

実用的な解氷時期推定手法の精度向上に関する検討

Study on improving accuracy of practical break-up period estimation method

北見工業大学
北見工業大学

○学生員 湊谷貴基 (Takaki Minatoya)
正員 吉川泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)

1. はじめに

冬期の北海道の河川では、気温低下や流速減少により河道内に河氷が形成される。また気温の上昇により河氷は融解・破壊され流下する。それに伴い流下した河氷が狭窄部や橋脚箇所、蛇行部などの流速の遅い箇所に堆積すると、川の流れがせき止められて、アイスジャム現象が発生する。アイスジャムは、流れの阻害による水位上昇や浸水¹⁾、取水口の閉塞²⁾、河氷に巻き込まれる事故³⁾など人的・物的な被害を引き起こす。このようなアイスジャム被害を抑え、安全性を確保するためには、アイスジャム発生前の解氷時期を事前に推定することが重要である。また解氷時期は氷板厚の減少時期と関連していることが指摘³⁾されている。現場⁴⁾では、解氷時期を推定する指標として、氷板厚の計算値が重要な指標となっている。さらに既往研究⁵⁾では入力値が6つである「実用的な解氷時期推定手法」が開発されている。この手法の有効性については、アイスジャム発生時期が明らかとなっている5つのケースを対象にして検証されている。一方で、本手法の有効性を高めるためには、より多くのケースにおいて検証を行う必要がある。また、本手法の支配的なパラメーターである「計算上の最小水温」に関する検討は十分に実施されていない。

本研究は「実用的な解氷時期推定手法」の精度向上を目的として、8か所の河川を対象に本手法の有効性を検証した。精度向上のため「計算上の最小水温」に関する検討、解氷時期を示す P_B 値のピーク値の出現回数や閾値についての検討を実施した。

2. 氷板厚計算式

解氷時期推定手法で用いる氷板厚計算式⁶⁾は、次式となる。

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

$$T_w = \frac{T_a}{1-\gamma} + \frac{\gamma T_w}{1+\gamma} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{h_w \rho_w C_p}{(1-N) h_{wa} \Delta t} \quad (3)$$

$$\alpha = \alpha' \times \alpha'' \quad (4)$$

$$\alpha' = 1 \quad (5)$$

$$\alpha'' = \frac{\frac{h_i}{k_i}}{\frac{1}{h_{sa}} + \frac{h_i}{k_i}} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{U_w}{h_w^{\frac{2}{3}}} \quad (7)$$

$$h_w = \left(\frac{Qn}{\sqrt{I_b B}}\right)^{\frac{3}{5}} \quad (8)$$

$$U_w = \frac{Q}{h_w B} \quad (9)$$

h_i [m]: 氷板厚, h'_i [m]: Δt 前の氷板厚, α [無次元]: 形成に関する係数, β [無次元]: 融解に関する係数, T_a [°C]: 気温, T_w [°C]: 水温, h_w [m]: 水深, Δt [s]: 計算時間間隔であり, 86400秒とした。 T'_w [°C]: Δt 前の水温, ρ_w [kg/m³]: 水の密度であり, 1000を与えた。 C_p [J/kg・°C]: 水の比熱であり, 4200を与えた。 N [無次元]: 横断結氷比で, 川幅に対する結氷幅の割合であり $0 \leq N \leq 1$ である。 N は, 氷板厚の計算値 h_i が全面結氷時の氷板厚 h_{im} 以上となる場合に, 全面結氷と仮定して $N = 1$ となる。横断結氷比は $N = h_i/h_{im}$ とする。 h_{wa} [W/m²°C]: 水面の熱交換係数であり 20を与えた。 h_{sa} [W/m²°C]: 熱交換係数であり 25を与えた。 k_i [W/m°C]: 氷の熱伝導率であり, 2.31を与えた。 U_w [m/s]: 流速, Q [m³/s]: 流量, n [s/m^{1/3}]: マニングの粗度係数, I_b [無次元]: 河床勾配, B [m]: 川幅である。水深はマニングの平均流速公式を用いて等流水深与えた。 T_a は観測値を与えた。

