

# 完全結氷地点におけるアイスジャム発生条件

寒地土木研究所 寒地河川チーム ○横山 洋  
北見工業大学 工学部 吉川 泰弘  
寒地土木研究所 寒地河川チーム 矢部 浩規

結氷河川のアイスジャムは取水や維持管理上の問題の1つである。発生機構解明に向け、支川、川幅、水深変化とアイスジャム発生との関係は既に検討されてきた。一方、完全結氷区間への河氷流入によるアイスジャム発生機構は検討が十分なされていない。本研究は渚滑川での事象を対象に水理模型実験を行い、結氷区間への河氷流入とアイスジャム発生条件を検討した。

キーワード：アイスジャム，完全結氷，氷板流入模型実験

## 1. はじめに

北海道では多くの河川が冬期に結氷し、その日数は年間100日に及ぶといわれている<sup>1)</sup>。これら結氷河川の様々な問題の1つに、氷板や晶氷の流下によるアイスジャム現象がある。アイスジャムにより引き起こされる現象として、突然の河川水位上昇<sup>2)</sup>や氾濫発生<sup>3)</sup>、河川結氷時の津波遡上による河川管理施設等への氷塊による被災の懸念<sup>4)</sup>、取水口の閉塞による取水障害<sup>5)</sup>などがあげられる。今後、気候変動に伴う温暖化、豪雨・豪雪等の極端現象の増加が見込まれる中、寒冷地河川でのアイスジャムの発生機構を理解し、発生時期や発生箇所を予測するための技術開発は、被害軽減のためのハード及びソフト対策を検討する上で不可欠である。

これまで、アイスジャムの発生機構解明に向けて多くの研究がされてきた。吉川らは2010年2月に発生した渚滑川アイスジャム現象の現地観測を行い、河川解氷時の河氷の破壊と流下現象を解明した<sup>6)</sup>。また渚滑川の河道及び結氷状況をモデル化した水理模型実験を行い、河氷に働く力のモーメントのつり合いから氷板フルード数を定義し、河氷のフルード数が小さいと河氷移動速度が減衰しアイスジャムが発生しやすいことを示した<sup>6)</sup>。鳥谷部らは釧路川水系オソベツ川のアイスジャム発生事例に対し、氷板滞留箇所の氷板フルード数が小さいことを示し、アイスジャム発生危険箇所が抽出できることを示した<sup>7)</sup>。さらに吉川らは急縮に伴うアイスジャム水理実験をもとに、河氷のフルード数に川幅変化を考慮した「アイスジャムスケール」を提起し、アイスジャムスケールが大きいほど、アイスジャムが発生しやすいことを示した<sup>8)</sup>。鳥谷部らは支川からの氷板流入を考慮し、縦断的な河道変化に伴うアイスジャム発生危険箇所の抽出を行っている<sup>9)</sup>。

一方、完全結氷区間への河氷流入によるアイスジャム

発生機構については検討が十分なされていない。実際の結氷河川では、完全結氷区間と非結氷区間が混在するため、完全結氷区間への急激な氷板流入による急激な水位変化や氾濫現象を想定した場合にこれらの現象解明は重要である。

本研究は渚滑川での事象を対象とした、完全結氷区間への河氷流入に関する水理模型実験を行い、アイスジャム発生スケールを用い、アイスジャム発生条件について整理した。

## 2. アイスジャム水理実験

### (1) 実験概要

水理模型実験は、2010年2月に渚滑川で確認されたアイスジャム発生時の状況を参考に、実験水路の形状、氷板サイズ、氷板量、河川流量の設定を行った。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を $1/100$ 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、水路幅と河川勾配を任意に組み合わせることで実験水路形状を決定した。

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2mとして4区間を設定した。実験水路の平面図を図-1に示す。

流下する氷板サイズの設定は、アイスジャム発生後に実河道に堆積していた氷板の最大外寸(約4m)及び厚さ(約0.6m)から、模型縮尺 $1/100$ を踏まえ氷板サイズ $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ 、 $8\text{cm} \times 8\text{cm}$ の計2ケースを設定し、氷板厚さ

0.6cmは同一とした。氷板模型には、実河川の氷板と同等の比重であるポリプロピレン（比重0.9）を用いた。また、氷板模型速度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。完全結氷区間は、区間の水面全面を覆うポリプロピレン（厚さ0.6cm）を設置した。

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。実験区間内でアイスジャム発生が確認できた時点で氷板投入を完了している。

実験は表-1に示す計24ケース行っている。実験水路内の完全結氷区間は2条件設定した。ケースC1シリーズはSite1、ケースC2シリーズはSite2が完全結氷区間である。C1シリーズは河道の急拡大下流部が完全結氷している場合、C2シリーズは河道の急縮下流部が完全結氷している場合に該当する。河川流量の設定は、アイスジャム発生時の最大流量286m<sup>3</sup>/sより、実験流量2.8L/sを基準として、3.5L/s、4.2L/sの計3ケースを設定した。氷板量の設定は、アイスジャム発生前の氷板量60m<sup>3</sup>/sより、0.6L/s、0.3L/sの2ケースを設定した。アイスジャムはケースC2-4以外の全てのケースで、完全結氷区間の上流側区間で発生している。

氷板測定機器の仕様を、表-2に示す。水路内の縦断的な水位と時間変化を記録するためSite1下流端から0.5m上流側から1m間隔で、図-1中のNo.1からNo.8の8地点で箇所ごとに水路底にピエゾ管を設置した。ピエゾ管と圧力センサーを導水管で接続し、圧力センサーからの電圧は、データロガーを介して値を得た。電圧と水位の関係式を事前に導くことにより、0.01秒ごとに水位を測定した。水路内の氷板模型速度および氷板模型枚数を記録するため水路上方に設置した2台のデジタルカメラを用いて、実験開始と同時に動画撮影を行った。また、水路側面にビデオカメラを設置し、完全結氷区間の上流側0.5mの範囲での氷板滞留現象を確認するため実験開始とともにビデオ撮影を行った。氷板模型速度のPTV解析にはDipp Flow (Ditect製)を用いた。

