

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

THE RELATIONSHIP BETWEEN ICE JAM OCCURRENCE AND THE CROSS-SECTIONAL PROFILE OF ICE-COVERED RIVERS

吉川泰弘¹・黒田保孝²・伊藤丹³・渡邊康玄⁴
Yasuhiro YOSHIKAWA, Yasutaka KURODA, Akashi ITOU and Yasuharu WATANABE

¹ 正会員 博 (工) 北見工業大学助教 社会環境工学科 (〒 090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

² 正会員 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒 062-7602 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

³ 正会員 修 (工) 北海道開発局 留萌開発建設部 (〒 077-8501 留萌市寿町 1 丁目 68 番地)

(前 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒 062-7602 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目))

⁴ 正会員 博 (工) 北見工業大学教授 社会環境工学科 (〒 090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

This study aims to clarify the relationship between ice jam occurrence and the cross-sectional profile of ice-covered rivers. We carried out hydraulic experiments in a test channel that reproduced an ice-covered river. The test channel had four sections, each with a different river width and river bed slope. The hydraulic conditions that were varied were ice sheet area, ice sheet discharge and flow discharge. The research clarified the following. Ice sheets tend to deposit at places of great water depth and low flow velocity. Ice jams are generated under the following conditions: large ice sheet area, high ice sheet discharge and low flow discharge. Moreover, the relationship between ice sheet transportation and water slope was inferred. The probability of ice jam occurrence can be estimated from the ice sheet's Froude number by using ice sheet thickness and ice sheet velocity. When the ice sheet's Froude number is small, the ice sheet velocity is low.

Key Words : Ice jam, Ice-covered river, Hydraulics experiment, Froude number

1. はじめに

寒冷地の河川は、気温の低下により河水が形成され、気温の上昇により河水は解氷し流下する。この河水が河道内で堆積するとアイスジャムが発生し、水位は急激に上昇し災害となる。2013 年 4 月の北海道内のダム上流では、わずか 4 時間で河道内に河水が堆積し、除塵作業中の作業員が危険にさらされ、浅橋の損傷や監視カメラの破壊の被害が発生した¹⁾。2011 年 3 月の一級河川の鶴川では、河川結氷時の津波により、河水が破壊および輸送され、河道狭窄部においてアイスジャムが発生し、水位は約 0.84m 上昇し、約 4 日間、高水位が継続した²⁾。2010 年 2 月の一級河川の渚滑川では、アイスジャムにより、数時間で水位が約 3m 上昇し、冬期にも関わらず水防団待機水位を超過した³⁾。1994 年 2 月の札幌市内を流れる琴似発寒川では、アイスジャムにより上流で堆積していた河水が急激に流下し、下流の河道内で魚道工事を施工していた作業員が、ショベルドーザーごと流されるという事故が発生している⁴⁾。

アイスジャム対策を実施する上で、アイスジャムの発生時期、発生場所、発生条件に関する知見が重要となる。発生時期に関しては、天塩川の恩根内水位観測所を対象に、アイスジャム発生 of 要因となる解氷時期について、最大氷板厚より 10cm 減少すると解氷している可能性が高いことを指摘している⁵⁾。発生場所に関しては、狭窄部、蛇行部、合流部、橋脚箇所等が考えられる。橋脚箇所のアーチ形成によるアイスジャムについて、水面を覆う氷板の割合、氷板のサイズと径間距離、表面流速と氷板厚で表すフルード数により、アーチ形成の有無が判断できるという有益な知見が得られている⁶⁾。一方で、川幅が狭い箇所、水深が浅い箇所、勾配が緩い箇所などの河道形状を考慮したアイスジャム現象に関する研究は、十分には実施されていない。

本研究は、川幅が狭い河道、水深が浅い河道、勾配が緩い河道におけるアイスジャム発生条件を明らかにすることを目的に、渚滑川で発生したアイスジャム現象を対象としたアイスジャム水理実験を実施した。河道形状として川幅と河床勾配に着目し、氷板サイズ、氷板量、河川流量を水理条件として実験を実施した。

