

結氷河川における冬期の河水挙動に関する 現地観測

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○平田 智道
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 阿部 孝章
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム 横山 洋

解氷時期に流下した河水が河道閉塞を引き起こすアイスジャム現象は、河川維持管理・防災上の課題となっている。しかしながら、解氷期における現地観測は危険が伴うため、解氷時期のデータの蓄積は十分ではない。本報では、結氷期から解氷期にかけての河水挙動に関する現地観測を行い、解氷進行過程と気象・水理条件との関係について検討した結果を報告する。

キーワード：結氷河川、河水挙動監視、アイスジャム、気象・水理条件

1. はじめに

北海道内の多くの河川では冬期に河川が結氷し、河水が形成される。気温上昇や降雨等により河水の融解・破壊・流下が発生し、流下した河水が流速の小さい箇所などで集積すると、アイスジャムによる河道閉塞を引き起こすことがある。アイスジャムは、急激な水位上昇、浸水被害、流下する河水による巻き込まれ事故等を引き起こす可能性がある¹⁾。また、治水上の被害だけでなく、生活・工業用水等の取水口に河水が滞留することによる取水障害や、河水が構造物表面を摩耗することによる構造物損傷などの問題がある²⁾。したがって、アイスジャム被害は、河川防災や河川維持管理をはじめ、現場の課題となっており、アイスジャム課題解決に資する技術が結氷河川において求められている。

アイスジャム被害の被害軽減策の一つとして、アイスジャムが発生する危険性の高い時期および箇所を予測する手法の開発が進められている。例えば、実用的な氷板厚変動の予測手法の検討³⁾、アイスジャムスケールによる河道内河水閉塞の抽出手法の検討⁴⁾が行われている。アイスジャムの発生メカニズムに関する既往研究では、実氷を用いた水理模型実験等によって、有益な知見が得られている⁵⁾、また、現地観測に関する既往研究では、北海道東部に位置する渚滑川におけるアイスジャム発生時の現地観測⁶⁾、北海道北部の天塩川における解氷時期の河水挙動観測が行われている²⁾。しかしながら、解氷期における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⁷⁾。解氷時期の河水挙動および解氷進行過程に影響を及ぼす水理・気象条件について検討することは、アイスジャム現象を解明し、被害軽減策を検討するために重要な基礎資料となり得る。

本研究では、過去にアイスジャム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に関する現地観測を行い、解氷現象を明らかにすることを目的とした。本報では、河水挙動に関する現地観測結果に基づき、画像解析手法によって、解氷時期の河水変化を連続的に把握し、解氷進行過程と気象・水理条件の関係について検討した結果を報告する。本研究での検討内容は、解氷現象に関する知見の蓄積と冬期河川工事の安全確保やアイスジャムの発生時期の把握等に資するものである。

2. 方法

2.1 現地観測

北海道東部に位置する渚滑川を対象河川とした(図-1)、河口よりKP11.1地点からKP19.8地点の流路延長で約8.7kmの区間を対象にした。ここで、KPは河口からの距離(km)を示す。観測期間は、2021年12月18日から2022年3月15日である。

水位・水温測定は、自記水位計(応用地質 S&DL mini)



図-1 渚滑川における3月の解氷状況

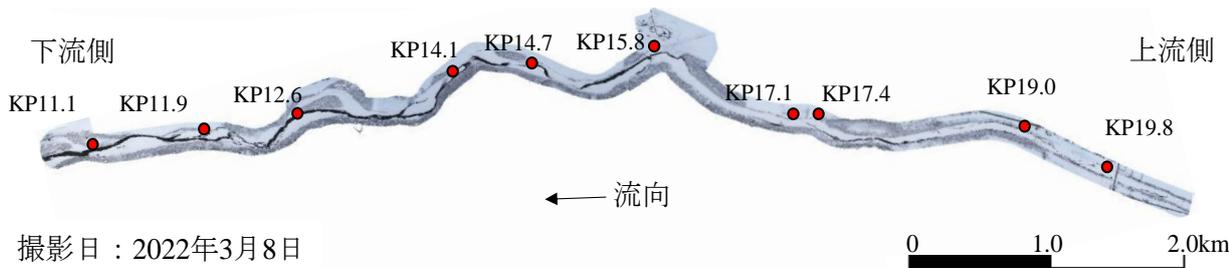


図-2 観測対象区間の概況と計測機器設置地点（設置箇所を赤点で示す）

表-1 観測項目と計測条件

河水画像	12月18日～2月10日：10分間隔
撮影	2月11日～3月7日：1分間隔
水位	12月18日～2月10日：10分間隔 2月11日～3月14日：1分間隔
水温	12月18日～2月10日：10分間隔 2月11日～3月14日：1分間隔