(1) 実用的な解氷時期推定手法

本手法は, 式(1)の2階微分の氷板厚の変動加速度 P_B [cm/h²]を用いて解氷時期の推定を行う。「計算上の最小水温」は, 0.00°Cから-0.10°Cの範囲で0.01°C毎に計算して, 氷板厚および氷板厚の変動加速度を計算する。各時間において氷板厚の変動加速度の最大値が P_B 値となる。なお, 本検討では, P_B の閾値として1.5[cm/h²]以上を解氷時期と仮定した。

(2) 解氷時期推定手法における入力値の設定方法

入力値は, 気温 T_a , 流量 Q , 川幅 B , 河床勾配 I_b , マニングの粗度係数 n , 計算上の全面結氷時の氷板厚 h_{im} の6つである。検討対象とした河川は, 2010年2月および2018年3月⁷⁾にアイスジャムが発生し, おおよその発生日時が判明している箇所とした。なお, いずれも解氷時期は判明していない。気温 T_a は近傍の気象庁観測所の毎時データを与えた。流量 Q は国土交通省水文水質データベースに基づいて過去10年間の低水流量の平均値とした。川幅 B はGoogle Earthの衛星データから観測所付近の20箇所の平均値とした。河床勾配 I_b は国土交通省河川整備計画の計画勾配を使用した。またマニングの粗度係数 n , 全面結氷時の氷板厚 h_{im} に関して, 既

表-1 アイスジャム発生日時, 計算条件と P_B 値

河川名	観測所名	アメダス	発生推定日時	河床勾配	川幅(m)	流量(m ³ /s)	予測時 P_B 値
嶮淵川	嶮淵	千歳	2018年3/9 午前	1/720	6.9	1.5	1.79
利別川	利別	池田	2018年3/9 午後	1/740	46.0	9.8	2.73
望月寒川	望月寒	札幌	2018年3/9	1/894	4.9	1.6	2.77
辺別川	18号	美瑛	2018年3/9	1/121	29.9	4.3	3.49
足寄川	下足寄	足寄	2018年3/9 午後	1/296	34.4	5.2	2.94
渚滑川	渚滑橋	滝上	2010年2/26	1/1000	48.6	10.7	4.78
沙流川	富川	日高	2018年3/9	1/300	43.3	26.6	1.69
浦幌川	万年橋	浦幌	2018年3/9 午後	1/900	58.6	5.1	1.61

往研究⁵⁾ではマンングの粗度係数 n を0.03, 全面結氷時の氷板厚 h_{im} を1.2と設定している. 本検討では, 精度向上のために試行錯誤を行い, マンングの粗度係数 n は0.035とし, 全面結氷時の氷板厚 h_{im} は1.0を与えた. 以上の入力値を与えて, 対象河川の解氷時期推定を実施した. 各最小水温における氷板厚, 氷板厚の変動加速度 P_B 値の時系列変化, 解氷予測時の P_B 値, アイスジャム発生日時と解氷予測時間との差を求めた.

3. 解氷時期推定の精度の検証

表-1に対象河川のアイスジャム発生日時, 本検討の入力値および予測時の P_B 値を示す. 予測時の P_B 値とは, P_B 値が1.5[cm/h²]以上の値であり, かつアイスジャム発生日に最も近い日時の P_B 値である. 各河川において, 予測時の P_B 値はアイスジャム発生日よりも前に出現しており解氷時期を推定した.

(1) 各河川の解氷時期推定

各河川の氷板厚の変動加速度, 各最小水温における氷板厚の計算値を図-1~8に示す.

a) 嶮淵川 (図-1(a), 図-1(b))

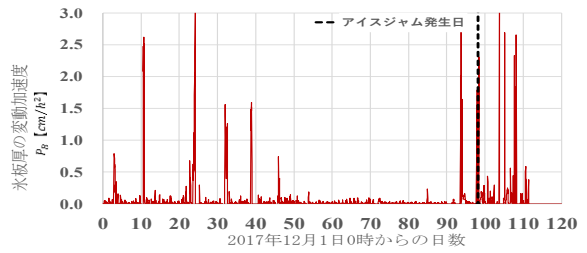
表-1よりアイスジャム発生の正確な時間までは判明していない. 本検討では観測所の水位上昇時刻を発生時刻と仮定し, 3月9日午前4時を発生日時とした. 図-1より氷板厚の変動加速度 P_B 値のピーク値は, アイスジャム発生日時の4時間前に現れて予測時 P_B 値は1.79である.

