

寒冷地河川のアイスジャムによる河道内災害及び取水障害に対応するための 河水変動計算モデルの開発に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 28～令 2

担当チーム：寒地河川チーム

研究担当者：矢部浩規、大串弘哉、前田俊一、

岡部博一、阿部孝章、横山洋、伊波友生

【要旨】

結氷河川において流下河水が河道内で閉塞するアイスジャム現象は、河川の防災・維持管理上の課題となっている。本研究は、アイスジャム災害の抑制、防止策の検討および提案を目的としている。まず道内のアイスジャムによる取水障害発生の現状と課題について聞き取り調査を行った。またアイスジャムによる災害の現地調査を行い、河水閉塞の機構解明を進めた。アイスジャム被害抑制には発生リスク上昇の事前予測が有効であることから、実務利用を想定したアイスジャム発生予測手法の開発を行うとともに、アイスジャムによる災害事例に適用し、その有効性について検討を行った。

キーワード：結氷河川、河水厚予測モデル、アイスジャムスケール、解氷期の河水調査

1. はじめに

北海道では多くの河川が冬期に結氷し、河道内に河水が形成される。河水は硬い氷板と柔らかい晶氷、氷板上の積雪に分かれる（図-1参照）。解氷期に入り、気温、水温や河川水位が上昇すると、河水は融解・破壊されて流下する。河道条件や気象条件によっては、河川を流下する氷板や晶氷が河道内で閉塞するアイスジャム現象が発生する（写真-1参照）。

アイスジャムの発生時期は、結氷初期である 12 月の気温低下時、解氷期である 2 月後半以降の気温上昇時のほか、1～2 月の厳冬期でも水道や発電等の通年取水を行っている取水施設の取水口付近で晶氷によるアイスジャムが発生する¹⁾。そのためアイスジャムは結氷期間を通しての警戒が必要である。とりわけ、春先に気温上昇とまとまった降雨が重なることで発生するアイスジャムは、融雪出水による河川水位の上昇に加え、大量の解氷した氷板や晶氷の流下による河道閉塞も発生するため、災害の発生範囲や規模も大きくなる。

発生したアイスジャムは、河川水位の急上昇や川からの溢水による浸水²⁾、河道内での冬期工事従事者の流下する河水への巻き込まれによる事故^{2) 3)}、取水口の閉塞による取水障害¹⁾、樋門吐口の閉塞²⁾などをもたらす、結氷河川の防災や維持管理上の懸案となっている。

結氷河川に関わる実務担当者からは、被害軽減策の検討および対応の事前準備の観点から、アイスジャム発生危険性を簡易に予測・監視できる手法の開発への要望が

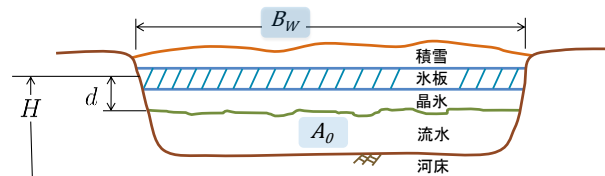


図-1 結氷河川の河水横断模式図



写真-1 常呂川忠志橋付近に発生したアイスジャム

(2018年3月10日撮影：国土交通省北海道開発局提供)

ある。本研究は、アイスジャム災害の抑制、防止策の検討および提案を目的としている。まず道内のアイスジャムによる取水障害発生の現状と課題について聞き取り調査を行った。またアイスジャムによる災害の現地調査および模型実験を行い、河水閉塞の機構解明を進めた。アイスジャム被害抑制には発生リスク上昇の事前予測が有効であることから、実務利用を想定したアイスジャム発

生予測手法の開発を行うとともに、アイスジャムによる災害事例に適用し、その有効性について検討を行った。

2. アイスジャムによる取水障害の現状と課題

2.1 調査対象

上水道は地域の生活や経済を支えるインフラであるが、結氷河川では冬期に取水口付近でアイスジャムが発生し、取水障害が発生する事例もみられ、冬期の水道事業者の課題である。寒地土木研究所は北見工業大学と共同で、冬期の上水道取水障害の現状と課題把握のための聞き取り調査を行った⁴⁾。

調査は道内において特に冬期の寒さが厳しいと考えられる道東・道北の7つの総合振興局および振興局(上川、留萌、宗谷、オホーツク、十勝、釧路、根室)管内の91市町村を対象に、2014～2015年にかけて実施した。聞き取り調査の流れを図-2に示す。調査は、各市町村の概況を把握する1次調査と、具体的な課題点や対策等まで掘り下げて聞き取る2次調査の2段階で実施した。

2.2 聞き取り調査(1次調査)

各自治体の取水方法を事前に確認し、表流水(河川水)からの取水を行っている自治体に、河氷による取水障害(断水等)の有無、取水障害が発生した場合は概況(発生時期・期間、場所、規模、考えられる原因等)および対策について聞き取りした。

図-3(a)は対象管内91市町村の水道取水方法である。表流水(河川水)からの取水は72市町村であり、管内市町村の約8割を占める。図-3(b)は表流水取水を行う市町村における、河氷による取水障害への対応の有無である。56市町村から回答を得ており、うち22市町村(39%)で取水障害への対応ありと回答があった。現在も定期的に対策を継続実施しているのは18市町村、不定期であるものの対策を実施しているのは3市町村、過去に対策を実施していたのは1市町村である。

図-4は各市町村の取水障害への実施対応策である。1つの市町村で複数の対策を実施している場合は、それぞれ1件で計上している。取水口の氷板除去が最も多く、次いで氷割りの実施、スクリーンの付着氷除去となっている。取水口付近の氷板除去は結氷初期(12月)と融雪期(3月)の対応発生が多く、氷割りは厳寒期に状況を見て実施するとの回答が多かった。

2.3 聞き取り調査(2次調査)

アイスジャムによる取水障害対応の詳細を把握するため、1次聞き取りを行った市町村の中から、給水対象人口が一定規模以上(概ね5000人以上)かつ取水管理上の課題ありと回答した自治体を抽出し、うち6自治体・1水道企業団から回答を得た。各事業者の聞き取り内容から定性的な考察を行った。

