

湧別川・渚滑川におけるアイスジャムについて

網走開発建設部 遠軽開発事務所 河川課 ○藤林 佳汰
伊藤 昌弘
田中 和浩

湧別川・渚滑川では、冬期に河川が結氷するが、2018年3月上旬に湧別川において降雨と暖気の影響により、深夜にアイスジャムが発生し、短時間で氾濫注意水位まで上昇した。今回、渚滑川では急激な水位上昇が無く、アイスジャムが発生しなかったと考えられるが過去の渚滑川で発生したアイスジャムも含め、発生時の条件を比較することにより、注意しなければならない要因・条件を検討し、危機管理方法について報告するものである。

キーワード：アイスジャム、危機管理、予測技術、効率化、安全・安心

1. はじめに

最近の北海道の冬は、地球の温暖化やエルニーニョ現象の影響により厳寒期でも降雨を伴うなど、これまでとは違った気象現象が頻発している。2018年1月には、年明けからの半月で5回の雨やみぞれを観測し、1月上旬の北海道の地域平均気温が平年より2.8度も高く、1961年の統計開始から最も高い温度を記録している。また、同年3月8日から9日にかけて釧路方面を中心に大きな降雨が発生し、鶴居（気象）では、3月降雨として観測史上最大の145mm/24hrの降雨を観測した。この時、美瑛町俵真布の辺別川では、冬期施工の河川工事が行われていた現場で、その上流で形成されたアイスダムが一度に決壊・流下して、現場代理人が流れてきた氷と雪とに巻き込まれて亡くなっている。

北海道の河川では、近年、冬期の気温の上昇や降雨頻度が高くなる傾向が見られ、融雪や増水に伴うアイスジャムの形成による突発的な出水事故や浸水被害の増加、規模の増大が考えられる。そのため、アイスジャムの発生予測を踏まえた事前の被災回避策を講じる安全対策が重要となる。また、アイスジャムによる急激な水位上昇やその決壊による水位低下で流速が変動し、河川構造物の被災が懸念されるため、その予防保全としての巡視体制が必要となる。

一方、北見工業大学の吉川准教授をはじめ、多くの研究者によってアイスジャムのメカニズムや予測に関する研究がなされており、多くの知見が得られている。

本論文は、通年の河川管理の視点に立ち、これまでのアイスジャムに関する知見を踏まえて、アイスジャムと河川管理施設の被災上の問題点と課題を示し、アイスジャムの発生位置予測技術を活用した効率的な危機管理対策について報告する。

2. アイスジャムの現状と危機管理上の課題

(1) アイスジャムの発生状況と被害

湧別川、渚滑川ではアイスジャムが発生している。本論文では、これらのアイスジャムについて解説する。

2018年3月に湧別川で発生したアイスジャムでは、中湧別水位観測所で、1時40分から2時00分にかけて約1.8mの水位上昇が生じ、氾濫注意水位8.1mを74cm超過した。

また、北見河川事務所管内では、常呂川本川でのアイスジャム発生により、樋門吐口水路へ氷塊を伴う流水の逆流が発生した。



写真-1 アイスジャム（左：2018年3月、湧別川1号橋上流、右：2010年2月、渚滑川16.8km）



写真-2 アイスジャムによる樋門吐口水路への逆流（2018年3月、左：常呂川、忠志25号樋門、右：網走川、昭野樋門）

(2) アイスジャム発生の予測技術

吉川准教授らの研究では、アイスジャム発生の危険箇所を抽出するアイスジャムスケール S_{ij} の開発¹⁾、実用的な氷板厚計算式（入力値が気温のみ）が開発²⁾されており、他開建管内で実河川への適用が検討されている。

$$S_{ij} = \frac{1}{F_{ri} \sqrt{\frac{B_2}{B_1} \sqrt{\frac{C_D}{2} \left(\frac{H_i}{L_i}\right)^2 + C_f \left(\frac{H_i}{L_i}\right) + \frac{C_D}{2}}} \quad (1)$$

河水のフルード数 F_{ri} は以下の式(2)で表される。

$$F_{ri} = \frac{u_i}{\sqrt{\left(\frac{\rho_w - \rho_i}{\rho_w}\right) g H_i}} \quad (2)$$

