

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

横山 洋¹・吉川 泰弘²・伊波友生³・矢部浩規¹

¹正会員 博(工) (国研) 土木研究所 寒地土木研究所(〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

E-mail: yokoyama-h22ab@ceri.go.jp

²正会員 博(工) 北見工業大学准教授(〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

³正会員 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所(〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

結氷河川において解氷期に発生するアイスジャム洪水は、河川の防災および維持管理上の懸案である。気候変動により、解氷期のアイスジャム発生状況が将来的に変化する可能性もある中、解氷期の河水挙動把握が求められている。本研究では過去にアイスジャムが発生した結氷河川において、解氷過程の把握のため、氷温、水位、河水画像の同時縦断観測を行った。その結果、氷温変化から解氷時期を解明するとともに、画像および水位観測から縦断的な解氷プロセスを把握できた。また実務利用を考慮した河水厚変動簡易予測モデルを適用し、河水厚変化から解氷進行現象を考察するとともに、解氷時期の予測に対するモデルの有用性を確認した。

Key Words: ice jam flood, field observation, ice thickness calculation

1. はじめに

北海道の河川は冬期間結氷するが、解氷期に入ると気温上昇や降雨により河道内の河水の融解・破壊および河水が増水した河川へ流下する。これらの流下河水が河道内で閉塞するアイスジャムは、急激な水位上昇、溢水・氾濫、流下する河水に巻き込まれる事故など、解氷期の河川災害のきっかけとなる。解氷期におけるアイスジャムによる被害は過去にも発生しており、取水口の閉塞¹⁾、河川工事中の作業員被災^{2,3)}、橋梁部の河水閉塞による浸水⁴⁾などが確認されている。

一方で、気候変動による将来の気温上昇が北海道にもたらす変化予測が、気象庁による報告書に述べられている⁵⁾。これによると、降雪量・積雪量は全体として減少傾向である一方、内陸部の一部では増加が予測されているほか、降雪ピーク時の降雪量には大きな変化はないとされる⁶⁾。アイスジャム発生のきっかけとして、発達する低気圧通過による気温上昇や季節外れの降雨が挙げられる。このため、気候変動による将来的な春先の降雨変化は、解氷期のアイスジャムの発生形態の変化につながる可能性が考えられる。

これらのアイスジャムによる災害の被害軽減策として、アイスジャムの発生箇所および発生時期を事前に予測す

ることが考えられ、実用的な予測手法に関する研究が進められている。著者らも現地調査⁷⁾、水理模型実験による結氷河川の河水挙動把握⁸⁾のほか、実用的な河水厚変動の予測手法の検討⁹⁾、アイスジャムスケールによる河道内河水閉塞の抽出方法¹⁰⁾を検討してきた。しかしながら、解氷期における河道内の河水現地観測は危険が伴い、様々な観測機器や観測手法の発達によっても検証データの蓄積は十分とはいえない状況にある。

本研究では2018年3月にアイスジャム現象が発生した河川を対象に、結氷期から解氷期にかけての河道内の河水挙動を観測した。また著者らが提案した、実務利用を考慮した河水厚変動簡易予測モデル⁹⁾で観測現場の河水厚変化を推定し、アイスジャム予測手法の現地適用性について考察した。本研究での検討内容は、北海道内河川の冬期間における河川工事の安全確保、アイスジャムの発生時期と発生箇所の把握、水位上昇量の把握、樋門開閉判断に関する知見の蓄積に資するものである。

