k'r + \frac{\Delta t}{2}} \quad (8)$$

$$k' = \frac{t_c}{2} \quad (9)$$

q_2 ：現時刻の流出高[mm/h]、 q_1 ： Δt 前の流出高[mm/h]、 r_{e2}' ：現時刻の有効雨量と有効融雪量の和[mm/h]、 r_{e1}' ： Δt の有効雨量と有効融雪量の和[mm/h]、 Δt ：計算時間間隔であり本計算では1[h]、 k' ：貯留係数[h]、 t_c ：洪水到達時間[h]で、本稿では既往検討で用いた値を両地点で用いた。

次に流量 Q [m³/s]を次式により求めた。

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

A ：流域面積で、水文水質データベースでの値を用いた。最後に河川水深を、以下の等流水深の式から求めた。

$$h_0 = \left(\frac{Qn}{\sqrt{i_0}B}\right)^{3/5} \quad (11)$$

h_0 ：河川水深[m]、 n ：粗度係数で自然水路の標準値である0.03[s/m^{1/3}]、 i_0 ：河床勾配で網走川河川整備計画の計画高水勾配、 B ：川幅でGoogle Earthの航空写真から判読した。

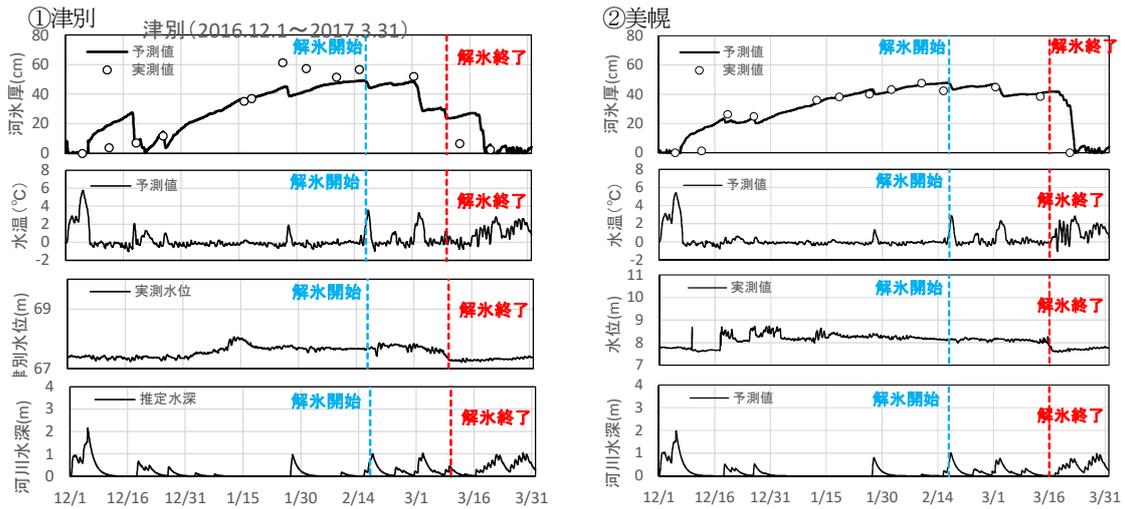
表-1に今回の検討で用いた各係数を示す。

3. 予測結果および考察

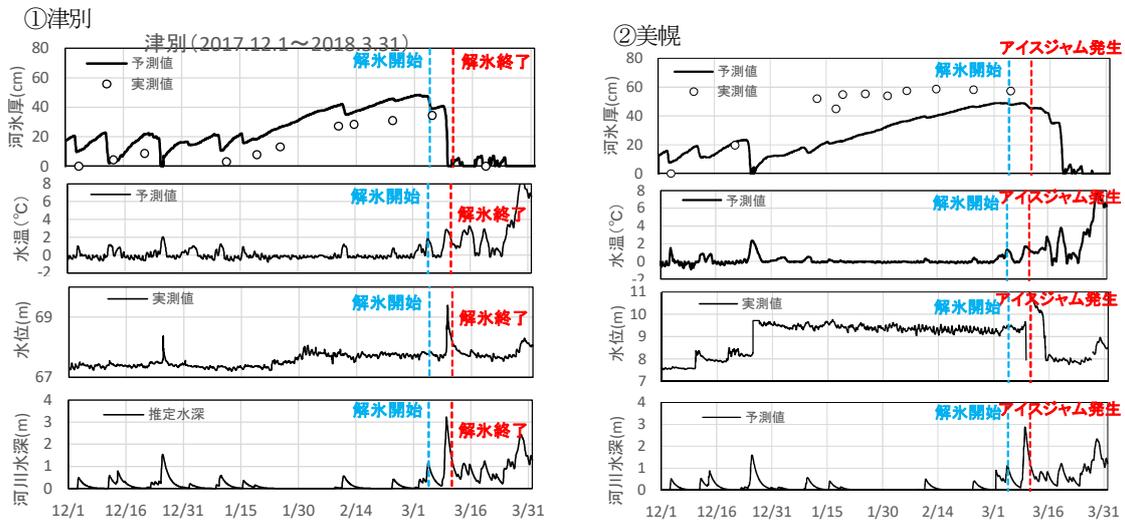
(1)解氷開始時期の推定

図-2に津別、美幌両観測所における河氷厚予測モデルによる河氷厚計算値と実測値(流量観測時の断面平均氷板厚)、河川水温計算値、実測水位、解氷による河川水深推定値を示す。これらの計算値をもとに、まずは解氷開始時期を推定するとともに、実測現象との関係について考察を行う。

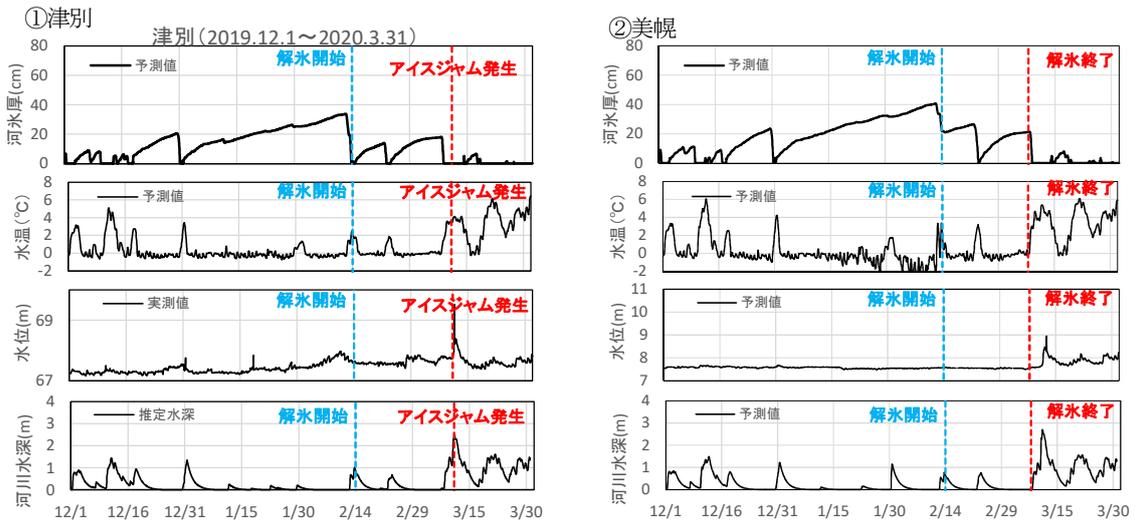
河氷厚予測値はいずれの年も本格的な気温低下が開始する前年12月下旬以降、時間経過とともに増加し、2月上旬まで河氷形成が発達している。その後の河氷厚減少の傾向は年により様々であるが、河氷厚予測値が減少開始するタイミングは水温の計算値が2°C以上に上昇する時期と河川水深推定値が同時に一時増加する時期と重なる傾向がみられる。河氷厚予測値の減少は12月および1月にも見られるが、厳冬期であるためすぐに河氷は再発達している。そこで2月以降、河川水温が2°C以上に上