2. アイスジャム水理実験

(1) 実験水路、実験条件、測定項目

2010年2月に渚滑川で発生したアイスジャムを対象として、既往研究^{3),7)}で得られた値を参考に、実験水路形状、氷板サイズ、氷板量、河川流量を決定した。

実験水路形状の設定方法について述べる。実河川のアイスジャム発生前の流量 $14\text{m}^3/\text{s}$ およびアイスジャム発生区間 KP11 から KP20 の横断データを用いた不等流計算結果から、水面幅の最小 21.3m 、平均 40.8m 、最大 82.0m 、河床勾配の最小 $-1/769$ 、最大 $1/125$ の値を得た。水理実験の簡便性を考慮して、模型縮尺 $1/100$ とし、水路幅は、最小水路幅 20cm 、平均水路幅 40cm 、最大水路幅 80cm 、勾配は、最小勾配 LEVEL、最大勾配 $1/120$ を設定した。この設定値を基に、水路幅と河床勾配を任意に組み合わせて実験水路形状を決定した。製作した実験水路を図-1に示す。実験水路は、下流から site1(水路幅 80cm 、勾配 LEVEL)、site2(水路幅 20cm 、勾配 $1/120$)、site3(水路幅 40cm 、勾配 LEVEL)、site4(水路幅 20cm 、勾配 $1/120$)、1区間長 2m として4区間を設定した。水路下流端は 11.5cm の高さの段落ちを設けた。水路側壁は現象を把握するために透明なアクリル素材とし、水路底面は白色の氷板模型を判読しやすいようにに黒色塗料で着色した。

河川流量の設定は、アイスジャム発生時の最大流量 $286\text{m}^3/\text{s}$ より、実験流量 $2.8\text{L}/\text{s}$ を基準として、 $3.5\text{L}/\text{s}$ 、 $4.2\text{L}/\text{s}$ の計3ケースを設定した。予備実験として、 $0.7\text{L}/\text{s}$ 、 $1.4\text{L}/\text{s}$ 、 $1.8\text{L}/\text{s}$ を実施したが、どのケースも氷板模型投入箇所まで堆積し実験が継続できなかった。氷板量の設定は、アイスジャム発生前の氷板量 $60\text{m}^3/\text{s}$ より、 $0.6\text{L}/\text{s}$ 、 $0.3\text{L}/\text{s}$ の計2ケースを設定した。

氷板サイズの設定は、アイスジャム発生後に河道に堆積していた氷板の最大の氷板サイズ 4m 、厚さ 0.6m の値から、氷板サイズを $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ 、 $8\text{cm} \times 8\text{cm}$ の計2ケースを設定し、厚さ 0.6cm は同一とした。氷板模型は、実河川の氷板と同等の比重であるポリプロピレンを用いた。氷板模型速度を PTV 解析により求めるため、白色の氷板模型を判読しやすいように、氷板模型の両面において、 4cm 氷板模型は直径 2cm 、 8cm 氷板模型は直径 4cm の円形の赤色スタンプで着色した。

氷板模型の投入方法は、氷板模型投入区間において、アクリル製投入用ホッパーを設置し、水面への影響が小さくなるように投入角度 20 度で氷板模型を投入した。氷板模型投入終了時刻は、氷板模型投入区間で氷板模型が堆積し、氷板模型が流下しないことを確認した時刻とした。

実験は、上記の $3 \times 2 \times 2$ の計12ケース実施した。図-1のNo.1からNo.8の箇所において、水位測定のため

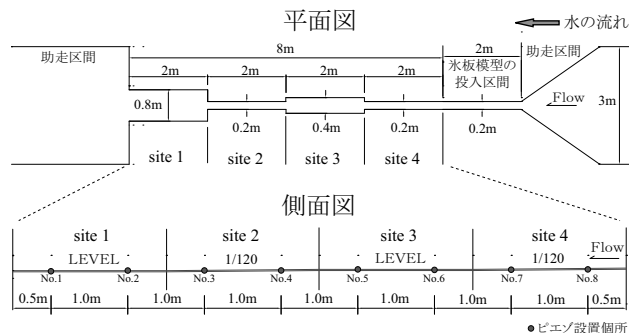


図-1 実験水路の平面図と側面図



図-2 アイスジャム発生時の状況

(実験ケース：12，時間：75秒後)