1) 河川からの取水場所

取水箇所は頭首工、取水樋門、河床部から等、各市町村で様々である。

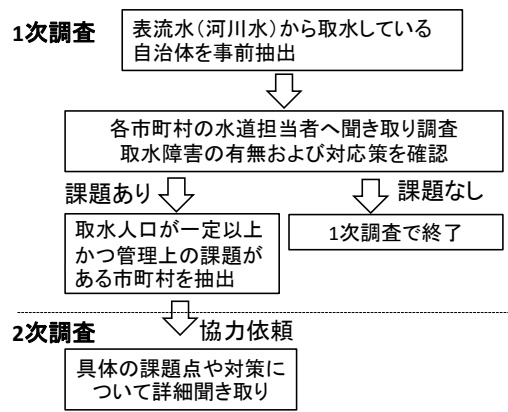


図-2 聞き取り調査の流れ

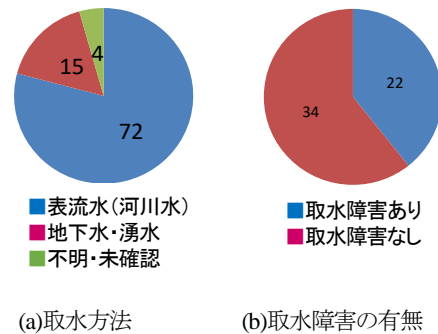


図-3 聞き取り調査結果(1次調査)

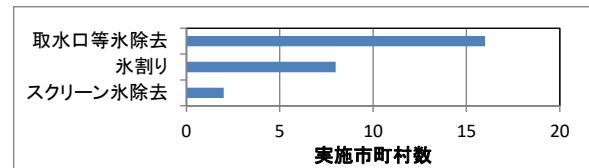


図-4 取水障害対策の実施市町村数(1次調査)

2) 取水障害の発生状況

12月の結氷初期と、3月の融雪期に解氷した氷板が流下し取水口付近に詰まることで、取水障害が発生している。また厳冬期である1～2月にかけても、スクリーンへの氷付着が多く発生している。氷の付着は夜間から朝にかけての発生が多いが、発生の事前予測が難しく、結果として除去等の対策も都度の対応となっている。

3) 取水障害への対策

取水障害への対応策は、各現場特性に応じて様々なものが実施されている。例えば水中ミキサー、ポンプ攪拌、ヒーター設置等による河氷発生抑制、アイスブームによる河氷流入の抑制、角落としによる晶氷の流入抑制等が行われている。また取水箇所の水深確保のための対応策としての土堤、土のう設置も行っている。

取水口やスクリーンに詰まるあるいは付着した氷板、晶氷は人為的に除去せざるを得ない。除去実施では、バックホウ等の重機のほか、人力による除去作業を行っているとの回答が数多くあった。また作業実施の時間帯も、

夜間や早朝の実施が見られた。重機作業、人力による作業ともに結氷した河川上での作業には危険が伴い、夜間・早朝はさらに危険性が高まる。

4) 対応人員・体制の確保

前述したとおり、取水障害の発生時期は予測が困難である以上、対応発生に備えて現場監視や晶氷除去に対して24時間対応の体制確保が必要となる。一方で、多くの自治体で担当職員数の減少、高齢化の進行を懸念する声があった。また作業の特性上、ベテランの経験が頼りの部分も多いと思われる。若年技術者の確保のほか、対応技術の伝承や共有など、インフラの維持管理に共通する課題が上げられる。

5) その他

事業特性上、取水停止が許されないケースもみられる（例えば製紙業等、取水継続が必須の事業所の取水）。このような厳しい事業条件での対応ケースの蓄積や共有も今後の課題といえる。

2. 4 聞き取り調査とりまとめ

聞き取り調査により、各自治体で冬期間の取水障害に対する体制確保の負担が大きい現状が明らかになった。取水口の閉塞を防止するハード対策とともに、取水障害発生 の事前予測手法などのソフト対策が必要である。なお晶氷によるアイスジャムの事前予測は、晶氷変動量（Fv値）を予測指標として、冬期の水道取水の実務において適用されており、実用的なソフト対策として期待される。

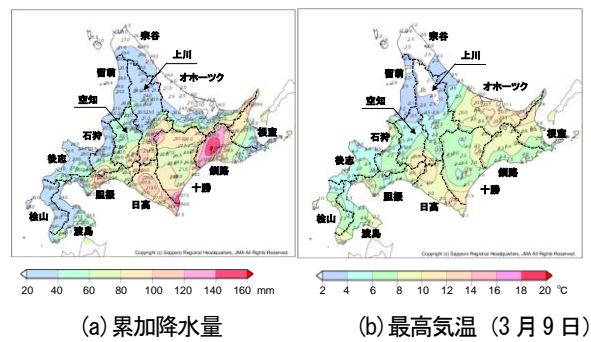
3. アイスジャム現地調査

3. 1 2018年3月のアイスジャム災害概要

アイスジャム現象自体は、北海道をはじめとした結氷河川では一般的な現象である。しかし解氷期に気温の上昇とまとまった降雨が重なると、アイスジャムによる被災リスクは高まる。近年の事例では、2018年3月8日から9日にかけて、河氷の融解・破壊・流下によるアイスジャム現象およびそれに伴う被害が道内の広範囲で同時に発生し、多くの被害をもたらした²⁾。このようにアイスジャムによる洪水が広範囲かつ同時発生した例は、少なくとも近年は他に確認できない。また、これまで発生を予想していなかった箇所が多発しており、アイスジャムの発生箇所や時期の予測の困難さを改めて認識することとなった。

アイスジャム洪水の被害軽減には、アイスジャム発生危険箇所の抽出や発生時期の予測を、より簡便かつ実用的に行うことが求められる。また気候変動により、解氷期も含めた気象条件の変動が将来的に予想される中、結氷河川での出水や河氷挙動に及ぼす影響評価も今後求められる。これらの研究は途上段階であり、実務者に利用可能なアイスジャム発生予測ツールの開発が必要となる。

本研究では2018年3月に北海道内各地で発生したアイスジャムについて、現地の残存河氷や水位痕跡等の1次データを収集整理し、アイスジャムによる洪水被害状況を明らかにするとともに、アイスジャム発生過程と影響



(a) 累加降水量 (b) 最高気温 (3月9日)
(3月8日15時~10日0時)

図-5 累加降水量および最高気温^⑤



図-6 調査箇所一覧 (図中番号は表-1の番号に対応)

因子を考察した。また著者らが既往研究等で提起した河氷厚予測手法⁵⁾ やアイスジャムスケール⁶⁾ を現地に適用し、アイスジャム発生危険箇所抽出および発生時期の予測を検討した。

3. 2 アイスジャム災害の概況

1) 発生時気象概況 (札幌管区気象台資料に一部加筆)⁷⁾

図-5は、2018年3月8日15時から3月10日0時にかけての累加降水量および9日の最高気温である。北海道南部で累加降水量が多い傾向にあり、釧路、上川南部、胆振、十勝、日高の各地方で100mmを超える箇所がみられる。最高気温はオホーツク、日高地方の一部で10°Cを超えているほか、北海道南部で概ね高い傾向がみられた。なお3月9日の日降水量は、北海道内の73地点の気象観測所において3月の1位を更新した。