$B_1(\text{m})$ ：アイスジャム発生箇所の平均水路幅、 $B_2(\text{m})$ ：アイスジャム下流の水路幅、 $L(\text{m})$ ：集積した氷板群の縦断長、 $H(\text{m})$ ：集積した氷板群の平均的な厚さ、 $u(\text{m/s})$ ：平均氷板移動速度、 $\rho(\text{kg/m}^3)$ ：氷の密度、 $\rho_w(\text{kg/m}^3)$ ：水の密度、 C_D ：氷板群の形状抵抗係数、 C_f ：氷板群の表面摩擦係数、 C_L ：氷板群の揚力係数、 $g(\text{m/s}^2)$ ：重力加速度

(3) 起こりえる被害

以下に、これまでのアイスジャム関連の知見より、河川管理施設、許可工作物の代表的な事例を紹介し、アイスジャムによる河川管理上の懸念を示す。

事例①：局所洗堀の発生

湧別川に架かる道道芭露線（道道244号）のいわね大橋は、2018年7月4日の大雨により橋脚基礎部の局所洗堀が進行し、橋桁が傾いた。これは洪水を原因とした被災であるが、アイスジャムによる堰上げと急激な流出によって、洪水と同様の局所洗堀を受ける可能性があることを認識する必要がある。

渚滑川で2010年2月に実測されたアイスジャムによる約3mの急激な水位の上昇を例に取れば、洪水同様に河床材料を動かす掃流力が生ずると考えられる。

事例②：河川湾曲部の被災

河川の湾曲部では、融雪期などに湾曲部の平面形状による遠心力によって河川の晶氷は外縁に振られて流れ、外岸側に晶氷が堆積する。その後、自然に密度を高め、河水へと成長したのち、氷点下の温度を受けながら氷板として成長し、その場にとどまる（図-1）。

内岸側は、外岸側への氷板形成によって滞筋の曲率が小さくなるため、外側への遠心力が更に強くなり、晶氷の堆積～氷柱の形成が繰り返され、アイスジャムの規模が拡大する。これにより、河積が小さくなり湾曲部にアイスジャムが形成される。

この結果、アイスジャム周辺で堰上げ背水や局所流が

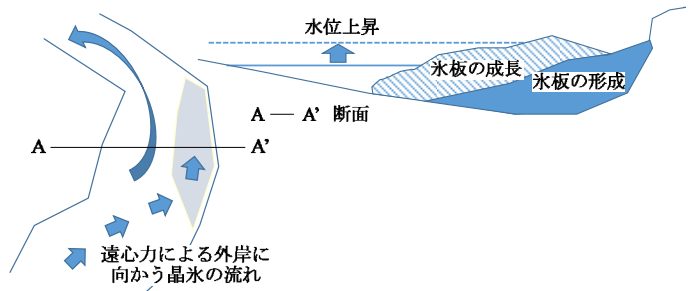


図-1 湾曲部でのアイスジャムの発生概念図

発生し、堤防、護岸等の被災要因となる。また、氷板や河水を巻き込んだ流れによって、堤防の侵食、護岸の損傷、負圧による護岸背面土砂の吸出し破壊等の被害が予想される。

事例③：樋門・樋管の操作の困難性による堤内地の浸水

冬期の樋門・樋管ゲートの動作確認や開閉操作は、管理用道路の積雪や凍結によって難しい状況にある。

アイスジャムによる本川の堰上げにより、流水が樋門吐口水路に逆流し、閉扉されていない樋門・樋管を経由して堤内側に流入し、浸水被害をもたらす可能性がある。

事例④：河川縦断方向のアイスジャムの連続形成による河川管理施設の損傷の拡大

アイスジャムが河川縦断方向の各所に連続的に形成された場合、ある個所のアイスジャムの決壊によって下流側のアイスジャムに河水が流下・堆積し、アイスジャムの密度が高まり決壊しにくくなる。

この結果、堰上げ水位が上昇し、アイスジャムが決壊した場合の河川管理施設の損傷が大きくなる。

事例⑤：河口部での河水の集積

河口部では、海から河川に入り込む波によって、河川を流下した河水が河口に押し戻され、河口部に堆積する。

そのために、河川を流下する途上で生じるアイスジャムとは形成過程が異なり、海水が出入りを繰り返すことや、海水温度が河川水よりも高いことから、河水が流動的になり、堰上げが生じても崩れ易く背水が生じにくい。