表-1 各ケースの実験条件とアイスジャム発生の有無

ケース	氷板径 cm	氷板量 L/s	流量 L/s	アイスジャム
1	4 × 4	0.3	2.8	非発生
2	4 × 4	0.3	3.5	非発生
3	4 × 4	0.3	4.2	非発生
4	4 × 4	0.6	2.8	発生 (site2 上流)
5	4 × 4	0.6	3.5	非発生
6	4 × 4	0.6	4.2	非発生
7	8 × 8	0.3	2.8	発生 (site3 下流)
8	8 × 8	0.3	3.5	非発生
9	8 × 8	0.3	4.2	非発生
10	8 × 8	0.6	2.8	発生 (site3 下流)
11	8 × 8	0.6	3.5	発生 (site3 下流)
12	8 × 8	0.6	4.2	発生 (site3 下流)

めにピエゾを水路床に8台設置した。平面および側面より動画撮影を実施した。実験条件およびアイスジャム発生の有無を表-1に示す。表-1より、アイスジャム発生条件は、氷板サイズが大きい、氷板量が多い、流量が少ないという条件であることが分かる。

(2) アイスジャム発生箇所

表-1より、アイスジャム発生箇所は、site2上流とsite3下流であり、この箇所を起点として上流方向に氷板模型が堆積した。

2010年2月の渚滑川のアイスジャムの条件であるケース4では、水路幅 20cm であるsite2の上流において、 $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ の氷板模型が横一列に同時に並んだことにより氷板模型が堆積し、アイスジャムが発生した。その後、site2上流のアイスジャムは解消されて、氷板模型は流下した。

ケース7、10、11、12では、site2とsite3の境界の水路幅急縮部より上流の水路幅が広いsite3下流部において、氷板模型が堆積しアイスジャムが発生した。その後、アイスジャムは、どのケースも30分以上、解消されず持続したため実験を終了した。

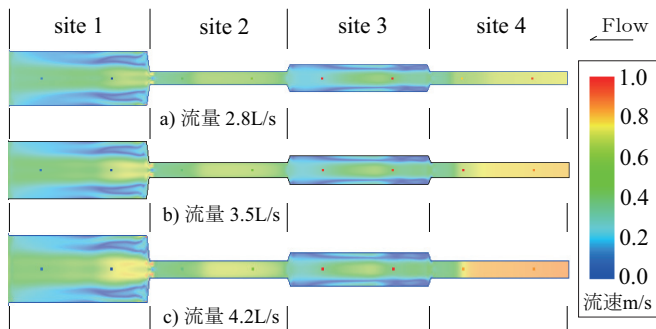


図-3 Nays2D⁸⁾により得られた流速コンター

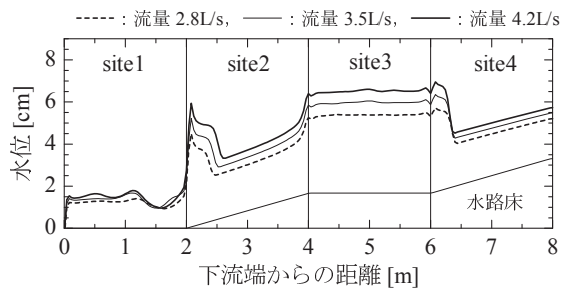


図-4 Nays2D⁸⁾により得られた水路中央の縦断水位

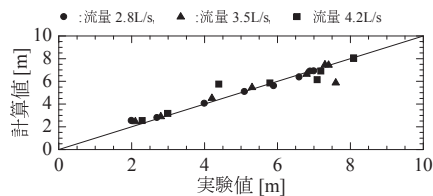


図-5 水位の実験値と計算値

ケース 12 のアイスジャム発生時の状況を図-2 に示す。site3 下流部でアイスジャムが発生していることが分かる。当初、site2 や site4 の氷板サイズに対して水路幅が狭い箇所、site1 の水深が浅い箇所においても、アイスジャムの起点となると考えていたが、今回の実験条件では、site1 と site4 でアイスジャムの起点とはならなかった。

実験の流況を把握するために、河川シミュレーションソフト iRIC の Nays2D⁸⁾ を用いて流速コンターおよび縦断方向の水位を求めた。計算結果を図-3, 4 に示す。計算格子サイズ 1cm × 1cm, Manning の粗度係数 0.01 とした。図-5 に水位の実験値と計算値の比較図を示す。絶対平均誤差で 0.32cm の計算精度であった。図-3, 4 より、アイスジャムが発生した site3 下流の流況は、他の区間と比較して流速が遅く、特に左右側壁において流速が遅い。また、site2 は水路幅が狭いため、上流の site3 では堰上げの影響を受けて、他の区間と比較して水深が深い。流れのフルード数の平均値は、site1 は 1.5, site2 は 1.2, site3 は 0.6, site4 は 1.5 と、site3 は 4 区間でフルード数が小さい区間であった。