2) 調査対象河川

調査箇所を図-6および表-1に示す。調査は道内11河川、12地点で実施した。アイスジャム現象は道内他河川でも広く発生したと考えられるが、解氷が進む中での河道内の氷や雪が調査対象である性質上、被害発生状況、現地アクセス等を総合的に考慮して対象河川を選定した。

アイスジャムは例年、上川北部、留萌北部、宗谷およびオホーツク地方を中心とした北海道北部・東部での発生件数が多い傾向にある。しかし今回は上川南部、十勝、胆振、日高、石狩地方といった、これまでよりも南側の地域で同時に発生したことが特徴である。これは3月8日から9日にかけて北海道南部で降雨量が多く、かつ気温が上昇したことが影響したためと考えられる。

表-1 アイスジャム発生時の推定日時および発生関係因子の整理

番号	河川名 (市町村)	河氷・水位痕跡調査区間	UAV 空撮	痕跡 調査	アイスジャム発生箇所の特徴		アイスジャム発生日時の推定	
					河氷・水位痕跡の状況	流速低減因子	可否	推定時刻及び確認手段
1	辺別川 (美瑛町)	9線橋から上流約2km	3/16	3/16	被災箇所上流160mの砂州で河氷集積・残存、水位上昇痕跡あり	砂州 縦断勾配変化点	×	
2	布礼別川 (富良野市)	東9線橋～扇山8線橋	3/16	3/15/16	河道内全体で河氷集積・残存、水位上昇痕跡あり	縦断勾配変化点 河道内構造物(橋梁)	○	目撃情報で9日10時ごろ越水を確認
3	望月寒川 (札幌市)	東札幌これ公園付近	3/15	—	縦断勾配変化点の上流側約100mで河氷集積の痕跡確認	縦断勾配変化点	×	
4	嶮淵川 (千歳市)	泉郷橋から下流約600m	3/15	3/15	水位観測所下流側約200mで河氷集積の痕跡確認	縦断勾配変化点	○	嶮淵観測所で9日4時以降水位上昇を確認
5	鶴川 (むつ市)	河口～KP5.0	3/15	3/19/22	河道内全体で河氷集積を確認、砂州等河氷集積・残留	砂州	○	鶴川観測所CCTVで9日9時30分ごろ河氷到達確認
6	沙流川 (日高町)	発電用取水堰から上流約2km	3/17	3/21	調査区間内砂州、蛇行部に河氷集積痕跡あり	砂州 蛇行	×	
7	浦幌川 (浦幌町)	浦幌十勝川合流点から上流約2km	3/17	3/21	調査区間内全体で河氷集積痕跡を確認	本川との合流	○	十勝川観測所で9日14時以降水位上昇を確認、13時30分ごろCCTVで河氷到達確認
8	利別川 (足寄町)	足寄橋～両国橋	3/17	3/20	調査区間内全体で河氷集積痕跡を確認	蛇行	○	監視カメラにより17時以降河氷集積確認
9	足寄川下流 (足寄町)	共励橋上流0.9km地点から上流1.4km	3/17	3/20	砂州、河道蛇行部で河氷集積痕跡を確認	蛇行 本川との合流 河道内構造物(橋梁)	○	足寄観測所で9日14時以降水位上昇を確認
10	足寄川上流 (足寄町)	茂足寄橋の上下流約200m	3/16	3/20	調査区間内全体で河氷集積痕跡を確認	蛇行	×	
11	常呂川 (北見市)	KP31.0～KP31.7	3/17	3/17/3/19	調査区間内の砂州、河氷集積痕跡を確認	砂州 蛇行	○	忠志観測所で9日15時以降水位上昇を確認
12	網走川 (美瑛町)	KP28.0～KP35.0	3/17	3/20/3/21	調査区間内の砂州、勾配変化点にあたる箇所河氷集積確認	砂州 蛇行 縦断勾配変化点	○	9日午後以降、美瑛水位観測所の水位変動から推定

3) アイスジャム発生箇所の被害状況

各河川のアイスジャム発生箇所の状況を表-1にまとめた。また以下に、主要な事例を挙げる。

① 石狩川水系辺別川での被害状況

被害発生箇所は美瑛町内の町道9線橋の上流160mであり、2016年8月の出水による護岸被災箇所の復旧工事を行っていた現場代理人が上流から流れてきたとみられる氷と雪に巻き込まれて死亡した。当時の報道によると「大量の雪の塊が土のうを乗り越え、雨とともに一気に押し寄せてきた」とある。図-7①に被災箇所の状況を示す。被災箇所上流は砂防施設が整備され、この付近が河床勾配の変化点である。図中赤丸で示す中州には、多数の河氷残存および水位上昇痕跡がみられた。一方、砂州上流の流路工は氷の集積、水位上昇の痕跡はほとんどみられなかった。解氷した氷と雪がダム状に集積しアイスダムが被災箇所の上流で形成され、それが一度に決壊・流下して氷や雪が被災箇所に押し寄せたと推測される。

② 石狩川水系布礼別川での被害状況

被害発生箇所の富良野市南扇山地区では82世帯151人に避難勧告が発令された⁸⁾。当時の報道では「橋桁に引っ掛かった氷の塊が流れを妨げ、午前10時ごろに越水した」とある。図-7②に被災箇所の状況を示す。河道内および橋梁付近に残存河氷が多く確認され、一部区間では河道外への氷の乗り上げのほか、越水の痕跡もみられた。

③ 沙流川での被害状況

被害発生箇所は、日高町内にある発電用取水堰付近である。当時の報道によると水力発電所の取水堰修復工事を行っていたところ、上流から流れてきた氷と雪により、川岸に止めてあった車両3台が流されたとある。図-7③に被災箇所の状況を示す。河氷の残存は被災箇所では見られなかったが、図中赤丸で示す上流側中州で多数みられた。当時の報道には「鉄砲水が発生し」とあり、辺別川と同様、氷や雪が被害発生箇所の上流側にダム状に集積しアイスダムが形成され、その後突然流下したものと推測される。なおアイスジャムの形成箇所は現地痕跡調査では特定できなかった。

④ 十勝川水系浦幌川での被害状況

浦幌川下流の朝日樋門のゲート付近に河氷が集積した。図-7④に当時の河道状況を示す。浦幌川は樋門付近も含め、水面全体が河氷に覆われている。本川である浦幌十勝川の縦断勾配はほぼ水平であり、また当時は結氷しているため、浦幌川の氷が合流点付近で滞留集積し、水位も急に上昇したと考えられる。