および水温計(JFEアドバンテック、DEFI2-T)を使用し、気温は気温計(KADEC21-UHTV、ノースワン)を使用した。カメラ撮影は河岸にインターバルカメラ(ハイクカムSP2, hyke)を設置し、対象区間の10地点で水温計測、水位計測、河水画像撮影を実施した。計測機器の設置位置は図-2、計測条件は表-1に示すとおりである。

解氷の進行は、気温上昇のみならず、降雨・融雪による流量増加が寄与することが指摘されている¹⁰⁾。そこで、降雨・融雪量を推定するため、気象庁の紋別特別地域気象観測所における降水量と気温の時間データを用いて¹¹⁾、降雨・融雪による影響を調べた。まず、雨雪判別気温 T_c は 0°C とし、 $T_c > 0^{\circ}\text{C}$ の時は降雨となり、それ以下の場合には降雪に降水形態は変化すると考えた。また、融雪量 SM (mm h^{-1})はHockらを参考に、気温を指標とした次式で推定した¹²⁾。

$$SM = \frac{1}{n} \cdot DDF \cdot T \quad : T > 0 \quad (1)$$

ここで、 DDF は融雪係数($\text{mm d}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)である。 DDF は一定値とした。 DDF の決定にあたり、雨雪判別温度を 0°C として推定した降雪量と式(1)に基づく融雪量 SM から積雪水量を算出し、柏らの検討結果¹³⁾を参考に、積雪水量がゼロとなる日を消雪日とし、紋別特別気象観測所における実測消雪日と合致するように、融雪係数 DDF を調整した。その結果を基に、 $DDF = 24$ を与えた。 n は時間間隔であり、1時間毎に推定するため、 $n = 24$ を与えた。気温が 0°C を超えたとき、融雪が生じるものとした。

2.2 画像解析手法



図-3 画像解析手順

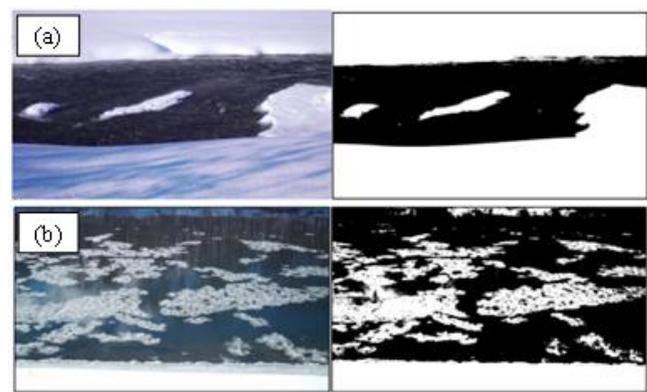


図-4 二値化処理前後の河水撮影画像の一例 (右画像：処理前、左画像：処理後)

カメラで連続撮影した河水画像から、開水面と結水面を分離し、結氷期から解氷初期にかけて、開水面積の変化を推定することを試みた。画像解析には、python (ver.3.7.3)とOpenCV (ver.4.1.1)を使用し、図-3の解析手順で行った。河水撮影画像から水面と河水、および積雪以

外の樹木や橋梁等が入らない範囲が解析範囲となるようにマスク処理を行った。次に画像の明度を調整するため、輝度処理によって明度を正規化した。RGB処理はRGB画像のBバンドの値を調整することで結水面と開水面の分離に適したパラメータを探索した結果、Bバンドが150未満の箇所を開水面として判別する方法が妥当であると判断した。二値化処理は、グレースケールに画像変換後に閾値を70として二値化し、最後に河水面と開水面の合計ピクセル数を算出した。画像処理前後の河水画像は図-4のようになる。なお、本手法による解析精度については、既往報告¹⁴⁾で河水面と開水面の分離結果の妥当性を確認しているため、ここでは省略する。