(3) アイスジャム発生時の水位

アイスジャム発生時の site2 上流, site3 下流, site4 下流の水位を図-6, 7, 8, 9, 10 に示す。

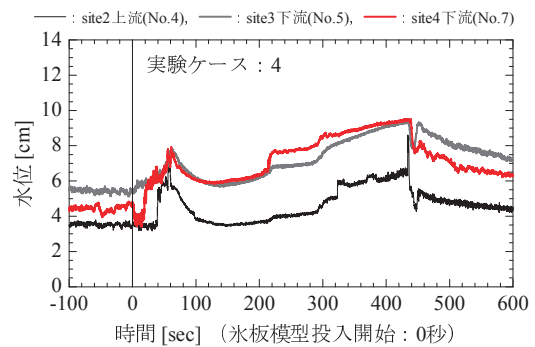


図-6 アイスジャム発生時の水位 (実験ケース : 4)

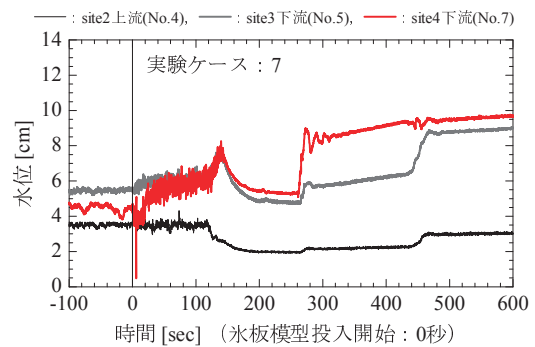


図-7 アイスジャム発生時の水位 (実験ケース : 7)

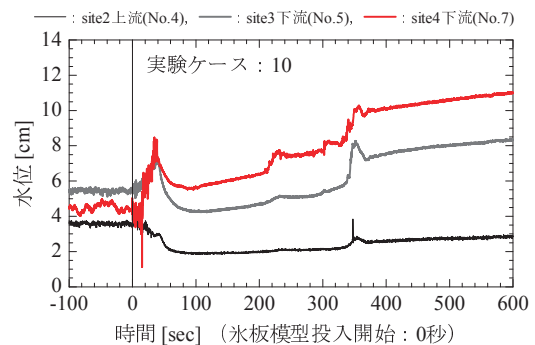


図-8 アイスジャム発生時の水位 (実験ケース : 10)

図-6 より、氷板模型投入開始から 61 秒で site4 下流の水位が 7.9cm のピークに達し、その後、約 60 秒かけて下降している。約 210 秒から site4 下流の水位が上昇を始め、遅れて site3 下流の水位が上昇している。

図-7, 8 のケース 7, ケース 10 においても、初期の水位のピークとして、ケース 7 は 140 秒で 8.3cm, ケース 10 は 35 秒で 8.5cm を記録し、その後、水位は時間経過とともに下降および上昇している。ケース 7 と比べて氷板量が多いケース 10 の方が、初期の水位ピークに達するまでの時間が早い。

図-9, 10 のケース 11, ケース 12 においても、初期の水位のピークとして、ケース 11 は 34 秒で 9.7cm, ケース 12 は 64 秒で 9.4cm を記録し、その後、水位は時間経過とともに下降および上昇している。ケース 12 と比べて流量が少ないケース 11 の方が、初期の水位ピークに達するまでの時間が早い。図-9 のケース 11 の約 140 秒以降、図-10 のケース 12 の約 210 秒以降において、site4 下流の水位が上昇し、site3 下流の水位との差が大

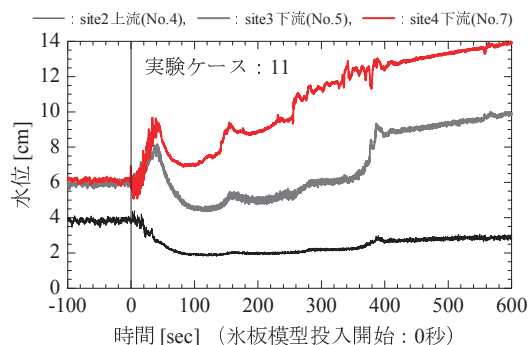


図-9 アイスジャム発生時の水位 (実験ケース : 11)