(4) 危機管理上の問題・課題

アイスジャムに関する危機管理上の問題・課題とし、以下の6点が考えられる。

①発生時期の予測、水位予測が困難

流出・流下した氷塊がいつアイスジャムを形成するのかが予測できない。

アイスジャムの発生による水位上昇が急激に生ずるため、水位予測が時間的に間に合わない。また、集中型洪水予測システムやH-Q式を用いた水位予測は、予測値が信頼できるかが疑問である。

また、水位観測所が少なく、アイスジャム発生による水位上昇を捉えきれない場合がある。

②発生場所の推定が困難

流出・流下した氷塊が、どの場所でアイスジャムを形成するのが予測できない。直轄区間上流の指定区間の水位が把握できなければ、直轄区間でのアイスジャム発生の予兆を把握できない。

湧別川、渚滑川の河道特性を基に、アイスジャムが発生しやすい場所をあらかじめ整理しておく必要がある。

また、水深が浅くなる複列砂州区間、露岩個所、水制設置個所等、アイスジャムの発生を助長する要素を把握する必要がある。

③アイスジャムの規模の推測が困難

氷塊の堆積量、アイスジャムによる水位上昇量、アイスジャム発生による浸水被害規模が不明であり、対策規模を予測できない。

④対応する人員が不足

事務所固有の課題として、湧別川、渚滑川の河川延長の長さに対して事務所職員、巡視員に限られており、結氷や解氷状況の把握、アイスジャムの発生や監視を網羅的に現場で実施することは困難である。