3.3 アイスジャム発生状況の考察

3.3.1 アイスジャム発生箇所の河道特性整理

既往研究の知見より、アイスジャムは流速が低減する箇所が発生しやすいとされる。今回のアイスジャム痕跡確認箇所において、流速低減に影響すると考えられる河道特性を以下のとおり抽出した。

1) 縦断勾配の変化点

縦断勾配変化点付近では、勾配変化のほか、河道幅の

変化など、流速低下をもたらす因子が多い。辺別川、布礼別川のアイスジャム発生箇所は、山間地で勾配が急なところから平地・扇状地等で勾配が緩くなる箇所周辺である。その他、嶮淵川、望月寒川も勾配変化点とみられる箇所周辺でアイスジャムが確認されている。

2) 本川・支川の合流点付近

本川と支川の合流点付近は流速が低下しやすい。今回の調査では、浦幌川（浦幌十勝川の支川）、足寄川下流（利別川の支川）が該当する。

3) 砂州

砂州付近では、縦横断的に流速低減部分が生じる。辺別川では事故箇所の上流約160mにある砂州の上流部に河水集積の痕跡が見られ、その他の河川でも河道内砂州付近は氷板集積が他の場所に比べて多く確認された。

4) 蛇行および湾曲

河道蛇行および湾曲部では、横断的に流速低減が生じるとともに流下阻害となるため、河水の集積が生じやすい。

5) 河道内構造物

橋脚をはじめとした河道内構造物付近では流速が低減するため、河水の集積が確認されている。また浦幌川では樋門周辺に河水が集積している。

今回の調査箇所における河道内流速低減因子の該当箇所は、蛇行および湾曲が6箇所、縦断勾配の変化点が5箇所、砂州が5箇所、本川・支川の合流点付近が2箇所、河道内構造物が2箇所である。

3. 3. 2 アイスジャム発生時刻の推定

続いて、現地調査からアイスジャム発生推定時刻の絞り込みを行う。本研究では、各河川の調査対象区間で、河水の河道内集積が最初に生じたと確認または推定できた時刻を、アイスジャム発生日時と定義した。

a) 近傍水位観測所の水位

アイスジャムは河道が河水で閉塞するため、解氷や融雪出水による水位上昇と比べて短時間で水位が急上昇する。本調査では、水位急上昇の開始時刻を、アイスジャム発生推定時刻とした。今回の調査では5箇所、アイスジャムに起因するとみられる水位上昇を確認した。

b) CCTV・監視カメラによる画像

河川CCTVおよび監視カメラによる河道内撮影画像には、上流からの河水流入状況を連続撮影できたものがあり、河水の閉塞状況ならびに発生時刻を特定できた。今回の調査では2箇所、河水流入時刻を把握できた。

c) 目撃情報

今回の調査では1河川で目撃情報により発生時刻を推定できた。水位変化や撮影画像のみではアイスジャム現象把握は困難であり、河川巡視等の人の目による確認もアイスジャム発生時刻推定に重要な情報である。

3. 4 現地調査のまとめ

・アイスジャムは砂州、蛇行・湾曲部、勾配変化点、河川構造物、本川合流点付近といった流速が低減される場



図-7 アイスジャム発生箇所の状況

所で発生することを確認した。これらは既往研究の知見とも一致する。

・アイスジャム発生箇所の把握において、UAV撮影による空撮は迅速かつ安全な調査に貢献した。アイスジャム発生日時は、目撃情報のほか、CCTV等の画像や近傍水位の変動データから推定可能であった。一方、アイスジャムが上流で形成された後に再流下して被災したケースでは、現地調査のみでは発生日時推定は困難であった。

4 アイスジャム発生予測手法の開発

結氷河川に関わる実務担当者からは、簡易にアイスジャム発生危険性を予測・監視できる手法の開発への要望がある。そこで本研究では北見工業大学と連携して、アイスジャムによる被害軽減のためのソフト対策として、実務担当者の利用を想定し、以下のアイスジャム予測・監視技術の開発を試みた。

- ①河氷厚予測モデルによる解氷進行の予測
- ②物理的指標によるアイスジャム発生危険個所の抽出
- ③解氷予兆を捉える河氷挙動監視

まず①の河氷厚予測モデルを用いたアイスジャム発生時期の事前予測の適用について検討した。道内の複数結氷河川を事例として、解氷期における氷板厚変動の再現計算を行い、その計算精度を検証した。また再現計算結果をもとに、アイスジャム発生時期の事前予測への適用性について考察を行った。また、現在検討を進めている、②アイスジャムスケールによる発生箇所の抽出、③河氷挙動監視技術の開発についても、概要を報告する。最後にこれらの技術を踏まえた、より効果的なアイスジャム発生リスクの予測方法の提案と今後の課題についてとりまとめる。

4. 1 河氷厚予測によるアイスジャム発生時期予測

4. 1. 1 河氷厚予測の基礎方程式

結氷河川における河氷の解氷、流下、アイスジャム発生など、解氷期の一連の現象を精緻に予測するためには、河氷厚変動予測計算を行い、河川流れ、水温、河氷の形成、融解、破壊、移動、河氷厚の変化を同時に計算することが望ましい⁹⁾。しかし実務で利用する河氷厚変動予測においては、汎用 PC 上で作動すること、データ入出力に関する操作がシンプルであること、入力データの入手および予測結果出力がリアルタイムで可能なことが条件として求められる。

そこで本研究では、前述した実務利用の必要条件を満たし、現場で求められる解氷期の河氷厚変動を十分な精度で予測可能なモデルとして、吉川らが提案した手法を用いる⁹⁾。河氷の氷板厚の変動は、大気、積雪、氷板、晶氷、流水間での熱収支(図-8 参照)に基づき、最終的に以下の式(1)、(2)で与えられる。

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

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

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。計算出力は1時間間隔、最小河氷厚は0.001mである。