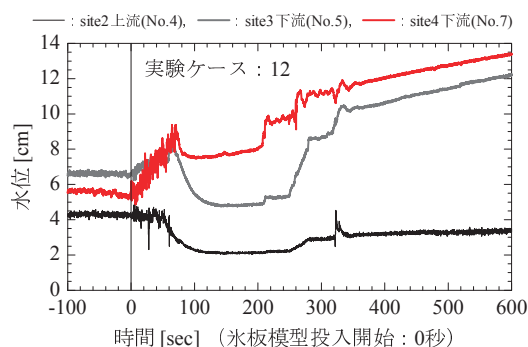


図-10 アイスジャム発生時の水位 (実験ケース : 12)

きくなり、結果として水面勾配が大きくなっている。

氷板模型投入終了時刻は、氷板模型投入区間において氷板模型が堆積および停止した時刻であり、ケース 4 は 70 秒、ケース 7 は 150 秒、ケース 10 は 45 秒、ケース 11 は 50 秒、ケース 12 は 75 秒である。なお、今回の実験におけるアイスジャムの初期の水位のピーク時刻は、氷板模型投入終了時刻の約 10 秒前に発生している。

水位変動と氷板模型の挙動を明らかにするために、氷板サイズ、氷板量、流量が最も大きい条件であるケース 12 において、アイスジャム発生時の側面の状況を図-11 に示す。初期の水位のピーク付近である 70 秒において、site3 下流で氷板模型が堆積している。180 秒では、site3 下流の水面の下降および右側上流で氷板模型が沈んでいることから、水位が下降していることが分かる。280 秒では、右側上流から氷板模型が流下していることが分かり、400 秒では、氷板模型はさらに下流へと流下しており、site3 下流の氷板模型の密集度が高くなっている。

上記の氷板模型の挙動を踏まえて、今回の水理実験の水位変動を考察する。氷板模型が堆積すると水位は一時的に上昇するが、氷板模型間の隙間から流水が流れて流況が安定すると水位は下がる。一方で、上流ではアイスジャムの影響により水位は徐々に上昇する。このため、下流と上流の水面勾配は大きくなる。ある水面勾配に達すると、氷板模型を流下させる力となり、氷板模型は急激に下流へと流される。アイスジャム発生の起点である下流では、上流からの氷板模型の流下により、氷板模型間の隙間が埋まり流積は小さくなる。このため、上流の水位はさらに上昇したと考えられる。



図-11 アイスジャム発生時の側面の状況 (実験ケース : 12)

3. アイスジャム発生条件

アイスジャム現象は、上流から流下する氷板が、アイスジャム発生箇所において減速して、この箇所では堆積および河道を閉塞させて流積を狭める。下流の流積が狭められるため、上流の水位は上昇する。本研究では、氷板の堆積量と氷板速度に着目して検討を行った。

(1) 氷板枚数と氷板模型速度

図-11 より、氷板模型枚数が増加するとアイスジャムの規模が大きくなり水位を上昇させることが分かった。アイスジャム発生の起点における現象を明らかにするために、アイスジャムが発生したケースにおいて、site3 下流端から上流 50cm の範囲を対象として、平面および側面の映像を基に氷板模型の枚数を計測し、平面動画を基に PTV 解析から平均氷板模型速度を求めた。

氷板模型枚数の算出方法は、氷板模型が鉛直方向に重なっていない場合は平面画像から枚数を計測した。氷板模型が重なっている場合は、側面画像から水路側壁に接している氷板模型の枚数を計測し、氷板模型 1 枚の側面面積を乗じて、側面における氷板模型の全面積を求める。この値に水路幅を乗じて氷板模型の全体積を算出し、氷板模型 1 枚の体積で割り戻し枚数を求めた。

氷板模型速度の算出方法は、CanonMark2 一眼レフカメラ、24mm 単焦点レンズを用いて撮影した平面動画を基に、市販のソフトウェア (Ditect 製 Dipp-Flow)