アイスジャムの状況把握や対応のためには現地に出向く必要があるが、積雪のために現地へのアクセスが困難であり、移動に時間を要し、現地観測には危険を伴う。

この結果、アイスジャム発生後の事後対応とならざるを得ず、対応開始時には事象が進行している。

効率的で安全な現地状況把握手法の立案が必要である。

⑤作業員や自治体職員、住民の認識不足

アイスジャム自体の現象、アイスジャムによって引き起こされる被害、リスクの認識が不足している。

⑥気候変動による発生状況の変化

気候変動により、アイスジャムの発生頻度、規模が拡大する可能性がある³⁾。

3. 発生メカニズムと支配要素

アイスジャムに関する危機管理対策を考えるためには、アイスジャムの発生メカニズムを理解した上での検討が必要である。

(1) 発生メカニズム

アイスジャムによる被害は、①河氷の解氷、②流出・流下、③堆積（氷詰まり）＝アイスジャム、④被害の4段階で生ずる（図-2）。

アイスジャムの発生メカニズムは、既往の知見とアイスジャムによる被害状況とを基に、誘因・素因、河道内の現象、発生被害とを関連付けてフロー化した（図-3）。

a) 解氷のメカニズム

2010年2月26日に渚滑川で発生したアイスジャムは、気温の上昇により融雪が促されて河川水位が急激に上昇し、河氷自体が鉛直上方向に持ち上げられ解氷した⁴⁾。

また、水位が急激に上昇し、流水が氷の上を流れることで氷が不安定となり、氷が分断されて解氷に至る。

解氷の発生時期は、春先と結氷し始めである。

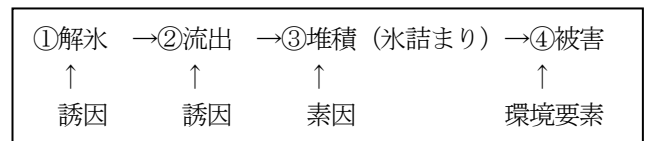


図-2 アイスジャムによる被害発生の4段階

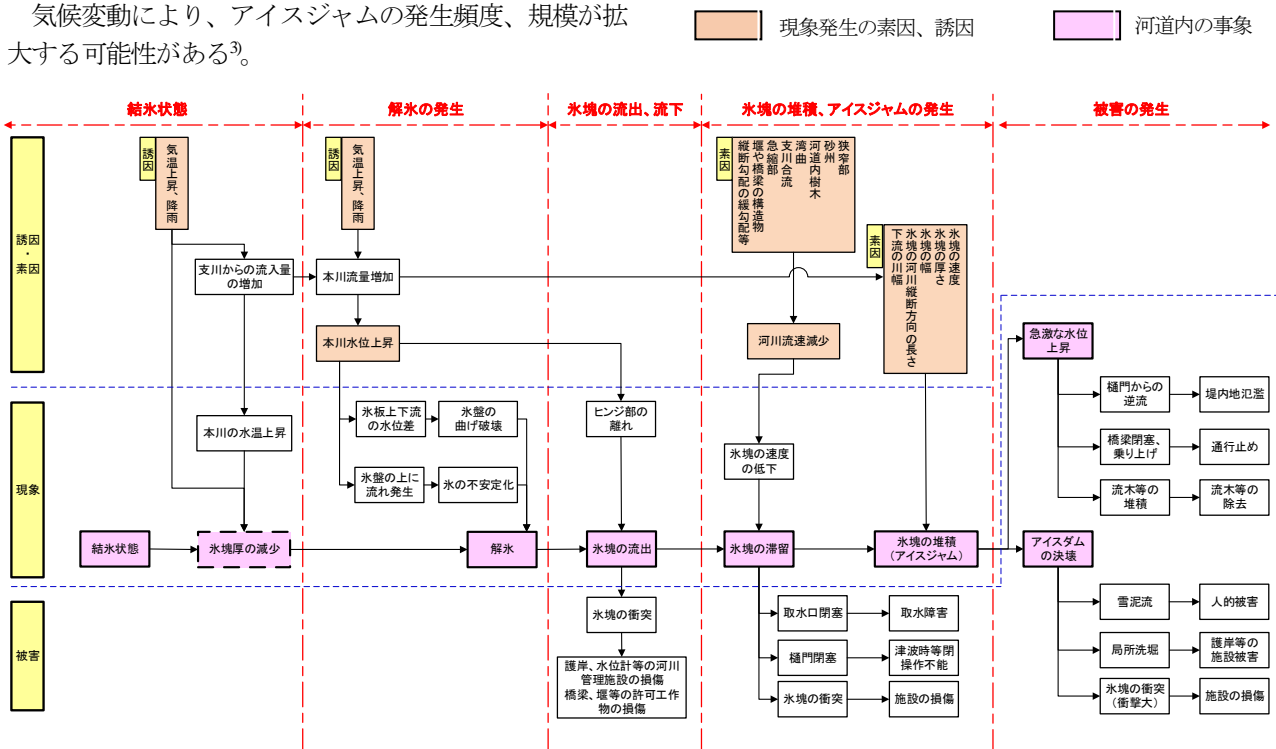


図-3 アイスジャムの発生メカニズムと被害

b) 流出のメカニズム

河川水位が上昇することによって、河岸結氷のヒンジが外れ、結氷の上流部から破壊が生じ、流出する。

c) 氷詰まりのメカニズム

狭窄部、低水路湾曲部、橋梁や堰等の構造物上流、砂州、縦断勾配変化点、緩勾配箇所、高水敷に乗る流れ等、河川流速が小さくなる個所でアイスジャムが発生しやすい³⁾。また、結氷範囲はその地点から上流に延びる。

河水の滞留により流水面積が急速に狭まるため、河川水位が急激に上昇する。

(2) アイスジャム発生 の 支配要素

アイスジャムの発生メカニズムの整理から、アイスジャム発生 の 支配要素は表-1の通りと考える。

したがって、解氷、流出・流下の原因となる「誘因」と、堆積（氷詰まり）の要因となる「素因」とを把握できれば、アイスジャムの予測が可能である。

表-1 アイスジャムの支配要素

項目	支配要素	関連する事象
誘因	①気温、降雨	氷塊厚の減少、氷塊量
	②水位	水位上昇量 解氷、氷塊流出、被害
素因	①河川流速	氷塊の速度
	②川幅（水面幅）	氷塊の詰まり易さ
	③水深	氷塊の厚さ