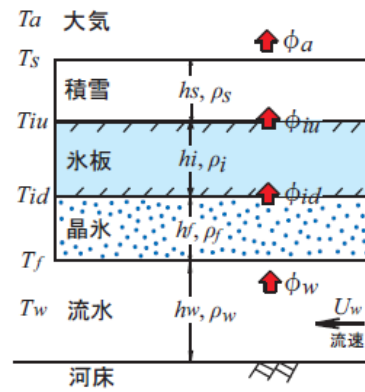
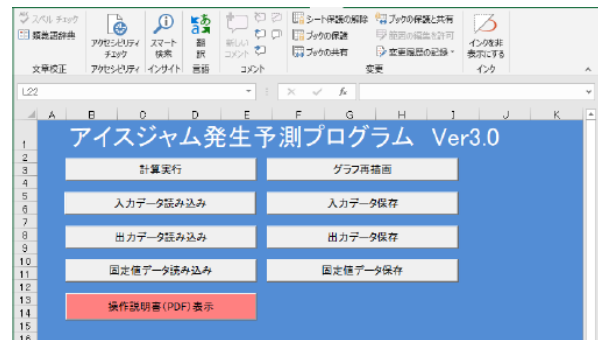
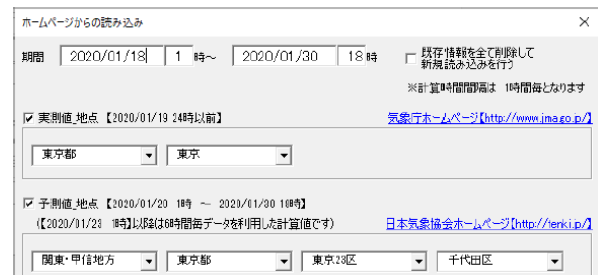


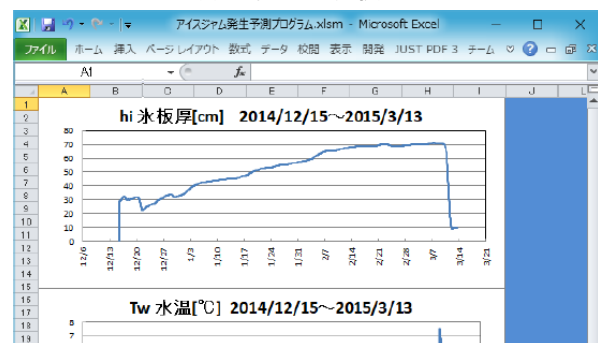
図-8 河氷厚予測の熱収支模式図⁹⁾



(a) メイン画面



(b) 気象データ選択画面



(c) 計算結果出力画面

図-9 河氷厚予測プログラムのユーザーインターフェイス

式(1)中の係数 α 、 β は、以下の式(3)、(4)で設定した。

$$\alpha = 0.906 - 2.770 \frac{ibB}{h_w} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{u_w}{h_w^{2/3}} \quad (4)$$

ここで u_w ：河川流速である。なお、 α については式(3)を初期設定値としているが、その他に固定値を手動で設定可能である。

4. 1. 2 実務利用を想定したプログラム概要

プログラムは、河氷厚の予測対象地点において、現況の河氷厚のほか、今後の気象変化に応じた河氷厚変動を推定できるよう設計した。現場担当者の日常利用を想定し、Microsoft Excel VBAにより作成した¹⁰⁾。図-9にプログラムのユーザーインターフェイスを示す。計算の一連作業は、全てMicrosoft Excel上で可能である。

ユーザーの設定が必要な初期条件は、予測計算地点の河床縦断勾配、水面幅、流入河川水温である。これらのデータは既存測量データがない地点においても、地理院地図やGoogle Earthによる平面座標、標高値、航空写真画像など、無償で公開されているデータからでも設定可能である。流入河川水温は地点に応じて試行錯誤での決定が必要である。今回の事例は0~2°Cで設定した。 α は、式(3)で算定する値を初期設定値とした。河氷厚の実測値を十分再現できない場合はユーザー側で調整が必要である。その他モデル内の各係数は、開発者側で設定した標準値を用いる。

河氷厚の変遷に必要となる毎時データは、気温、風速、日照時間、降雪量、河川水位である。気象データのうち、実測値は気象庁アメダス観測所データを用いる。将来予測は、日本気象協会による10日間天気予報を用いるよう、既報⁹⁾のものから改良した。予測値は気温、天気、風速であること、6時間ごとのデータであることから、各データの間は線形補間(降水量は6分割)して毎時データに換算している。図-9(b)に示すとおり、気象データの取得は、近傍のアメダス観測所および天気予報の市町村を選択することで容易にできる。従前は2日先までの予測値であったが、10日先までの予測が可能となることで、気象条件の変化に対する事前準備への活用の幅が広がる事が期待できる。

図-9(c)の計算例に示すとおり、河氷厚予測値(図中では氷板厚)は結氷期に入り気温が低い状況では徐々に増加する(河氷形成過程)。その後、気温の上昇とともに河氷厚予測値は減少に転じる(河氷解氷過程)。特に急な気温上昇やまとまった降雨で解氷が急速に進むと、河氷厚減少も短期間に進行し、実際の現場でもアイスジャム発生の可能性が高くなると考えられる。

4. 1. 3 河氷厚予測の現地事例への適用

2018年および2020年にアイスジャムが発生した結氷河川での河氷厚変動計算を行った結果をもとに、現地事例への適用性を考察する¹¹⁾。

図-10に2017年12月1日から2018年3月31日までの幌加内(雨竜川)、忠志(常呂川)、嶮淵(嶮淵川)の3地点の河氷厚予測計算結果を示す。幌加内、忠志における河氷