を用いて PTV 解析を実施して求めた．x 軸，y 軸ともに 1pixel=0.32258cm で補正した．

氷板枚数と氷板速度を図-12 に示す．どのケースにおいても，氷板模型枚数が増加すると氷板模型速度が減速する．氷板模型速度がゼロとなる時刻をアイスジャム発生時刻と仮定すると，ケース 10 を基準として，氷板サイズが小さいケース 4 では，30 秒遅くアイスジャムが発生している．氷板量が少ないケース 7 では，105 秒遅くアイスジャムが発生している．流量が多いケース 11 とケース 12 では，12 秒，35 秒遅くアイスジャムが発生している．本実験結果から，氷板サイズが大きく，氷板量が多く，流量が少ないほど，アイスジャムは早期に発生することが分かった．

(2) 氷板速度の減衰割合

アイスジャムによる氷板速度の減速について，既往研究⁹⁾では減衰割合 λ を用いて式 (1) で評価している．

$$\ddot{u}_i = \lambda u_i \quad (1)$$

$\ddot{u}_i(\frac{m}{s})$: アイスジャム発生直後の氷板速度， $u_i(\frac{m}{s})$: アイスジャム発生直前の氷板速度， λ (無次元): 氷板速度の減衰割合．本研究では，この λ について検討を行った．

流下する氷板に働く力を図-13 のように考え，図-13 の氷板表面下流側の白丸の点を基準として，氷板に働く力のモーメントの釣り合いを考えると式 (2) となる．

$$\begin{aligned} & \rho_i g B_i^2 h_i \frac{B_i}{2} - \rho_w g B_i^2 h_i' \frac{B_i}{2} \\ & + \frac{1}{2} \rho_w C_D B_i h_i' (h_i - \frac{h_i'}{2}) (u_w - u_i)^2 \\ & + \frac{1}{2} \rho_w C_f B_i^2 h_i (u_w - u_i)^2 \\ & + \frac{1}{2} \rho_w C_L B_i^2 \frac{B_i}{2} (u_w - u_i)^2 = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

C_D (無次元): 形状抵抗係数， C_f (無次元): 摩擦抵抗係数， C_L (無次元): 揚力係数である．

$\Delta\epsilon = (\rho_w - \rho_i)/\rho_w$ および $h_i' \simeq h_i$ とすると，式 (2) は式 (3) となる．氷板のフルード数 Fr は式 (4) とした．

$$\frac{u_i}{u_w} = \frac{1}{1 + \frac{1}{Fr \sqrt{\frac{C_D}{2} (\frac{h_i}{B_i})^2 + C_f (\frac{h_i}{B_i}) + \frac{C_L}{2}}}} \simeq \lambda \quad (3)$$

$$Fr = \frac{u_i}{\sqrt{\Delta\epsilon g h_i}} \quad (4)$$

アイスジャムが発生する前の氷板速度は流水の流速と同等と考えて，式 (3) の左辺の u_w は，式 (1) 右辺のアイスジャム発生直前の氷板速度 u_i と等しいと仮定した．また，式 (3) の左辺の u_i は，式 (1) 左辺のアイスジャム発生直後の氷板速度 $\ddot{u}_i$ と等しいと仮定すると，式 (3) の左辺は， $u_i/u_w \simeq \lambda$ となる．以上より， Fr と λ の関係が予測できる．