2. 現地観測の概要

(1) 観測箇所

観測対象区間は図-1 に示す石狩川水系辺別川上流部の流路延長で約 4.5km の区間である。辺別川は石狩川の

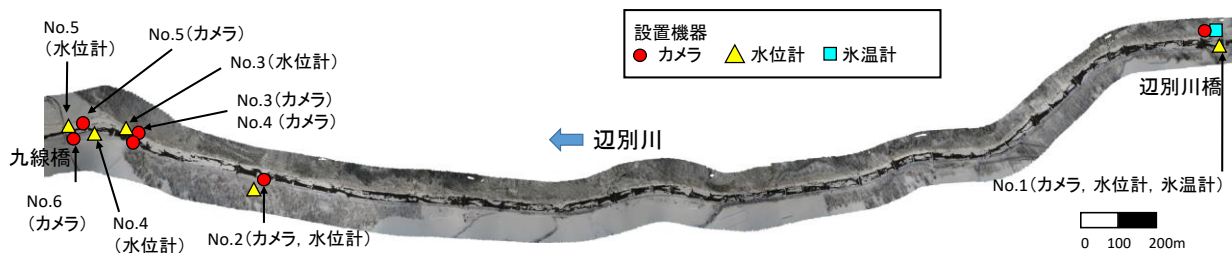


図-1 調査区間概況（2019年3月15日撮影）および機器設置箇所

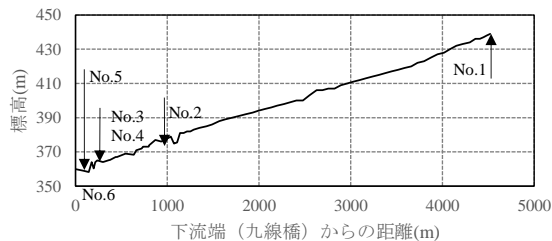


図-2 調査区間河床高縦断面図

表-1 計測機器・計測条件一覧

	計測地点	計測条件（2019年）
河水 撮影	No.1～6	2月1日～3月4日：1時間間隔 3月5日～4月12日：30秒間隔
水位	No.1～5	1分間隔
水温 水温	No.1	1分間隔 (水温・河川水温・気温)

3次支川であり、調査区間下流端（九線橋）は石狩川の2次支川である美瑛川との合流点から約21km上流に位置する（地理院地図からの読み取り）。調査区間の河道は蛇行部があるものの、比較的直線的であり、右岸側は山付き区間、左岸側は平地が広がっている。河道内には床止工が縦断的に連続設置されている。また河道内には砂州が連続的に形成されている。

対象区間の河床高縦断を図-2に示す。辺別川河道の詳細な測量データがないことから、以下の手順で河道データを作成した。河床高はGoogle Earthの2018年10月5日の衛星データで河道流心の平面座標を縦断的に読み取った後、各座標点の標高値を国土地理院地図から地理院マップシート⁹⁾を用いて取得した。水面位置の標高を河床高と仮定しているため、得られた標高値にはある程度の誤差が含まれるが、河床高の縦断変化は十分表現できていると考えられる。川幅はほぼ全区間で約30mであり、うち水面幅は断面ごとに異なるものの、約10～20mの間で変遷している。縦断勾配の平均値は約1/60である。

(2) 観測方法

観測期間は厳冬期から解氷完了までの河道内の現象を網羅できるよう、2019年2月1日から同年4月12日までで設定した。観測項目はトレイルカメラ（ハイク Hykecam SP2）による河道内河水挙動の定点静止画イン

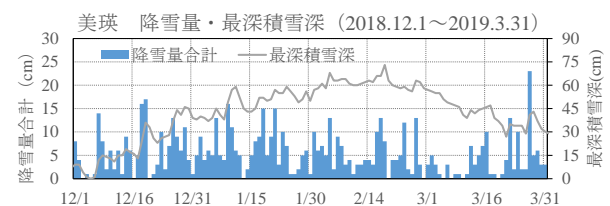
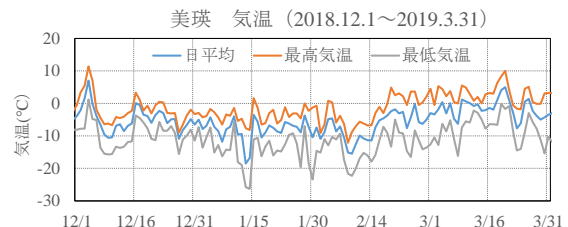