河氷変化を連続的に把握するため、10分間隔の撮影画像から開水面の抽出精度の高い画像を選別して使用した。河氷撮影画像内の左右岸にピクセル面積 (m²/pixel) を定義するための測定点を設け、実スケールでの2地点間の距離を計測した。なお、使用した画像は、河道内を右岸側から斜め方向に撮影している。よって、ピクセル面積はカメラと距離に近い右岸側の開水面と、カメラから遠い左岸側では異なる値を示す。したがって、ピクセル面積は右岸側と左岸側の各測定点から算出したピクセル面積の平均値とし、画像の補正は行わなかった。ここで算出した時系列の開水面積の変化を基に解氷進行過程を確認した。さらに、解氷開始時期における気象・水理条件と河氷変化の関係について比較を行った。

3. 結果および考察

3.1 結氷・解氷時期の気象特性

気象庁の紋別特別地域気象観測所における観測データ

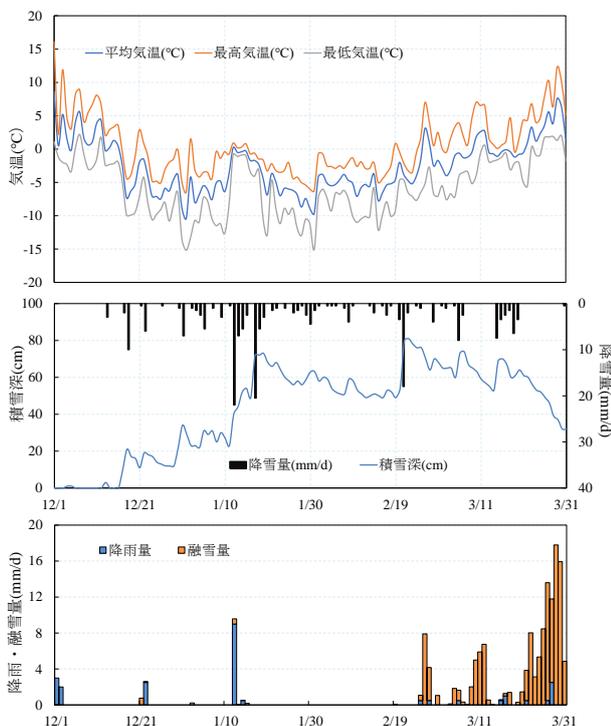


図-5 結氷・解氷期の気象・水文特性

から対象地近傍の気象特性を述べる。2021年12月から2022年3月まで気温、降雪量、降雨・融雪量を図-5に示す。2021年12月17日以降、気温が0°C以下で推移する日が2月下旬まで継続しており、この期間中は河水の形成により河氷厚が増加していたと推察できる。最高気温は2月25日に0°Cを超え始め、積雪深も減少に転じているため、融雪開始時期は2月25日以降であると推察される。本観測年の最大積雪深は80cmであり、過去5年間の平均