b) 利別川 (図-2(a), 図-2(b))

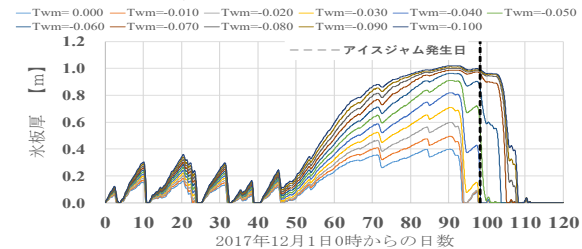
表-1よりアイスジャム発生の正確な時間までは判明していない. 本検討では足寄橋の河氷集積確認時刻を発生時刻と仮定し, 3月9日17時を発生日時とした. 図-2より氷板厚の変動加速度 P_B 値のピーク値は, アイスジャム発生日時の4時間前に現れて予測時 P_B 値は2.73である.

c) 望月寒川 (図-3(a), 図-3(b))

表-1よりアイスジャム発生の正確な時間までは判明していない. 本検討では発生時刻を12時と仮定し, 3月9日午前12時を発生日時とした. 図-3より氷板厚の変動加速度 P_B 値のピーク値は, アイスジャム発生日時の3時間前に現れて予測時 P_B 値は2.77である.

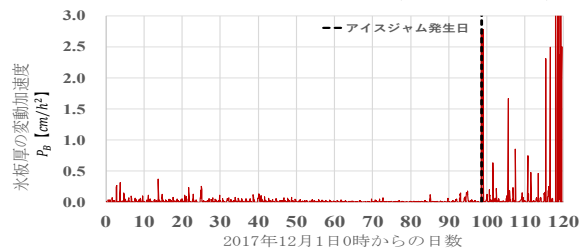


a) 氷板厚の変動加速度

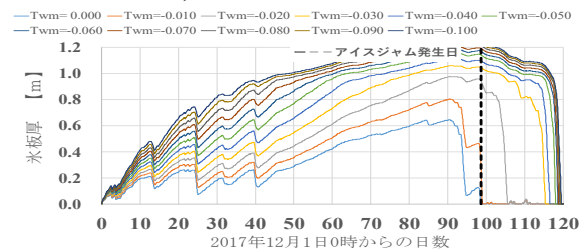


b) 各最小水温における氷板厚

図-1 氷板厚と氷板の変動加速度(嶮淵川, 嶮淵)



a) 氷板厚の変動加速度



b) 各最小水温における氷板厚

図-2 氷板厚と氷板の変動加速度(利別川, 利別)

d) 辺別川 (図-4(a), 図-4(b))

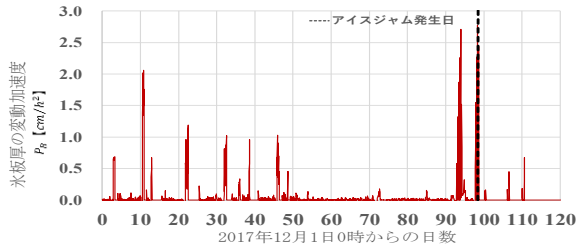
表-1よりアイスジャム発生の正確な時間までは判明していない. 本検討では被災箇所への河氷流下時刻を発生時刻と仮定し, 3月9日13時を発生日時とした. 氷板厚の変動加速度 P_B 値のピーク値は, アイスジャム発生日時の2時間前に現れて予測時 P_B 値は3.49である.

e) 足寄川 (図-5(a), 図-5(b))

表-1よりアイスジャム発生の正確な時間までは判明していない. 本検討では観測所の水位上昇時刻を発生時刻と仮定し, 3月9日14時を発生日時とした. 氷板厚の変動加速度 P_B 値のピーク値は, アイスジャム発生日時の3時間前に現れて予測時 P_B 値は2.94である.