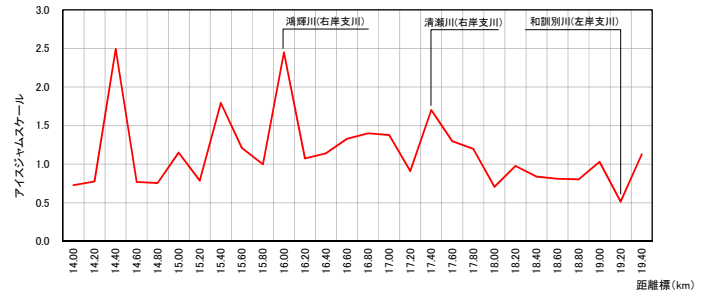


図-4 渚滑川におけるアイスジャムスケール S_j の試算結果

4. アイスジャムに関する危機管理対策方針

湧別川、渚滑川のアイスジャムに関する危機管理対策は、現状、課題、アイスジャムの発生メカニズムを踏まえ、以下の3項目について検討する。

- ①長期目標の達成に向けた段階的・短期的対策の実施
- ②PDCAサイクルによる、各種知見の適用性の向上
- ③監視、状況把握の効率化、省力化、安全性の向上

(1) 長期目標の達成に向けた段階的・短期的対策

今後5年程度を目途として、長期的には、アイスジャム発生時期や場所、規模を予測可能とし、人的被害、施設被害発生を防止、軽減する。

今後2年程度を目途として、短期的には、アイスジャム発生リスクが高い場所の特定、被害規模の整理、監視や状況把握の効率化・省力化を図る。

(2) PDCAサイクルによる、各種知見の適用性の向上

アイスジャムスケール S_j を用いた高リスク個所の抽出や、将来的にアイスジャムスケール S_j を用いたアイスジャム発生予測を行うため、知見の適用と現地状況把握による検証とを繰り返し（PDCAサイクル）、湧別川、渚滑川への適用性を向上させる。また、現場での実用性を重視する。

(3) 監視、状況把握の効率化、省力化、安全性の向上

対策実施の判断や各種知見の適用性向上のため、現地での結氷状況の把握、アイスジャム発生状況の把握等が重要である。限られた人員で、厳冬下での長い延長の監視、状況把握を行う際の効率化、省力化、安全性の向上を図る。

5. 湧別川、渚滑川での具体的対策案

(1) 予測（場所や被害規模）

a) 相対的に発生しやすい場所の整理

既往研究より、氷塊の滞留やアイスジャムの発生は、狭窄部、低水路湾曲部、橋梁や堰等の構造物上流、砂州、縦断勾配変化点、緩勾配箇所、高水敷に乗る流れ等、河川流速が小さくなる個所で発生しやすいことが分かっている。

これにより、まず、単純に下記の数値を縦断的に整理し、相対的にアイスジャムが発生し易い場所を把握する。

- ・水面幅、流速
- ・水面幅減少比（下流断面／上流断面）
- ・縦断勾配の変化点（緩勾配点）
- ・湾曲、樹木境界、橋脚、堰、支川合流、急縮、急拡、高水敷乗り上げ等のエネルギーロス
- ・砂州スケールの縦断変化点（緩勾配点）の整理
- ・氷塊の流下を阻害する水制工等の構造物

b) アイスジャムスケール S_j による発生可能性の評価

アイスジャムスケール S_j を用いて、アイスジャムが発生する可能性が高い個所を抽出する。

渚滑川で試算した結果を図-4に示す。渚滑川で2010年2月に発生したアイスジャムでは、河口から約16km地点で河水が河道内に滞留して閉塞していることが確認されている⁴⁾。

試算の結果、河水による閉塞が確認された16km付近でアイスジャムスケール S_j が高い値を示しており、渚滑川

への適用性があることが推察された。

ここで、 U_i (氷塊の速度m/s) は2010年2月26日、21:00の上渚滑流量87.79m³/sに対する断面平均流速、 H_i (氷塊の厚さm) は上渚滑流量87.79m³/sに対する平均水深、 B_a/B_i (下流断面との川幅と氷塊の幅との比) は水面幅の比、 L_i (氷塊の長さm) は渚滑川の実績から水面幅の1/10⁹で最大4m⁹とした。

c) アイスジャムリスクマップによる相対的リスク評価

アイスジャムスケール S_{ij} と、アイスジャムが発生した場合の被害規模とを距離標毎に縦断的に整理したアイスジャムリスクマップを作成し、リスクの大小を相対評価する(図-5)。

リスクは、アイスジャムが発生し易く、かつ被害規模が大きい場合をC、その逆の場合をA、その中間をBとした3段階で評価する。

アイスジャムが発生した場合の被害規模は、樋門から逆流による浸水被害として算定し、樋門敷高、ゲート形式、堤内地資産を整理し、堤内地1池モデルによる簡易的な湛水計算で算定する。

橋梁への乗上げ等による被害予測は、氷塊が2個並列で橋脚間を流れない場合、橋脚位置で氷塊の詰まりが発生し易いと考え、橋脚の幅が氷塊の長さ L_i の2倍未満かどうかで評価する。