図-3 気象データ（美瑛アメダス）

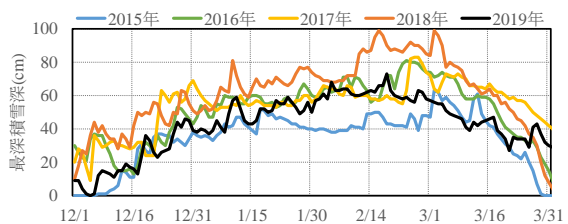


図-4 過去5年間の最深積雪深との比較（美瑛アメダス）

ターバル撮影、自記水位計（応用地質 S&DL mini）による河道内水位連続計測、水温計（ノースワン Kadec21-UHTV-C）による水温・気温連続計測、水温計（Onset TidbiT v2）による河川水温連続計測である。計測機器の設置位置、測定条件は表-1に示すとおりである。

(3) 気象条件概要

図-3は2018年12月1日から2019年3月31日にかけての気象庁美瑛アメダス観測所における日平均、最高、最低気温、日降雪量、最深積雪深データである⁹⁾。美瑛観測所は、図-1中のNo.1から直線距離で西方約14.5kmである。美瑛観測所は標高250m（地域気象観測所一覧⁹⁾より）、No.1は標高435m（地理院地図から読み取り）であり、その標高差は185mである。

図-3の最深積雪深は2019年2月18日に最大値に達した。最高気温は2月18日までほぼ毎日0°C以下であったが、2月19日以降は0°C以上の日が連続しており、2月下旬から河川の解氷が進んだものと推測される。

図-4に過去5年間における、最深積雪深の前年12月

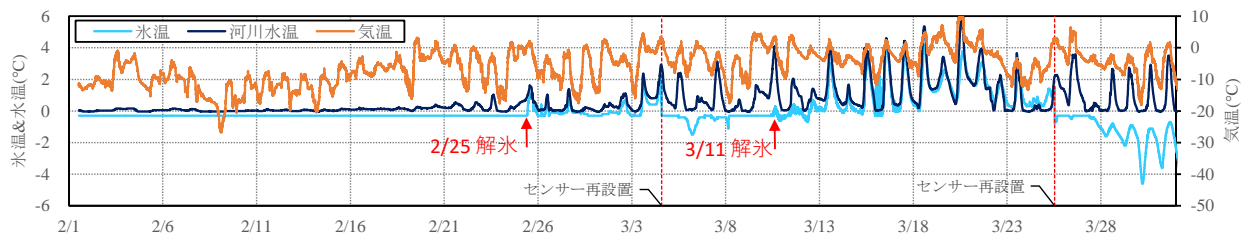


図-5 氷温，河川水温，気温変化（No.1）

1日から当年3月31日までの変動を示す。アイスジャム発生が確認された2018年は、厳寒期である1月から2月にかけての最深積雪深が他の年と比較して多い。また2015年は、他の年と比べて厳寒期の最深積雪深が小さい。2019年は、2月中旬までの積雪深は他の年と比べ大きな差はないが、2月下旬以降は積雪深は増加していない。2019年は3月の積雪深が2015年以外の年と比べて約20～30cm少ない状態を保って減少しており、2月下旬以降、融雪と解氷が例年よりも早期に進んだことが推測される。

3. 観測結果

(1) 氷温，水温，気温計測

続いて現地観測結果を示す。氷温，水温，気温計測の目的は、河水の氷中温度把握のほか、解氷の進行により氷温測定部（以下「センサー」と記す）が水中・大気中に露出するとそれらの温度変化に追随することを利用した解氷時期の判別手法の適用性検証である。