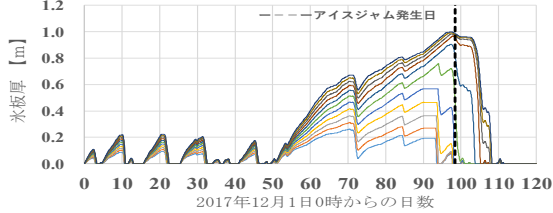
f) 渚滑川 2010 (図-6(a), 図-6(b))

表-1よりアイスジャム発生の正確な時間までは判明していない. 本検討では発生時刻を12時と仮定し, 3



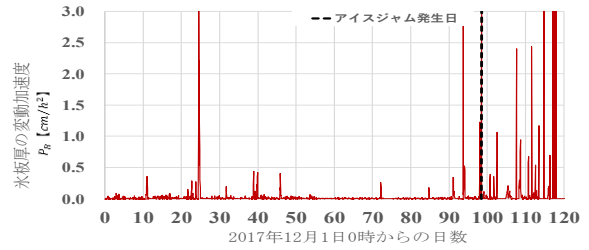
a) 氷板厚の変動加速度

— Twm=0.000 — Twm=0.010 — Twm=0.020 — Twm=0.030 — Twm=0.040 — Twm=0.050
— Twm=0.060 — Twm=0.070 — Twm=0.080 — Twm=0.090 — Twm=0.100



b) 各最小水温における氷板厚

図-3 氷板厚と氷板の変動加速度(望月寒川, 望月寒)



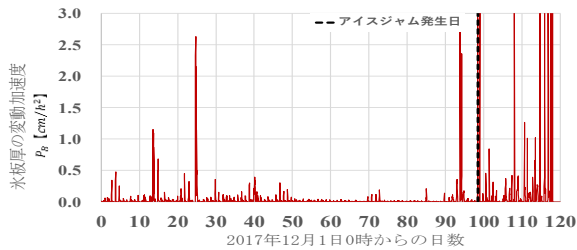
a) 氷板厚の変動加速度

— Twm=0.000 — Twm=0.010 — Twm=0.020 — Twm=0.030 — Twm=0.040 — Twm=0.050
— Twm=0.060 — Twm=0.070 — Twm=0.080 — Twm=0.090 — Twm=0.100



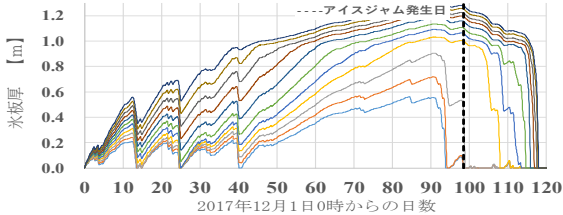
b) 各最小水温における氷板厚

図-4 氷板厚と氷板の変動加速度(辺別川, 18号)



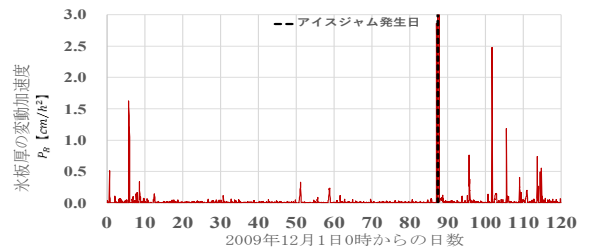
a) 氷板厚の変動加速度

— Twm=0.000 — Twm=0.010 — Twm=0.020 — Twm=0.030 — Twm=0.040 — Twm=0.050
— Twm=0.060 — Twm=0.070 — Twm=0.080 — Twm=0.090 — Twm=0.100



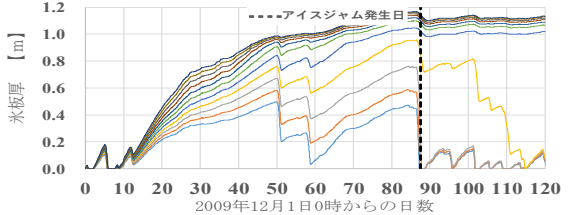
b) 各最小水温における氷板厚

図-5 氷板厚と氷板の変動加速度(足寄川, 下足寄)



a) 氷板厚の変動加速度

— Twm=0.000 — Twm=0.010 — Twm=0.020 — Twm=0.030 — Twm=0.040 — Twm=0.050
— Twm=0.060 — Twm=0.070 — Twm=0.080 — Twm=0.090 — Twm=0.100



b) 各最小水温における氷板厚

図-6 氷板厚と氷板の変動加速度(渚滑川, 渚滑橋)