(2) 観測・状況把握

a) アイスジャムの発生検知 (水位計の設置や改良)

アイスジャムの発生を検知するためには、河川水位を取得することが重要である。このため、水位観測所、危機管理型水位計、樋門外水位計を用いて河川縦断方向の水位を取得する。湧別川、渚滑川では、水位計の設置間隔が広いため、危機管理型水位計、樋門外水位計によって水位計間の水位や水位変化率(上昇速度)を取得する。

設置済みの危機管理型水位計は、出水対応目的にアイスジャム対応を目的として加え、高水敷以下の水位を計測できるように改良することが考えられる。

また、設置又は改良する水位計は、気温、降水量を同時に計測できるタイプとすることが望ましい。

b) 簡易型河川監視カメラによる発生検知、状況監視

結氷、解氷、流出・流下状況の把握、アイスジャムの発生状況を視覚的に監視するため、簡易型河川監視カメラ(革新的河川技術プロジェクト第3弾)を設置する。

網走開建内でも簡易画像取得カメラの設置が予定されているが、単に夏期の出水把握のみならず、冬期のアイスジャムの状況把握が可能となるような設置場所、画角、寒冷地対応の機器仕様が望ましい。

c) ドローンによる状態監視

ドローンを用いて、結氷、解氷、流出・流下状況、アイスジャム発生状況を把握する。

撮影場所は、アイスジャムリスクマップの高リスク個所を優先とする。

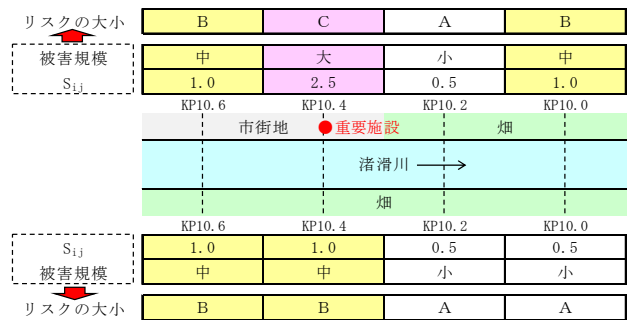


図-5 リスクマップのイメージ図

d) 冬季の河川巡視のための支援

アイスジャムの対策を検討するため、カメラやドローンでの観測を基に、最終的には人の目でアイスジャムの状態を把握する必要がある。

状態把握は巡視によって行い、アイスジャムリスクマップを基にアイスジャムによるリスクが高い個所を優先する。

e) 現地観測データの予測へのフィードバック

アイスジャムスケール S_{ij} や氷板厚の予測精度を高めるため、現地観測データを予測へフィードバックすることが重要である。具体的には、以下の事項である。

U_i (氷塊の速度m/s) : カメラ画像、現地観測

H_i (氷塊の厚さm) : 解氷時のカメラ画像

L_i (氷塊の長さm) : カメラ画像、現地観測

B_a, B_i (氷塊幅) : カメラ画像、現地観測

解氷時期 : カメラ画像、現地観測

(3) 情報伝達・対応

a) 対応検討のための観測情報の伝達

観測データ(水位、画像)は、携帯回線網を用いて伝達する。

伝達したデータは、事務所側で数値や画像として取得できるようにし、クラウドサーバー+ブラウザ、又は簡易水位計システムの活用を検討する。

b) アイスジャムスケール S_{ij} を用いた被害予測

アイスジャムへの対応は、「壊して流す」、「放置する」の2通りである。

壊して流す場合、アイスジャムスケール S_{ij} の内、氷塊の厚さ H_i を大きくする、氷塊の長さ L_i を大きくすることで下流側のアイスジャムスケール S_{ij} を計算し、対策実施によるリスクを評価することを検討する。

c) ゲート改良等、樋門側での対策検討

アイスジャムが発生した場合に堤内地への逆流の危険性が高い樋門について、冬期のゲート結氷の防止対策⁹や、無動力化ゲートへの改良を実施する。

樋門側での対策検討は、樋門自体の健全度評価を考慮するとともに、対策優先度評価の要素の一つにアイスジャム対応を加味する。

(4) 啓発、周知

a) 現場の啓発（作業員、巡視員）

工事や業務関係者、巡視員に、アイスジャムに対する安全管理を徹底する。具体的には、アイスジャムに関する安全管理について特記仕様書への記載、KY活動での周知、安全大会での周知を行う。

b) 自治体職員との情報共有、住民への周知

住民避難の役割を担う自治体職員と、アイスジャムのメカニズム、発生リスク、各種観測データ等を共有し、スムーズな対応を実現する。情報共有は、水防災意識社会再構築ビジョンの減災対策協議会を活用する。