氷温河川水温の計測データを図-5に示す。センサーはNo.1に設置した。センサーの氷中設置深度は、計測開始日である2月1日は河水表面下12cmに設置した。3月4日の点検時に、河水の消失およびセンサーの水中露出を確認したため、河水表面下5cmに再設置した。3月25日の点検時に再度、河水の消失およびセンサーの水中露出を確認したため、河水表面下3cmに再設置した。なお、氷温が3月4日および3月25日に急低下しているが、これは水中に露出していたセンサーを河水中に再設置したためである。

河川水温は2月20日前後まではほぼ0°Cで横ばいであったが、それ以降は日内の変動が大きくなっている。氷温は観測開始以降、-0.3°Cで一定値であったが、2月25日10時から11時の間にプラスに転じ、その後は河川水温の変化傾向にほぼ追従して変化している。以上からセンサー設置地点の河水はこの時期に解氷が進行してセンサーが河川水中に露出したものと考えられる。

またセンサーを河水内に再設置した後の3月11日12時から13時の間に氷温が再度プラスに転じて河川水温の変化とほぼ追従していることから、この時期にも再度河水の解氷進行によるセンサーの水中露出が生じたと推測される。これらの結果より、氷温，水温，気温計測に

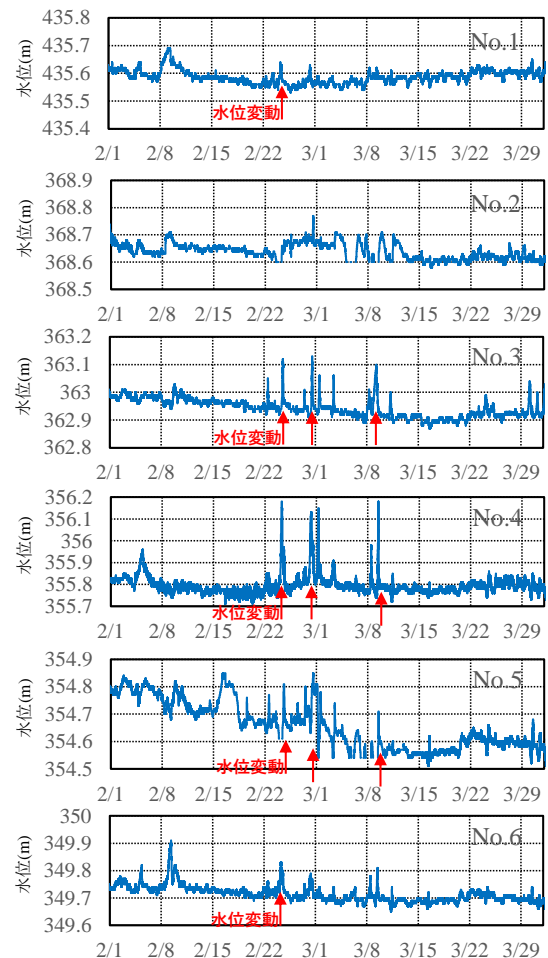


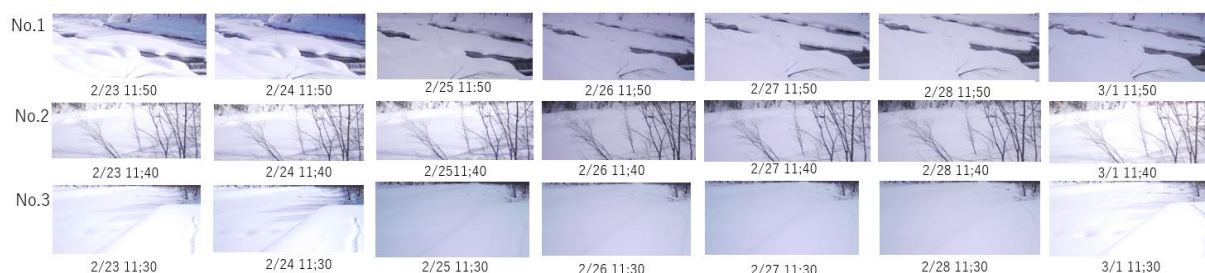
図-6 水位変化

より解氷時期の判別がある程度可能なことが示された。

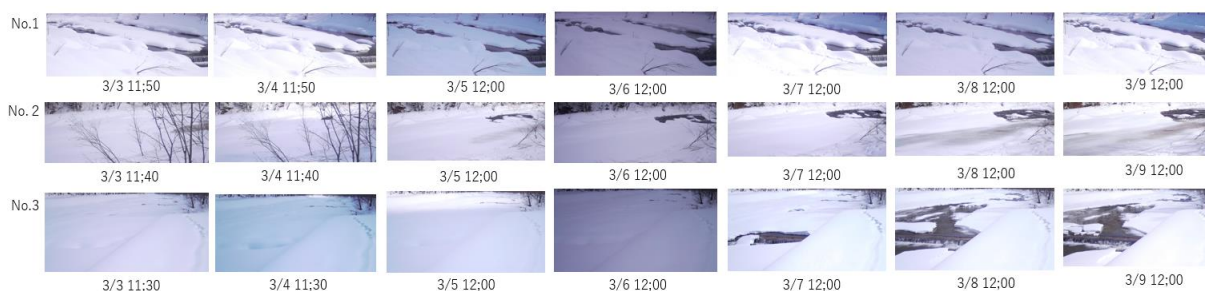
(2) 水位計測

吉川らはアイスジャム発生時の河川現地観測から、融雪進行による河川水位の急上昇で河水が鉛直上方に持ち上げられて河水の解氷・流下が進み、アイスジャム発生につながることを示した¹⁰⁾。そこで辺別川においても、解氷期の水位縦断変化を連続観測し、解氷の進行過程との関係について考察する。