月9日午前12時を発生日時とした。氷板厚の変動加速度 P_B 値のピーク値は、アイスジャム発生日時の3時間前に現れて予測時 P_B 値は4.78である。

g) 沙流川 (図-7(a), 図-7(b))

表-1よりアイスジャム発生の正確な時間までは判明していない。本検討では被災箇所への河水流下時刻を発生日時刻と仮定し、3月9日午前9時を発生日時刻とした。氷板厚の変動加速度 P_B 値のピーク値は、アイスジャム発生日時刻の2時間前に現れて予測時 P_B 値は1.69である。

h) 浦幌川 2018 (図-8(a), 図-8(b))

表-1よりアイスジャム発生の正確な時間までは判明していない。本検討では観測所の水位上昇時刻を発生日時刻と仮定し、3月9日14時を発生日時刻とした。氷板厚の変動加速度 P_B 値のピーク値は、アイスジャム発生日時刻の8時間前に現れて予測時 P_B 値は1.61である。

(2) 最小水温と予測時間誤差, P_B 値の空振り回数

計算上の最小水温を 0.00°C から -0.10°C の範囲で 0.01°C 毎に計算しているが、どの範囲でより精度良く解氷時期を推定可能かについて検討を行った。対象河川における計算上の最小水温と予測時間誤差を図-9に示す。「予測時間誤差」とは、計算で推定した解氷日時から、現地より推定したアイスジャム発生日時を引いた値である。マイナスの値となり値が小さいほど、安全側に事前にアイスジャム発生を予測したことになる。嶮淵川は最小水温 -0.03°C で誤差が-4時間、利別川は最小水温 0.00°C で誤差が-4時間、望月寒川は最小水温 -0.04°C で誤差が-3時間、辺別川は最小水温 0.00°C で誤差が-2時間、足寄川は最小水温 -0.01°C で誤差が-3時間、渚滑川は最小水温 -0.02°C で誤差が-3時間、沙流川は最小水温 -0.01°C で誤差が-2時間、浦幌川は最小水温 -0.02°C で誤差が-8時間である。いずれも計算上の最小水温 -0.04°C 以上の場合に解氷時期を推定している。

P_B が $1.5[\text{cm}/\text{h}^2]$ 以上の場合に解氷時期としているが、

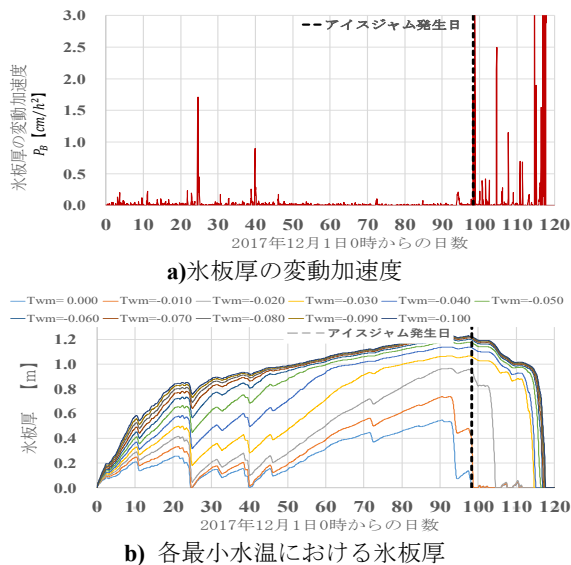


図-7 氷板厚と氷板の変動加速度(沙流川, 富川)