住民に対して、HPやパンフレットにより、アイスジャムによる堤内地への逆流と氾濫の可能性を周知する。また、将来的に、水位計と連動した回転灯を樋門や堤防上に設置し、アイスジャム発生の有無を堤内から確認できるようにする（図-6）。

(5) 夏期の河道管理

アイスジャムの発生個所やアイスジャムスケール S_0 が高い個所について、アイスジャムの素因を解消、低減する。具体的には、河道内の樹木伐採、狭窄部での河道掘削、湾曲部の寄州の切り下げを行い、できる限り流速が低減しないようにする。

6. 今後のアイスジャムに関する危機管理

本論文では、アイスジャムに関する危機管理について、短期間（今後2年程度）で実施、検討する、アイスジャム発生期間内の対策、夏期の対策、監視や状態把握の効率化、省力化について整理した。

これにより、事象が発生してから対応に当たる現状に対して、あらかじめアイスジャム発生リスクが高い個所を中心に、現地状況を把握した上で予測的対応が可能となるとともに効率的な現状把握が可能となると考える。

また、将来的（今後5年程度）にアイスジャムの発生予測のためのデータ取得環境整備や、現地観測データの予測への反映と検証を行うことで、アイスジャム発生予測のための基盤整備を行うことができる。

今後、現地観測と予測技術とをPDCAサイクルで回していくことで、アイスジャムの発生予測精度の向上と、これによる対策の効率化を図り、実用性を向上することが課題である。

また、指定区間の状態把握のため、観測、情報伝達、対応面で北海道との連携を図り、水系全体としての危機管理対応が課題である。

長期的（今後5年程度）には、アイスジャムの発生時期や場所、規模の予測、被害発生防止を図ることから、以下の技術開発、環境整備の実施について検討する。

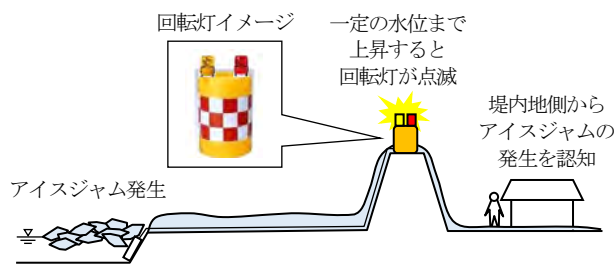


図-6 水位計と連動した回転灯のイメージ

○情報の集約と活用

- ・伝達された観測データ（水位、流量、画像等）の集約
- ・表示システムの構築
- ・関係機関での同一情報の配信、共有
- ・アラート機能
- ・住民への情報提供
- ・避難勧告・避難指示（緊急）への活用

○被害規模の予測精度の向上

- ・氷塊が詰まる量と水位上昇量との関係
- ・水位上昇量と被害規模

○リアルタイムの観測や予測

- ・気象庁が提供する気温予測データを用いた氷板厚のリアルタイム予測
- ・アイスジャムの発生危険や出動予測に関する一定程度の閾値（アイスジャムスケール）の設定

謝辞：本論文作成に当たり、北見工業大学地域未来デザイン工学科の吉川准教授にアイスジャムに関する貴重な資料の提供や有用な助言を頂いた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 小池太郎・吉川泰弘・横山洋：2018年3月北海道アイスジャム洪水における危険箇所の抽出に関する検討
- 2) 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
- 3) 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, ppI_1039-I_1044, 2018
- 4) 吉川泰弘・渡邊康玄・早川博・平井康幸：渚滑川のアイスジャムに関する現地観測，寒地土木研究所月報，No. 701, pp2-9, 2011
- 5) 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, ppI_1351-I_1356, 2018
- 6) 佐藤好茂・阿部孝章・稲垣尚人・吉川泰弘・船木淳悟：寒冷地河川における樋門ゲート前面の結氷制御方法に関する提案，第30回寒地技術シンポジウム，pp12-17, 2014.