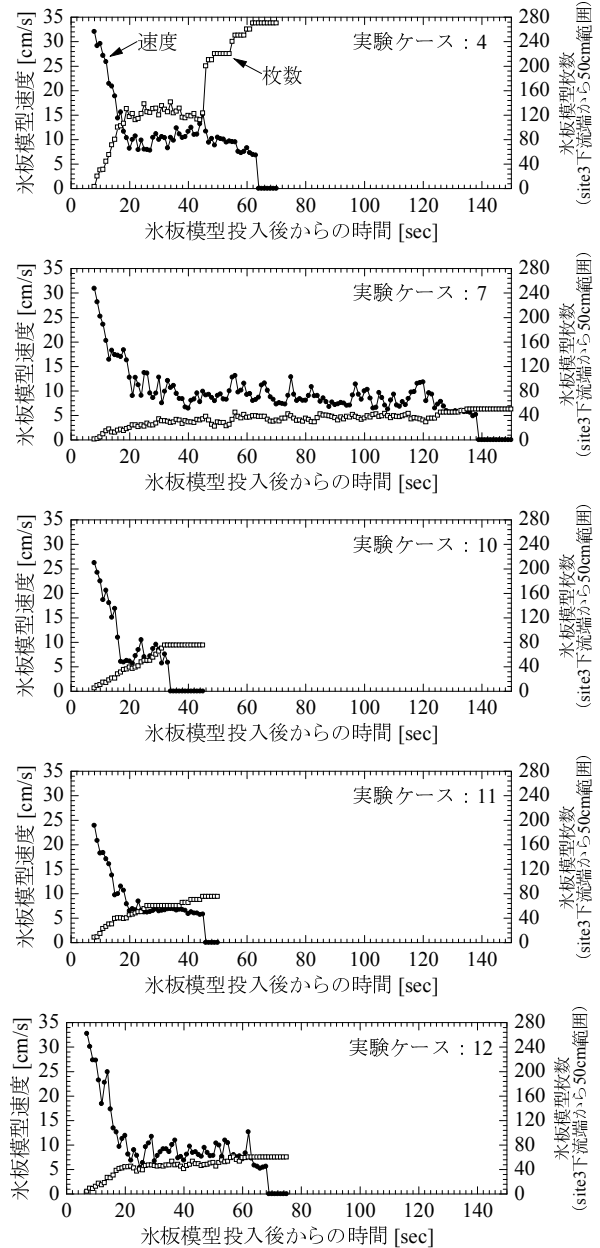


図-12 アイスジャム発生時の氷板枚数と氷板速度

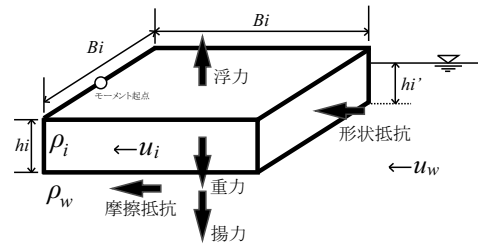


図-13 流下する氷板に働く力の概念図

実験で得た氷板のフルード数 Fr と氷板速度の減衰割合 λ を図-14 に示す．実験値から求めた対数関数も図示した．対数関数の相関係数は 0.931 で相関が高い．式 (3) において， h_i はアイスジャム発生時は水深の深さ分だけ氷板が堆積すると考えて site3 の平均水深 4cm を与え， B_i は平均氷板サイズ 6cm を与え，各係数は既往研究^{9) 10)}を参考にした値を与え，この時の理論値を図-14 に示した．図-14 より，氷板のフルード数が小さいほど氷板速度は減速することが分かる．

図-14の実験値の与え方を記す。式(4)の h_i は、site3下流端から上流50cmの範囲における平均氷板厚として、実験で得たこの範囲における氷板模型の全体積を水路平面積(縦断距離50cm×水路幅40cm)で割り求めた。式(4)の u_i は、site3下流端から上流50cmの範囲におけるPTV解析から得た平均氷板模型速度を与えた。 λ の u_i は上記の平均氷板模型速度を与え、 $\bar{u}_i$ はアイスジャム発生前の初期の平均氷板模型速度を与えた。

既往研究⁹⁾では、川幅が狭い箇所における氷板の閉塞について、氷板の径の2倍程度の川幅の場合、氷板の閉塞が生じると仮定し、川幅 B_w と河道を代表する氷板の径 B_i の比で評価している。代表氷径 B_i を $B_i = B_w / (2\lambda)$ から求め、氷板のフルード数との関係について、渚滑川の実スケールに換算した値を図-15に示す。実験値から求めた指数関数も図示した。図-15より、氷板のフルード数が約2.5以下になると、実河川の川幅40mに対して、代表氷径が川幅程度に大きくなり、アイスジャム発生の可能性が高くなることが分かる。