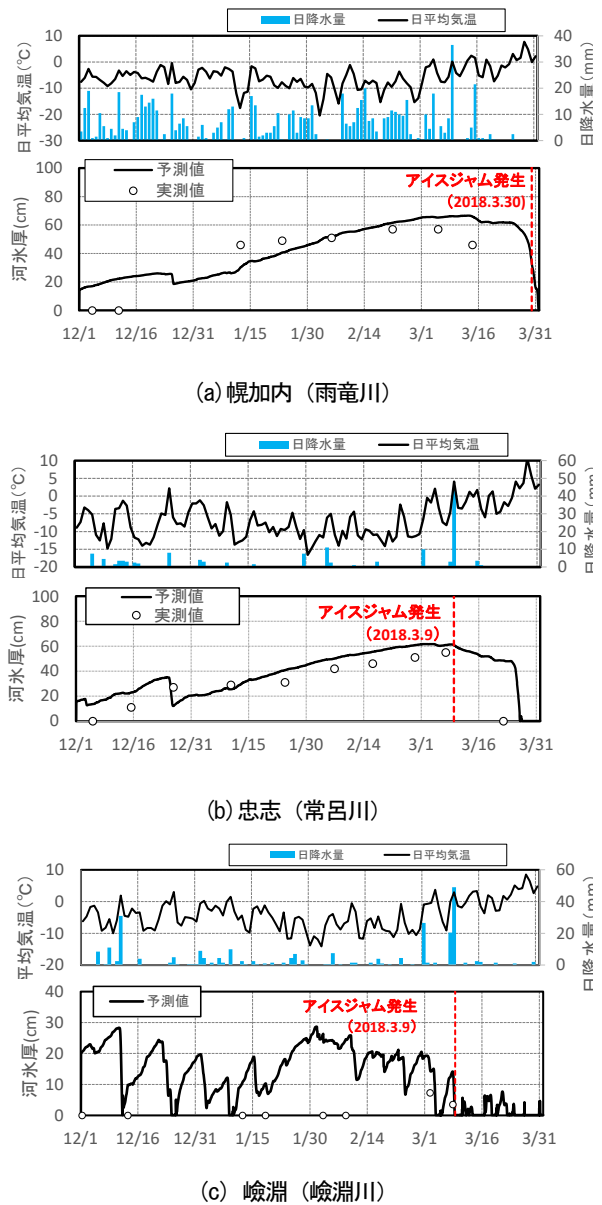
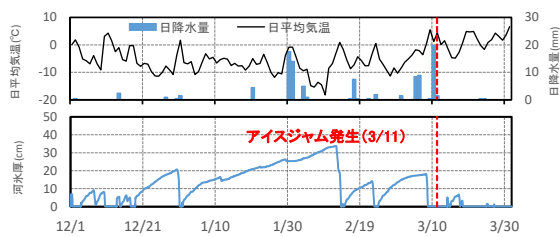
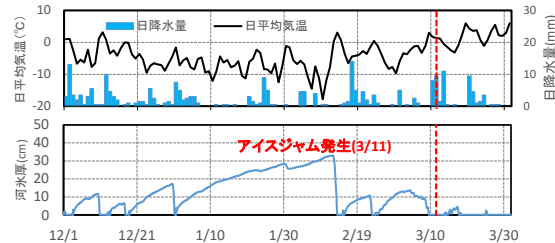


図-10 2017年12月から2018年3月までのアイスジャム発生箇所の河氷厚予測値

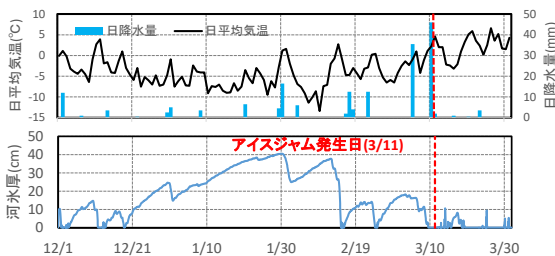
厚予測値は、12月の計算開始以降、3月上旬まで増加が継続している。河氷厚予測値の減少開始と現地でのアイスジャム発生時期は、幌加内と忠志では概ね重なっている。忠志ではアイスジャム発生日に気温上昇とまとまった降雨が重なっており、これら両方の因子が急速な解氷進行に寄与したと推測される。一方、幌加内では実測河氷厚が3月中旬でも0.4mと、解氷の進み具合が遅いことがわかる。アイスジャム発生数日前から気温が0°C以上に上昇して継続しており、まとまった降雨は見られないものの、気温上昇が急速な解氷を進めたと推測される。嶮淵では、河氷厚予測値は数日間で増減を繰り返している。アイスジャム発生時期は、気温上昇とまとまった降雨が重なっており、この点は忠志とも共通している。これらの点から、アイスジャム発生は、0°C以上の気温上昇が数



(a) 網走川津別観測所 (津別アメダス)



(b) オサラッペ川鷹栖橋 (旭川アメダス)



(c) 浦幌川 KP0.2 (浦幌アメダス)

図-11 2020年のアイスジャム発生箇所への河氷厚予測値³⁾

日見られること、発生直前にまとまった降雨が見られること、あるいはこれらが重なることが誘発因子であると考えられる。

図-11に示す2020年については、津別（網走川）、鷹栖橋（オサラッペ川）、浦幌川KP0.2（浦幌川）ともに2月中旬に河氷厚予測値はいったん0となっている。その後河氷厚は2回の増加と減少を繰り返し、アイスジャム発生日の3月11日より1～2日前に急激に減少して0になっている。2020年のアイスジャム発生では、例えば網走川津別のCCTV画像では開水面が見られるところに上流から河氷が流入し、2時間半程度河氷が堆積した状態が確認され、水面もこの時間帯で約1.5m上昇・低下していることが確認できている¹²⁾。すなわち、解氷が進んだところに降雨による流量増加が重なり、河氷が下流に流下して堆積してアイスジャムが発生したものと推測される。

以上から、本予測モデルでの河氷厚減少時刻のみではアイスジャム発生時刻を特定できるまでの精度はないといえる。一方で、河氷厚予測値の急減は気温上昇や降水量増加といった現象を受けて発生しており、アイスジャム発生の事前警戒を行うための参考データとなりうることを示された。

4.2 アイスジャムスケールによるアイスジャム発生危険箇所の抽出

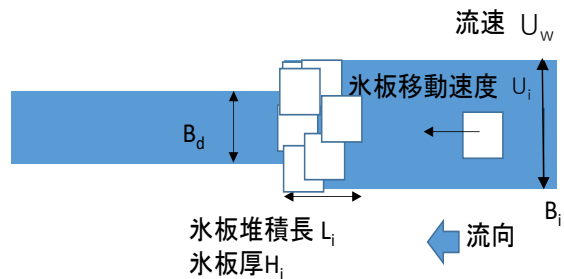


図-12 アイスジャムスケール算出の河道模式図

4.2.1 アイスジャムスケール算出式

河氷厚予測モデルではある地点の河氷厚急減の時期を計算することで、アイスジャム発生の可能性が高い時期を予測する。一方、アイスジャムは上流側からの河氷の流下のほか、下流側の堆積が関係する。そのため、検討対象地点の上下流の河道形状を踏まえ、上下流方向に延長してアイスジャム発生危険箇所を検証することが必要である。