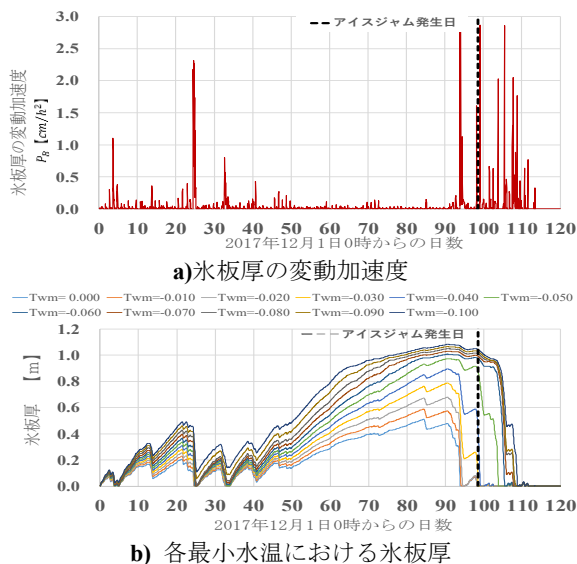


図-8 氷板厚と氷板の変動加速度(浦幌川, 万年橋)

実際に解氷するまで空振りが何回あるかについて検討を行った。対象河川において、1月から3月までの P_B 値が1.5以上となるピーク回数、1月から予測までのピーク回数、1月から予測までの期間において予測時 P_B 値の大きさの順位を表-3に示す。その結果、全河川において、実際に解氷時期を予測した予測時 P_B 値は、3番目以内に値が大きい。また嶮淵川、望月寒川、足寄川を除く5つの河川は、予測時前の P_B 値のピーク回数が2回以内に解氷時期を予測する結果であった。

4. まとめ

本研究は、既往研究⁵⁾より開発された「実用的な解氷時期推定手法」の精度向上を目的として、8か所の河川において検討を行った。8河川においてアイスジャム発生日前までに解氷時期を推定した。その差は最大で8時間であった。計算上の最小水温が 0.00°C から -0.04°C の範囲で解氷時期を推定した。 P_B が $1.5[\text{cm}/\text{h}^2]$ 以上の場合に解

表-3 P_B 値に関する各河川の比較

河川名	ピーク回数(1月~3月)	予測までの回数(1月~)	予測 P_B 値の大きさ(1月~予測時)
嶮淵川	15	8回目	3番目
利別川	14	1回目	1番目
望月寒川	9	7回目	1番目
辺別川	18	2回目	2番目
足寄川	18	4回目	2番目
渚滑川	6	3回目	1番目
沙流川	13	1回目	1番目
浦幌川	9	3回目	3番目

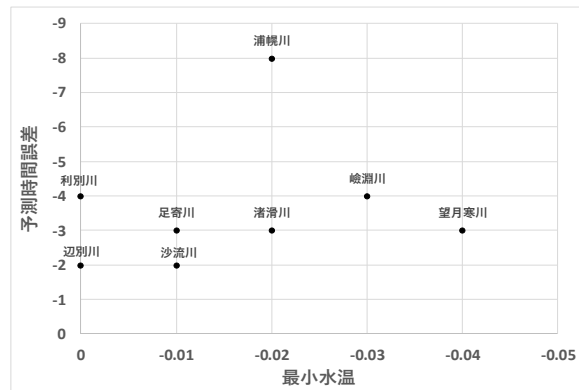


図-9 P_B 計算上の最小水温と予測時間誤差

氷時期として推定した結果、8河川において、解氷時期を予測した予測時 P_B 値は、1月から予測日までの期間で、3番目以内に値が大きい。8河川中5河川は、予測時前の P_B 値のピーク回数が2回以内に解氷時期を予測した。

本手法の全面結氷時の氷板厚 h_{im} は重要な値であり、 0.1m の誤差に対して、解氷予測時期が大きく異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, 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, 平成26年度北海道開発技術研究発表会, 2015.
- 3) 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, pp2-10, 2013
- 4) 横山洋, 吉川泰弘, 大串弘哉: アイスジャム発生予測プログラムの現地河川への適用性評価と課題について, 国土交通省, 国土技術研究会, 2021.
- 5) 吉川泰弘, 横山洋, 平田智道, 阿部孝章: 氷板厚計算式に基づく実用的な解氷時期推定手法の開発, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.78, No.2, pp.1_205-1_210, 2022.
- 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.