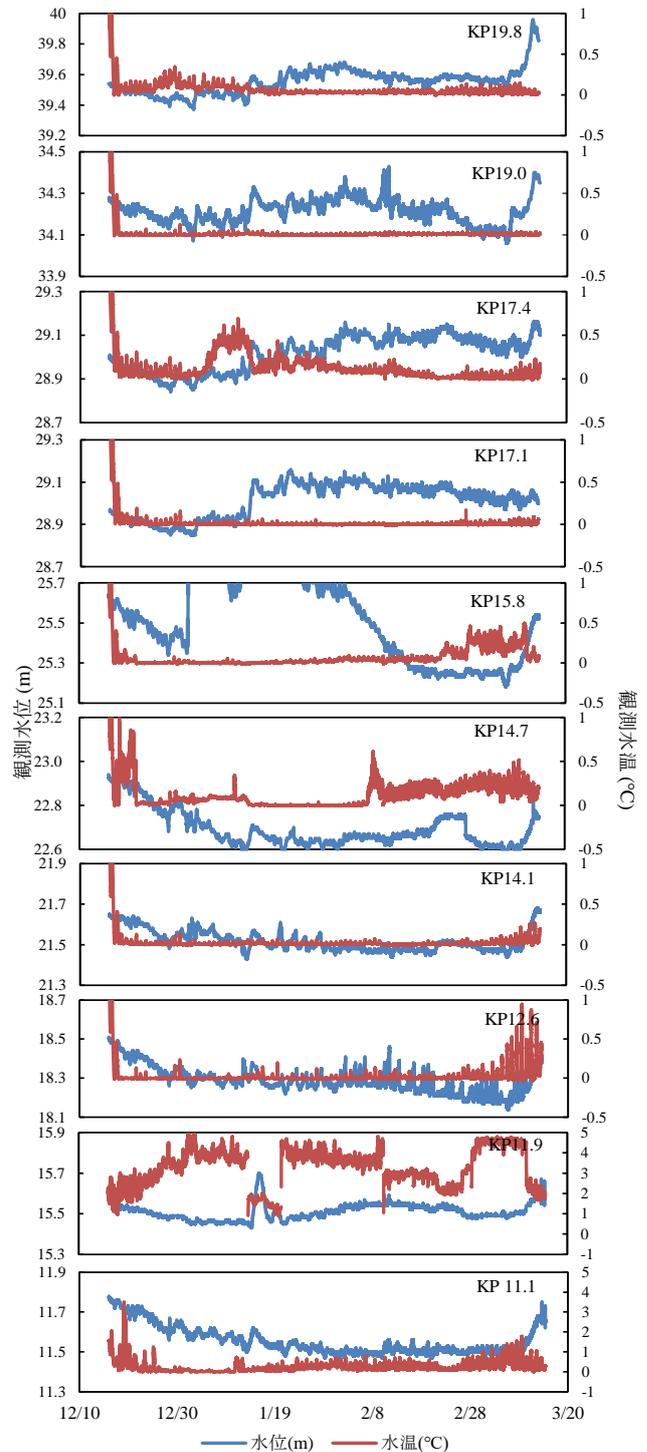


図-6 河川水位・水温変化

積雪深と比較すると、最大積雪深は30cm以上大きかったが、3月以降の融雪が顕著で、消雪時期は早かった。

降雨・融雪量の推定結果(図-5)から、降雨による流出は12月～1月が多く、1月12日に約10mmの降雨が生じ、観測期間中で最大となったが、同日は降雪量の方が多く推定されている。2月以降の降雨量は比較的小さく、気温の上昇によって融雪量が増加した。2月下旬には融雪量の増加が見られ、2月26日に日融雪量8mmの融雪が生じた。その後も徐々に融雪が進行しており、解氷時期における河川流出には融雪の寄与が大きいと推察できる。

2010年2月26日に渚滑川でアイスジャムが発生した際には、発生前に急激な水位の上昇が生じたことが報告されている⁷⁾。水位上昇前に、気温がプラス10℃以上まで上昇し、融雪水が河川へ多量に供給されたことがアイスジャムの発生要因と考えられている。一方で、本観測結果では2月の最高気温が6.9℃であり、河川流量の急激な増加は生じなかったと考えられる。そのため、河水融解が緩やかに生じたことが、アイスジャムが生じなかった要因と考えられる。

3.2 河水の経時変化と水理・気象条件の関係

解氷期から解氷時期にかけての河水変化と水理・気象条件を比較し、関係性について検討した。河川縦断の観測水位と観測水温の経時変化を図-6に示す。

まず、結氷初期の変化について考察する。観測開始から17日目(1月1日)に全地点で結氷が開始した。結氷前後の気象データを見ると、12月30日に7mm/dayの降雪が生じ、その翌日に日最低気温は-15℃まで低下した。この影響で晶氷が多量に発生し、結氷したことが伺える。結氷後の水温は、0℃を記録することが多く、水温変動も結氷前と比べて小さかった。ただし、KP11.9は、他地点よりも水温変動が大きくなっており、支川からの流入、湧水等の影響が考えられる。同じく、KP11.1も、上流のKP11.9の影響と思われる比較的大きな水温変動が見られており、両地点では厳冬期においても横断方向の河水面