アイスジャム発生危険箇所を把握には、以下の S_{ij} ：アイスジャムスケール¹³⁾という指標を用いた。

$$S_{ij} = \frac{1}{F_{ri} \sqrt{\frac{B_d}{B_i} \sqrt{\frac{C_D (H_i)^2}{2(L_i)} + C_f \frac{(H_i)}{L_i} + \frac{C_L}{2}}} \quad (5)$$

$$F_{ri} = \frac{U_i}{\sqrt{\frac{\rho_w - \rho_i}{\rho_w} g H_i}} \quad (6)$$

S_{ij} が大きいほどアイスジャムの規模が大きくなり、アイスジャムが発生しやすいことを示す。図-12にアイスジャムスケール算出に当たっての河道模式図を示す。

ここで、 U_i (m/s)：氷塊の速度、 U_w (m/s)：流速として、 U_i/U_w の値でアイスジャムの発生・非発生を評価すると、アイスジャム発生時は $U_i = 0$ 、アイスジャム非発生時は $U_i = U_w$ となり、 U_i/U_w は、0～1の範囲となる。 S_{ij} と U_i/U_w は、以下の式の関係にある⁹⁾。

$$U_i/U_w = 1/(1 + S_{ij}) \quad (7)$$

なお、この関係は、実験値結果から U_i/U_w の平均絶対誤差は0.052と誤差は小さく妥当性が確認されている⁷⁾。 ρ_w (kg/m³)：水の密度で1000、 ρ_i (kg/m³)：氷の密度で917、 g (m/s²)：重力加速度で9.8、 H_i (m)：氷塊の厚さ、 B_i (m)：氷塊の幅、 L_i (m)：氷塊の河川縦断方向の長さ、 B_d (m)：下流の川幅である。既往研究⁹⁾と同様に、 C_D ：形状抵抗係数は0.4、 C_f ：摩擦抵抗係数は1.0、 C_L ：揚力係数は0.4を与える。

4.2.2 アイスジャムスケールの現地適用

続いてアイスジャムスケール S_{ij} を、2018年3月にアイスジャムによる被災事故が発生した辺別川に適用した事

例²⁾を説明する。Google Earthにより読み取りした河床高と川幅を図-13に示す。

式(5)、(6)により S_{ij} を算出するにあたり、未知数は U_i 、 H_i 、 B_i 、 L_i である。検討では、以下の手順で値を得た。上流端の流量は辺別川観測所(北海道管理)の2018年3月8~10日の最大流量 $19.76\text{m}^3/\text{s}$ (暫定値)、下流端水深は等流水深 0.59m とし、不定流計算を実施し各断面の流速 U_w と水深 H_w を算出した。氷塊の速度 U_i は最大で流速 U_w になるため $U_i = U_w$ とし、氷塊の厚さ H_i は、水深が深いほど氷塊は堆積できる可能性が高いため、算出した水深を堆積可能な氷塊の厚さと仮定して $H_i = H_w$ とした。 B_i は、最大で川幅になるため、この断面(B_d の一つ上流の断面)の川幅を与えた。 L_i は任意に 10m を与えた。これらの値を代入して算出した S_{ij} の結果を図-14に示す。

図-14 から事故発生場所で S_{ij} の値が大きいことがわかる。事故後の事故発生場所において多量の氷塊の堆積が現地で確認されており、事故当時、アイスジャムが発生したと推定される。本検討により、 S_{ij} を用いてアイスジャム発生危険箇所を事前に抽出できる可能性を示した。

一方で、事故発生場所より上流において、砂州の形成により川幅が狭くなり、 S_{ij} の値が高い箇所が3箇所あり、これらの箇所でもアイスジャム発生の可能性がある。

「氷と雪が一気に押し寄せてきた」との現地証言を基に動的な現象を推察すると、これらの上流3箇所のいずれかでアイスジャムが発生し、その後、アイスジャムが決壊して氷塊が下流へと流れ、下流の事故発生場所で氷塊が急激に堆積して、再度アイスジャムが発生したと推察できる。なお、このような動的な現象の解明には、今後、水理実験や数値計算を用いた検討が必要となる。

4. 3 河水挙動監視による河水破壊過程の把握

2018年にアイスジャムが発生した辺別川を対象に、厳冬期から解氷期に至る河水の解氷過程把握を目的に河水挙動監視を行った¹⁴⁾。詳細は既報⁸⁾に示しており、本稿では概略を述べる。観測は被災箇所から上流側に約 4.5km の区間に自記水位計、トレイルカメラを縦断的に複数台設置するとともに、上流約 4.5km 地点で水温センサーを河水中に埋設し、水温、気温の連続観測を行った。本稿では図-15に示す水温変化による解氷タイミングの把握を述べる。水温センサーが河水中に安定して設置された状況では、水温は概ね -0.3°C で変遷している。しかし2月25日、3月11日、3月27日に水温は河川水温または気温に連動して変動を始めている。このタイミングで解氷が進み、水温センサーが水中または空中に露出したことが推定され、河水消失日時を検出できる可能性を示した。

なお本稿では省略したが、水位縦断変化や河水画像の変化など、複数の観測機器により解氷進行に関する情報を得ることができる。

5. アイスジャム発生予測に向けた提案と課題

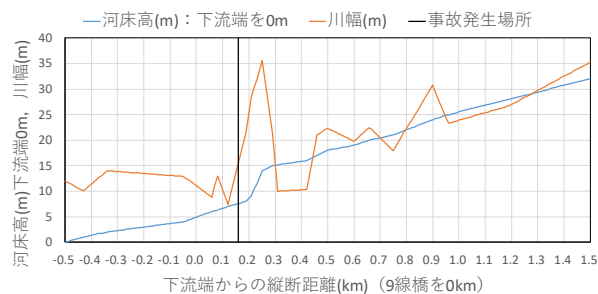


図-13 辺別川の河床高と川幅¹⁾

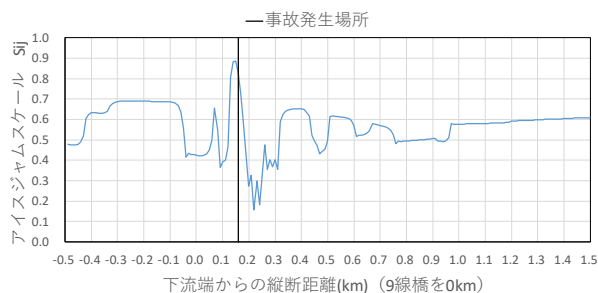


図-14 辺別川のアイスジャムスケール S_{ij} ¹⁾

ここまで、河水厚予測モデルによるアイスジャム発生時期の予測、アイスジャムスケールによるアイスジャム発生リスクの高い場所の抽出、アイスジャムをもたらす解氷期の河水挙動監視手法について述べた。これらの手法を以下のとおり組み合わせることで、アイスジャムの予測と監視に活用できると考える。

まずは対象地点とその上下流の河道形状を把握する。その際流速が遅くなる河道因子(河道湾曲、砂州、縦断勾配変化、合流、河道内構造物など)はアイスジャム発生可能性が高くなるため、留意する必要がある。

続いてアイスジャム発生危険箇所の抽出を行う。その際には、アイスジャムスケールの活用が望ましい。なおアイスジャム発生リスク対象とする河川流量や氷の形状など、試行錯誤で決める部分も多い。これらの標準的な決め方や値は今後の課題である。