各地点の水位を図-6に示す。顕著な水位変動が発生した時期は赤矢印で示した。No.1では2月24日午前10cmを超える水位上昇がみられた。さらに下流側であるNo.3～No.6においても2月24日の日中に水位上昇がみられ、この時期に河川流量が増加したことがうかがえ



(1)2019年2月23日～3月1日



(2)2019年3月3日～3月9日

図-7 河氷画像撮影

る。同様に、2月28日、3月9日にもNo.3～No.5において0.1～0.3mの水位上昇がみられた。

なお、2月下旬から3月上旬にかけての美瑛アメダス観測値において、急激な気温上昇や降水量の増加など、河氷挙動に急な変化をもたらすような気象変化は発生していない。ただし2月20日以降は最高気温が大半の日でプラスに転じ、日照時間の増加により、徐々に融雪とともに解氷が進んだと考えられ、河道内で部分的に水位が上昇した一因となっている可能性がある。

(3)河氷画像

河氷画像の変化から解氷過程を考察する。図-7に調査区間上流部にあたるNo.1、中流部にあたるNo.2、下流部にあたるNo.3で、2月23日から3月1日および3月3日から3月9日までの正午付近の河氷画像の変遷を示す。

氷温や水位に変動がみられた2月24日および25日前後で、河氷の変化は確認できない。同様に水位変動がみられた2月28日前後も河氷の変化は確認できなかった。一方、3月に入ると、河氷画像から解氷の進行が明確にみられる。No.2では3月4日に開水面が確認され、日数経過とともに拡大している。また3月8日以降は河道内で解氷による氷の緩みが進行したとみられる氷の変色が確認される。またNo.3でも3月7日に開水面が確認され、日数経過とともに拡大している。水位上昇がみられた3月9日の画像では河氷の河道内での集積は確認できないものの、解氷の進行は続いていると推測される。