積の割合が他地点よりも大きかった。

解氷初期の変化について考察する。画像解析によって、開水面が拡大した観測地点における開水面積の変化を推

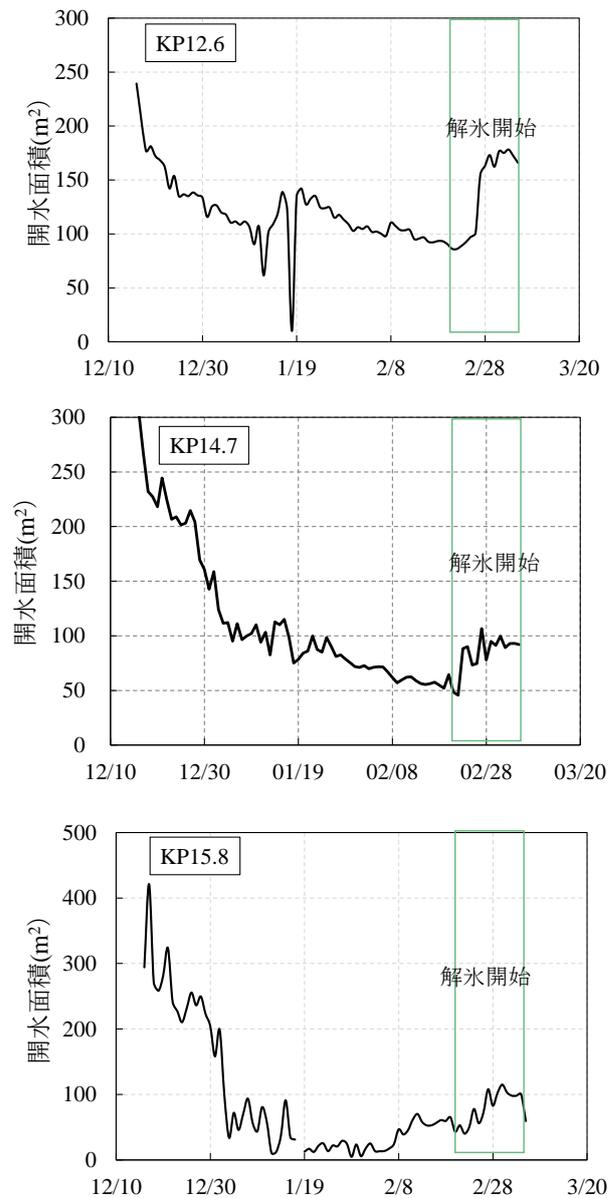


図-7 画像解析による開水面積の推定

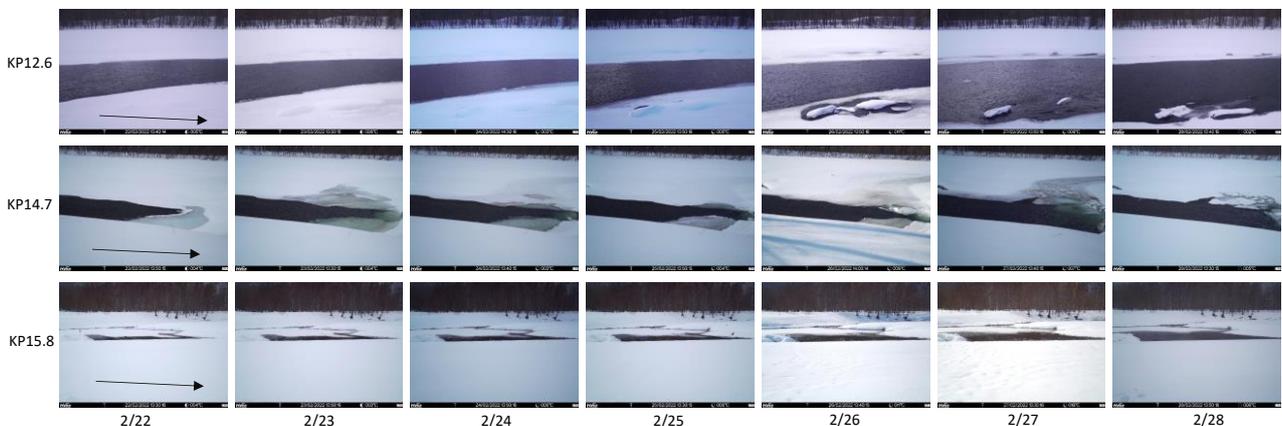


図-8 2月下旬(2月22日～2月28日)の解氷状況の変遷

定した(図-7)。ここでは、結氷が見られた1月1日以降、開水面積が増え始めた時期を解氷初期とした。開水面積が増加したのは、KPI2.6, KPI4.7, KPI5.8の3地点である。いずれの地点でも2月22日から3月7日の間に開水面積が増加し、日最高気温がプラスに転じた日と概ね対応していることが分かる。解氷初期の河氷画像を図-8に示す。河氷の融解によって河氷色調の変化と開水面の増加が見られる。KPI4.7では、河氷上に水が乗り上げ、河氷の融解が進行したと考えられる。融解時に河氷が破壊され、約0.5~1.0 m程度の小規模な河氷が下流部に滞留している様子が確認できた。また、流心位置から河岸際に開水面が拡大することで、開水面積が増加していることが分かる。KPI2.6とKPI5.8は、河氷の破壊と滞留は見られず、主に河氷の融解によって、開水面が拡大する様子が確認できた。