最後に抽出されたアイスジャム発生予測箇所について河水厚予測モデルにより河水厚変遷を予測するとともに、同時に河水挙動監視を行い、解氷によるアイスジャムなどの被災回避に向けて対応をとる。

上記について、現場での試用などを積極的に進め、課題のブラッシュアップを進める必要がある。

6. まとめ

本研究の主な結論を以下にまとめる。

(1)取水障害の現状と対策

- ・各自治体で冬期間の取水障害に対する体制確保の負担は大きい現状が明らかになった。取水口の閉塞を防止するハード対策とともに、取水障害発生の事前予測手法などのソフト対策が必要である。

(2)現地調査によるアイスジャム発生状況の考察

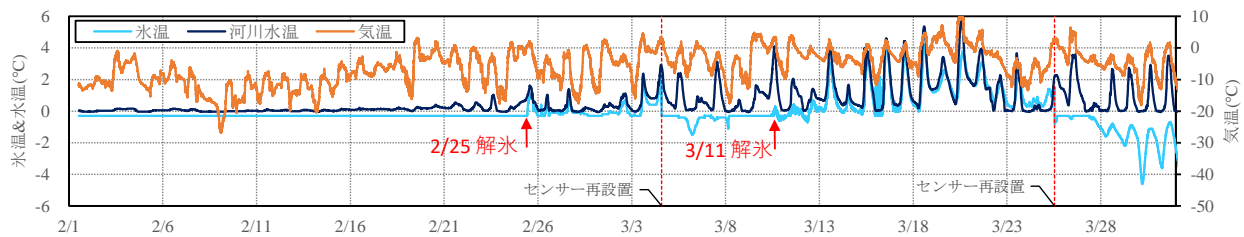


図-15 氷温、河川水温、気温変化の観測結果（被災箇所上流約 4.5km 地点）⁸⁾

- ・アイスジャムは砂州、蛇行・湾曲部、勾配変化点、河川構造物、本川合流点付近といった流速が低減される場所で発生することを確認した。これらは既往研究の知見とも一致する。
 - ・アイスジャム発生箇所の把握において、UAV撮影による空撮は迅速かつ安全な調査に貢献した。アイスジャム発生日時は、目撃情報のほか、CCTV等の画像や近傍水位の変動から推定可能であった。一方、アイスジャムが上流で形成された後に再流下して被災したケースでは、現地調査のみでは発生日時推定は困難であった。
- (3)アイスジャム発生予測手法の開発・提案
- ・河氷厚予測値の簡易計算モデルをアイスジャム発生が確認された現地に適用した。河氷厚の減少時期は必ずしもアイスジャム発生時とは重ならない。しかし解氷期にアイスジャム発生リスク増の警戒には有用である。
 - ・アイスジャムスケールにより、対象区間内でのアイスジャムの発生可能性が高い箇所を抽出できる。
 - ・水面下の河氷挙動の監視として氷温、河川水温、気温の連続撮影を行った。氷温・水温・気温の観測値の変動から、氷面下で進行している解氷状況を監視できる可能性が示された。
 - ・これらのアイスジャム発生可能性が高い時期、場所の予測技術と監視技術をいかに組み合わせるかが、今後のアイスジャム災害への対応に向けた課題である。

今回の検討により、実務への適用を考慮したアイスジャム発生予測技術の開発・検証を進めることができた。今後、冬期における河川工事中の安全確保、水位上昇の早期検知、樋門等の河川管理施設の操作確保等、河川の維持管理・防災の各現場での対応策検討へ貢献したい。

謝辞：本研究の一部はJSPS科研費 JP18K04361の助成を受けたものである。本研究の実施に当たり関係機関より調査資料を提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 入交泰文, 吉川泰弘, 黒田保孝: 天塩川水系名寄川真勲別頭首工における晶氷の発生について, 第 56 回 (平成 26 年度) 北海道開発技術研究発表会, 2015.
- 2) 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.

- 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) 横山洋, 矢部浩規, 佐々木泰訓, 大野修, 吉川泰弘: 北海道内の水道取水障害の現況について, 寒地技術論文報告集 Vol.33, 2017.
- 5) 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.
- 6) 吉川泰弘, 黒田保孝, 伊藤丹, 渡邊康玄: 結氷河川における河道形状を考慮したアイスジャム発生条件に関する研究, 河川技術論文集, 第20巻, pp.241-246, 2014.
- 7) 札幌管区気象台: 平成30年3月8日から9日にかけての大雨と融雪に関する気象速報
http://www.data.jma.go.jp/sapporo/bosai/past_kishou/pdf/kishoh300308-0309.pdf (2021年6月23日確認)
- 8) 北海道危機対策課: 3月8日から9日にかけての大雨と融雪等による被害状況等 (第2報)
http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sm/ktk/higaiho2_20180308_oame.pdf (2021年6月23日確認)
- 9) 例えば一次元不定流計算ソフトCERI1D
<https://i-ric.org/solvers/ceri1d/> (2021年1月14日確認)
- 10) 横山洋, 伊波友生, 吉川泰弘: 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, 第64回 (2020年度) 北海道開発技術研究発表会, 2021.
- 11) 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.
- 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, I_157-I_162, 2020.
- 13) 吉川泰弘, 朴昊澤, 大島和裕, 横山洋: 寒冷地河川における簡易的なアイスジャム計算モデルに関する検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.4, pp.351-356, 2018.
- 14) 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.

A STUDY ON CALCULATION OF RIVER ICE FLUCTUATIONS TO RESPOND TO RIVERSIDE DISASTERS AND WATER INTAKE OBSTACLES CAUSED BY ICE JAMS

Research Period : FY2016-2020

Research Team : Cold-Region Hydraulic and Aquatic
Environment Engineering Research
Group (River Engineering)

Author : YABE Hiroki, OGUSHI Hiroya,
MAEDA Shunichi, OKABE Hirokazu,
ABE Takaaki, YOKOYAMA Hiroshi,
INAMI Yu

Abstract : Ice jam is the blockage of ice in a river channel and has become problem for river disaster prevention and maintenance. We aim to study and propose measures to control and prevent ice jam disasters. We conducted an interview survey about water intake problems caused by ice jam in Hokkaido. We also conducted a field survey of ice jam disasters and clarified the mechanism of river ice blockage. Since it is effective to predict the increase in the risk of ice jam damage in advance, we developed an ice jam occurrence prediction method that assumes practical use. We applied it to actual ice jam and examined its effectiveness.

Key words : river ice, prediction of river ice thickness, ice jam scale, river ice survey in deglaciation