(4)解氷現象および観測手法の考察

No.1での現象を中心に、解氷過程を時系列で整理した。

- ・2月中旬まで、最高気温は概ね0℃以下で変遷し、河川水温はほぼ0℃、氷温も-0.3℃一定であった。解氷の兆しとなる水位変動や開水面の拡大は見られなかった。
- ・2月後半から最高気温が0℃以上となる日が増えた。河氷画像では開水面の拡大は見られず、解氷には至っていない。しかし2月24日に水位計の顕著な水位変動、翌25日の氷温・水温・気温計測による河氷消失の検出など、本格的な解氷に向けた予兆が確認された。
- ・3月上旬に入り、さらに気温上昇が進むと、開水面が広がる状況を河氷画像で確認できた。また3月9日の縦断的な水位変動、3月11日の氷温・水温・気温計測による河氷の消失の検出など、解氷進行過程を捉えることができた。

これらの解氷現象の進行過程は、河氷画像のみでは把握が困難である。氷温・河川水温・気温同時計測は、計測地点の解氷時期の特定に有効であった。また河川水位の縦断同時計測は、河道全体の解氷進行過程および密接な関係である河道内流況の把握に有効であった。観測機器・手法を複数組み合わせることにより、実河川での解氷過程を時系列で考察することが可能である。

4. 河氷厚予測モデルの適用

(1)予測モデルの概要

アイスジャムのきっかけとなる解氷リスクの評価指標の1つとして、河氷厚の予測が考えられる。そこで河氷厚予測モデルにより、今回の観測地点の河氷厚を予測し、その適用性について検証する。

河氷厚の時間変動に関する基本方程式は、大気、河氷、

河川水間での熱収支（図-8 参照）に基づき、以下の式(1)、(2)で与えられる⁹⁾。

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

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

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)、 ρ_w ：水の密度(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。

式(1)中の α は、観測データがある場合は大気、河水、河川水間での熱収支をもとに算定し、ない場合は過去の観測値などから試行錯誤を行い決定する⁹⁾。本研究でも観測データがないため、実測河氷厚を良好に再現した $\alpha=0.2$ で設定した。 β (m^{1/3}/s)は以下の式(3)で表される。

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

本研究ではモデルの河川管理実務での利用を想定し、モデルの入力水理条件の簡略化（水位・流入水温一定）および入力気象情報を毎時の公開気象データ（アメダス気温、風速、日照時間）に限定している。風速、日照時間は図-8の ϕ_a に反映され、式(1)中の α に影響する⁹⁾が、今回 α は固定値であり、河氷厚計算には影響しない。

モデルによる計算地点は No.1 である。縦断河床勾配は 1/60、水面幅は現地写真をもとに 10m とした。

現地水位については現地標高値+0.3m の一定値、気象データについては、美瑛アメダスの毎時観測値を入力している。2019年の予測計算に現地観測水位、気温を使用しなかった理由は、過年度も含めた河氷厚予測計算を行うにあたり、計算入力データの条件をできる限りそろえることを優先したためである。計算開始は前年12月1日0時、計算終了は当年3月31日24時である。計算出力は1時間間隔、最小河氷厚は0.001mとした。計算開始時の河氷厚は0.001mとした。流入河川水温は、実際には気温に応じて水温も変動しているが、今回は簡便のため計算期間中2°Cで一定とした。

なお本手法の現地河氷厚再現性については、他河川の冬期流量観測時の河氷断面計測により検証しており、概ね良好な再現結果が得られていることを確認している¹⁰⁾。

(2) 河氷厚予測結果

図-9 は 2018 年 12 月 1 日から 2019 年 3 月 31 日までの No.1 地点における河氷厚予測結果である。No.1 地点で水温計設置・点検時に河氷厚を実測しており、2019 年 2 月