解氷時の水位変動を見ると、KPI4.7では2月25日に約0.15mの水位上昇が生じていた。気温上昇により2月25日から2月27日の3日間は融雪が促され、河川流量が増加したことが一因と考えられる。既往の観測結果では、解氷時には、河川流量の増加や河氷の流下によって、一時的に水位上昇することが指摘されており、解氷時期の水位変動特性は一致していた²⁹⁾。

解氷時の水温変化を見ると、解氷が生じた地点では、水温変動が大きいことが分かる。開水面積が増加した2月22日~3月7日の期間中の水温変動は、厳冬期よりも大きくなり、水温変動幅は0.3°C以上、期間中の最高水温は0.4°C以上になった。これは河氷融解が進行し、大気と水面で直接熱交換が行われ、河川水温が気温変化の影響を受けたことによると推察される。辺別川における解氷期の観測結果によると、2月下旬の解氷時に水温は1°C以上に上昇し⁹⁾、天塩川水系のペンケニウブ川の観測結果¹⁰⁾では、解氷時の水温変動幅は0.4°C~1.2°Cとなったことが報告されている。どちらの事例も、本観測結果より水温変動は大きい。解氷時の水温変化として同様の結果となったと言える。本観測では、KPI7.1よりも上流区間の解氷進行が遅く、低温の河川水が下流に供給されたことで、解氷した地点の水温変動が比較的小さかったことが他事例と異なる要因の一つと考えられる。一方で、天塩川のように上流区間の解氷が早く進行する事例もあり²⁾、各地点の気象特性やダム放流等の影響によって異なる。よって、解氷進行過程を把握するうえで、水温変動は重要な要素の一つであるが、どの程度の変動が生じるかは、河川毎に異なることが示唆された。

4. まとめ

過去にアイスジャムが発生した北海道東部の渚滑川を対象に、結氷期から解氷期にかけての河道内の河氷挙動の現地観測を行い、以下のことが分かった。

- ・河氷の形成は、日降雪量が7mmのまとまった降雪が観測され、晶氷が滞留・氷化することで進行し、2月ま

- で結氷状態が継続した。厳冬期は多くの地点で水温が0°Cで横ばいになり、解氷時期まで変動は小さかった。
- ・2月下旬以降に日最高気温が0°C以上になる時期に、観測区間内で解氷が始まっており、気温上昇は解氷時期を判断するうえで重要と考えられた。
- ・河氷画像解析によって面的な河氷変化から解氷進行過程を把握できることが分かった。解氷時の河氷変化の特徴として、主に流心位置から河岸際に融解が進行し、開水面積が増加することが分かった。
- ・結氷期に水温は0°Cで横ばいであったが、解氷が進行し、開水面が拡大することで、水温変動が大きくなることが分かった。

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) 出合寿勇, 吉川泰弘, 尾形寿: 天塩川における解氷現象に関する現地観測, 第25回寒地技術論文報告集, pp.184-189, 2009.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 小池 太郎, 吉川 泰弘, 横山 洋: 橋脚部における実氷を用いたアイスジャム氾濫実験, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.75, No.2, I_1411-I_1416, 2019.
- 6) 山田隆司, 吉川泰弘, 小池 太郎, 横山 洋: 氷板と晶氷が混在した橋脚部におけるアイスジャム氾濫実験, 水工学論文集Vol.65, No.2, 2号 p. I_169-I_174, 2020.
- 7) 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Vol.17, pp.353-358, 2011.
- 8) 伊藤丹, 黒田保孝, 吉川泰弘, 結城憲明: 天塩川における結氷初期と解氷期に関する現地観測, 寒地土木研究所月報 No.723, pp.2-10, 2013.
- 9) 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, I_931-I_936, 2019.
- 10) 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, pp.541-544, 2021.

- 11) 気象庁HP : 過去の気象データ検索,2022.10.19現在
- 12) Hock, R. : A distributed temperature-index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation, J. Glaciology. Vol. 45, No. 149, pp.101-111. 1999.
- 13) 柏 俊輔, 朝岡良浩, 風間 聡, 菊池祐二 : 同化手法を導入した融雪出水解析モデルの構築, 第23回(2010年度) 水文・水資源学会総会・研究発表会要旨集, 2010.
- 14) 平田智道, 阿部孝章, 横山洋, 大串弘哉 : 寒冷地河川の結氷・解氷過程を把握するモニタリング手法の検討, 第38回寒地技術論文報告集, pp.43-47. 2022.
- 15) 山崎誠, 笠井秀男, 杉田誠, 平山健一 : 河川結氷の解氷と水温の関係について, 第16回寒地技術論文報告集, pp.518-524. 2000.