4. まとめ

- 1) 本実験において、水路幅が狭い箇所の上流となる水深が深く流速の遅い箇所において、アイスジャムが発生した。氷板模型が堆積すると水位は上昇する。上流の水位が上昇し水面勾配が大きくなると、上流の氷板模型は下流へと流下する。下流では氷板模型の密集度が高くなるため、水位はさらに上昇する。本実験条件では、水路幅が狭い箇所、水深が浅い箇所ではアイスジャムは発生しなかった。
- 2) 氷板のフルード数により、アイスジャム発生の可能性を評価できることが分かった。氷板サイズが大きく、氷板量が多く、流量が少ないほど、アイスジャムは発生しやすい。本研究で得られた知見を踏まえて、実河川におけるアイスジャム発生の可能性を判断する一手法として、 $u_i = u_w$ と仮定し、氷板面積 A_i を試算して $h_i = A_i / B_w$ を求め、式(4)の氷板のフルード数 Fr を算出し、図-14の氷板速度の減衰割合を求める方法が考えられる。本研究により得られた成果は、河道形状の影響を考慮したアイスジャム発生条件に関する新しい知見であり、アイスジャム災害の防災・減災対策を考案する際の重要な基礎資料となる。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 若手研究 (B)26870023、JSPS 科研費 基盤研究 (B)24360197、河川整備基金 25-1212-002 の助成を受けました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 伊藤丹，吉川泰弘，黒田保孝，村瀬竜也：ダム上流域で発生した河氷の集中流下による取水障害要因の検証，寒地土木研究所月報，No.731，pp.16-24，2014。

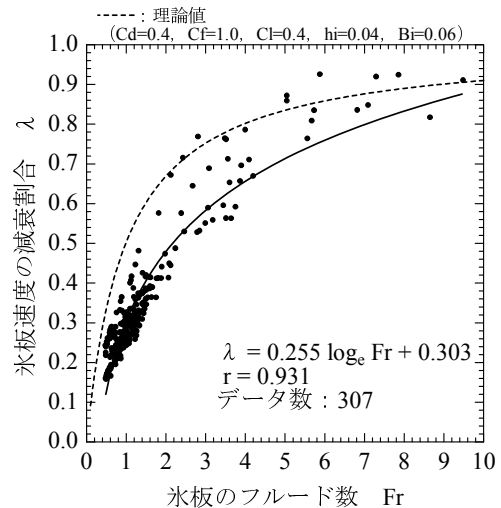


図-14 氷板のフルード数 Fr と氷板速度の減衰割合 λ

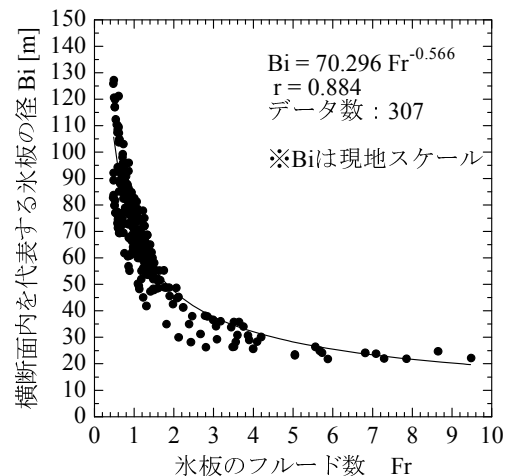


図-15 氷板のフルード数 Fr と代表氷板径 Bi

- 2) 吉川泰弘，阿部孝章，平井康幸：河川津波に伴い発生した北海道鶴川のアイスジャム再現計算，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.68，No.2，pp.I.416-I.420，2012。
- 3) 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，土木学会，河川技術論文集，第17巻，pp.353-358，2011。
- 4) 原文宏，河合孝治，木岡信治，佐伯浩，今泉彰：発寒川のアイスジャム発生に関する現地調査と模型試験結果の比較，第11回寒地技術シンポジウム，pp.177-182，1995。
- 5) 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.2-10，8月，2013。
- 6) 榎国夫，国松靖，佐伯浩：橋脚による氷盤の arch 形成条件に関する実験的研究，土木学会，水工学論文集，第36巻，pp.299-304，1992。
- 7) 吉川泰弘，渡邊康玄，早川博，平井康幸：河川解氷時の河氷の破壊と流下に関する研究，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol.67，No.4，pp.I.1075-I.1080，2011。
- 8) 河川シミュレーションソフト iRIC，URL: <http://i-ric.org/ja/> (参照日 2014年4月1日)。
- 9) 吉川泰弘，阿部孝章，渡邊康玄，伊藤丹：1次元混合氷径河氷変動計算モデルの開発とアイスジャムの再現計算，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol.70，No.4，pp.I.679-I.684，2014。
- 10) 田村正秀，木下正暢，浜口憲一郎，阿部康紀：護岸ブロックの形状と抗力・揚力特性について，流体力の評価とその応用に関するシンポジウム，第2回，pp.1-8，2003。

(2014. 4. 3 受付)