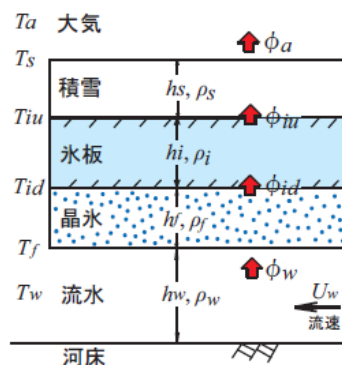


図-8 河氷厚予測の熱収支模式図⁹⁾

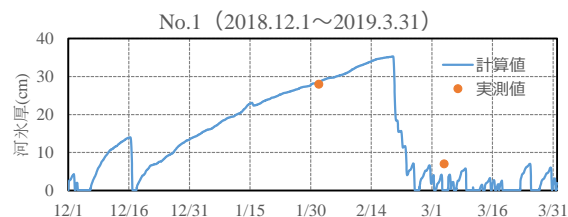


図-9 河氷厚予測結果 (No.1)

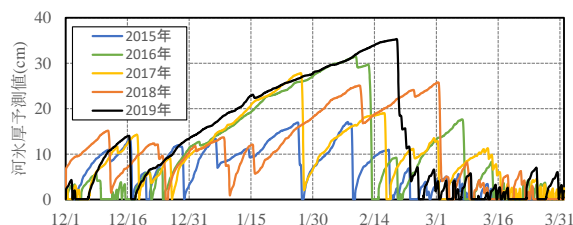


図-10 過去5年間の河氷厚予測値 (No.1)

1日は0.28m、3月4日は0.07mであった。この観測値に合わせてモデルのパラメータを調整して計算を行った。

河氷厚予測値は、12月中旬以降2月中旬までの厳冬期には、増加傾向が続いている。河氷厚予測値は2月19日正午から20日正午までの24時間で20cm近く急減し、氷厚は半減している。さらに2月25日に河氷厚予測値は0になり、その後は0～数cmの間で変動している。

続いて河氷厚予測値の変遷を、現地の解氷過程と比較する。河氷厚予測値が急減した2月19日は最高気温が0°C以上に転じた時期と概ね一致する。また河氷厚予測値が0となった2月25日は、氷温センサーで検出した河氷の消失時期とも重なる。河氷厚予測値の急減が生じた時期は、現地での解氷進行の予兆となる現象発生時とある程度重なっているといえる。

なお現地で本格的な解氷が進んだのは3月上旬以降であり、モデルは実際の現象よりも10日程度早く解氷が本格進行したと予測している。この原因として、モデルでの入力値とした美瑛観測所はNo.1よりも標高が180m低く、モデル入力値と実地での気温差のため、モデル上では解氷が実地よりも早く進行したものと考えられる。

(3) アイスジャム発生可能性の評価

図-10 は過去5年間の河氷厚予測結果を示したもので

ある。既報では同モデルを用いて河氷厚の変動特性を定性的に検討したが、今回は2019年の現象再現に用いた設定条件を他の年度にも適用して再計算した。

河氷厚はいずれの年も12月後半から1月にかけて増加を続けている。2015年以外の年で、河氷厚は2月後半から3月前半にかけて明確なピークを確認できる。河氷厚予測の年間最大値は、ほぼ同じである。また1~2日間で河氷厚予測値が約10~20cm急減することが大半の年で発生しており、一気にほぼ0になる場合もある。これら河氷厚予測値の急減は解氷の進行と関連が伺え、アイスジャムの発生リスクの上昇にもつながる現象である。

モデルの活用方法としては、河氷厚予測値がピークから1~2日で急減する場合は解氷進行の予兆と捉え、アイスジャムへの警戒が必要といえる。ただしどの程度の河氷厚減少で警戒を要するかは、各現場の複数年河氷厚予測や既往の解氷状況も考慮して設定する必要がある。

また現時点では、アイスジャム発生を伺わせるような河氷厚急減発生の推定日時は手法ごとで異なる。河氷画像、水位、氷温などの観測値と河氷厚変動予測を組み合わせ、解氷進行状況を検証することが適切といえる。