(a)2017年（計算期間2016年12月～2017年3月）



(b)2018年（計算期間2017年12月～2018年3月）



(c)2020年（計算期間2019年12月～2020年3月）

図-2 河氷厚予測による解氷開始と終了時の推定

昇および河川水深増加と河氷厚予測値減少が重なってみられた日を、解氷開始日と判断した。図-2 中に青線以示す。なお解氷開始日の地点による違いはこの3か年に

限ればほとんど変わらない。両水位観測所の距離は約30km、標高差も約40mであり、気象条件に大きな違いがないことも一因といえる。

(2) アイスジャム発生日・解氷完了時期の推定

続いて解氷完了日またはアイスジャム発生日の推定を行った。図-2中のアイスジャム発生は、実際の発生日である。アイスジャム非発生年の解氷完了日は以下のとおり判断した。結氷期の水位は水位流量曲線から明らかに外れることが多く、非結氷期の流量は水位流量曲線と異なる方法で補正して算出し、時刻流量も1日1データ（正午のみ）である¹⁰⁾。そこで、水質水文データベースの流量月表で時刻流量が1日1データ（正午のみ）から毎時刻流量が掲載されるようになる初日を解氷完了日とした。これらは図-2中に赤破線で示している。

両地点の解氷開始後の河氷厚減少を比較すると、津別が美幌に比べて氷厚が0となるのが早い。これは上流側である津別の河床勾配が急であることが一因である。

解氷開始後の河氷厚の減少過程は年により異なる。2017年および2018年は、河氷はある程度の厚みを保った状態で推移し、3月以降、約1~2日のうちに河氷厚が急減している。一方2020年は、河氷厚は解氷開始後から0近くまでの減少と数10cmまでの再増加を繰り返しながら、解氷終了を迎えている。これは解氷開始が本格化する2月後半以降の気温の推移ならびに降雨の違いが関係していると考えられる。なお、いずれの年・地点でも、河氷厚の急減時には河川水温と水深の増加が重なっている。特に3月以降の河氷厚急減時は、河川水温は4℃以上まで上昇し、河川水深の増加も2月の増加幅の2倍以上となっている。すなわち河川水温上昇と河川流量の増加をモデルで予測することで、アイスジャム発生危険性の増加や解氷完了時期を予測できる可能性がある。

解氷完了およびアイスジャム発生日のモデルによる予測日と実際の発生日の差は以下のとおりであった。

2017年は、津別では河氷厚予測による解氷完了日は3月20日で、実測から約10日遅れであった。美幌では河氷厚予測による解氷日は実測日から約7日程度の遅れがある。2018年は、津別では3月8日に河氷厚予測値は0となった。実際の解氷完了日は3月11日で予測値と実測で3日の差があるが、実際の現象をほぼ再現している。美幌では、アイスジャム発生日にも河氷厚はほとんど減少していないが、アイスジャム発生直前に水温と河川水深増加が確認できる。

以上から、河氷厚予測値の変遷のほか、解氷が本格的に進行する時期には河川の水温、解氷による水深増加の動向にも注意する必要がある。

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に整理する。

- ・河氷解氷開始時期推定では、河氷厚予測値の減少とともに水温計算値が2℃上昇、河川水深の増加を確認することで、結氷から解氷への過程の変換を予測できることを示した。
- ・河氷厚予測値の減少とともに、解氷完了時の水深増加を捉えることで、アイスジャムをもたらす河氷閉塞の発生可能性を推測することができることを示した。

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, I_1039-I_1044, 2018.
- 2) 吉川泰弘, 黒田保孝, 橋場雅弘, 入交泰文: 寒冷地河川における晶氷発生計算モデルの開発と取水障害の発生条件, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.71, No.4, I_1327-I_1332, 2015.
- 3) 吉川泰弘, 寺崎海斗, 横山洋: 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, 河川技術論文集, 第27巻, pp541-544, 2021.
- 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, pp21-34, 2012.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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, 2014.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 橋場雅弘, 吉川泰弘: 結氷河川における流量推定式と音響測定機器を用いた現地観測, 河川流量観測の新時代, 第3巻, pp.31-40, 2012.