5. おわりに

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- ・結氷河川の解氷過程把握のため、河氷画像撮影、水位縦断、氷温・河川水温・気温の同時連続観測を行った。氷温・河川水温・気温同時計測は、計測地点の解氷時検出に有効であった。また複数の観測手法を組み合わせることで、解氷過程の時系列の考察が可能となった。
- ・河氷厚予測簡易モデルは実測河氷厚を良好に再現した。また河氷厚予測値の急減時期と、解氷の進行には関連が伺え、モデルによる河氷厚急減がアイスジャム発生リスク増の予測につながる可能性を示すことができた。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP18K04361 および北海道河川財団の助成を受けたものである。関係機関の方々には、調査実施に当たり様々なご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 伊藤丹, 吉川泰弘, 黒田保孝, 村瀬竜也: 2013 年 4 月に A ダムで発生したアイスジャムによる取水障害, 土木学会北海道支部論文報告集(第 70 号), 2014
- 2) 横山洋, 吉川泰弘, 伊波友生: 2018 年 3 月北海道アイスジャム被害報告と今後の被害軽減策, 第 62 回(平成 30 年度)北海道開発技術研究発表会, 2018.
- 3) 原文宏, 河合孝治, 佐伯浩, 山口甲: 琴似発寒川でのアイスジャム発生による流量の急変, 北海道地区自然災害科学資料センター報告 Vol.12 pp.35-57, 1997
- 4) 札幌管区気象台: 北海道の気候変化(第 2 版), pp. 26-27, 2017
- 5) 鳥谷部寿人, 吉川泰弘, 岡部博一, 田中忠彦: 支川合流を考慮したアイスジャム発生に関する実験的研究土木学会論文集 B1(水工学) Vol.73, No.4, I_1339-I_1344, 2017.
- 6) 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
- 7) 鳥谷部 寿人, 吉川 泰弘, 阿部 孝章, 黒田 保孝, 船木 淳悟, 佐藤 好茂, 津村 喜武: オソベツ川における吹雪による晶氷増加とアイスジャム発生危険箇所の抽出に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.72, No.4, I_601-I_606, 2016.
- 8) 地理院マップシート (http://renkei2.gsi.go.jp/renkei/130326maps_h_gijutu/index.html) (ダウンロード実施: 2018 年 9 月 21 日)
- 9) 気象庁ホームページ (<http://www.jma.go.jp/>) (ダウンロード実施: 2019 年 5 月 20 日)
- 10) 吉川 泰弘, 渡邊 康玄, 早川 博, 平井 康幸: 2010 年 2 月に渚滑川で発生したアイスジャムに関する研究, 河川技術論文集, 第 17 巻, pp.353-358, 2011.
- 11) 横山洋, 吉川泰弘, 矢部浩規, 伊波友生: 実務利用を想定した河氷厚予測プログラム作成と現地適用について, 土木学会第 74 回年次学術講演会要旨集, 2019 (投稿中)

(Received May 31, 2019)

(Accepted August 7, 2019)

INVESTIGATION OF ICE MELTING PROCESS IN A ICE-COVERED RIVER AND PREDICTION WITH SIMPLIFIED MODEL OF ICE MELTING

Hiroshi YOKOYAMA, Yasuhiro YOSHIKAWA, Yu INAMI and Hiroki YABE

Ice jam floods under spring thaw is a problem for disaster prevention and maintenance of ice rivers. And it is required to understand the possibility of changing behavior of river ice caused by climate change. In this study, we conducted simultaneous longitudinal observation of ice temperature, water level and time-lapse camera in order to understand the deicing process in an ice-covered river. As a result, it was possible to understand the deicing time from the ice temperature change, and grasp the longitudinal deicing process from the image and water level observation. Next, we applied a simplified prediction model of river ice thickness and discussed the deicing progress phenomenon from the river ice thickness change. We confirmed the usefulness of the model for future ice melting prediction.