## (2) 氷板速度の減衰割合

アイスジャム発生による氷板移動速度の減衰割合は、鳥谷部らの提案している方法に従って整理した<sup>9)</sup>。

氷板速度の減衰割合 $\lambda$ は、以下の式(1)で表される。

$$\lambda = \frac{u_i}{u_{w0}} = \frac{1}{1 + S_{ij}} \quad (1)$$

ここで、 $u_i$  (m/s) : アイスジャム発生後の氷板速度、 $u_{w0}$  (m/s) : アイスジャム発生直前の流速である。アイスジャム発生直前の氷板の速度は流速と等しく自由に流下

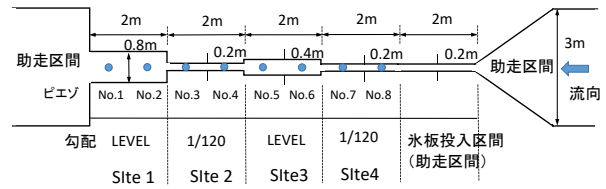


図-1 実験水路の平面形状

表-1 各ケースの実験条件

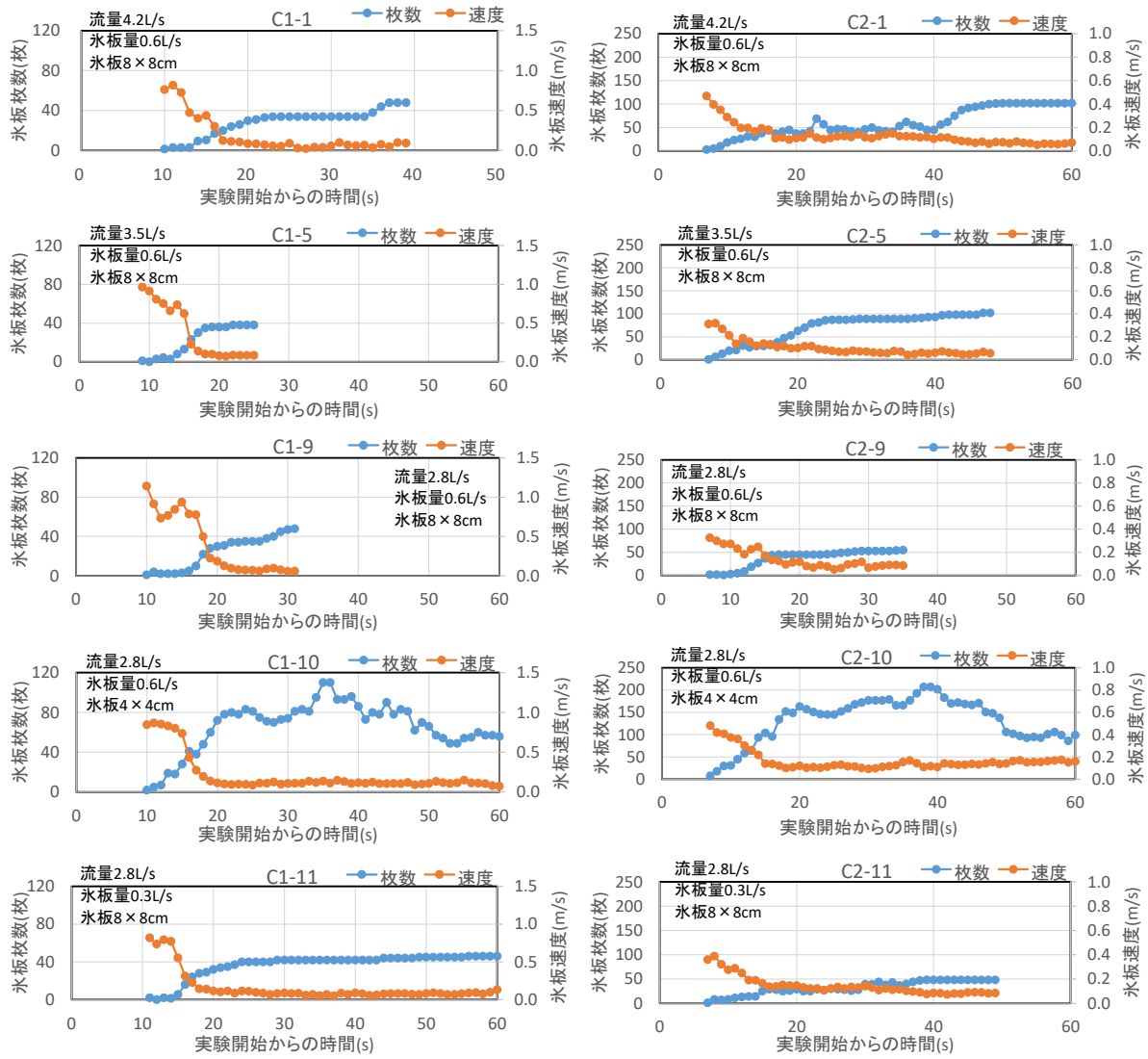
ケース	流量 (L/s)	氷板量 (L/s)	氷板径	完全結氷区間
C1-1	4.2	0.6	8×8	Site 1
C1-2	4.2	0.6	4×4	Site 1
C1-3	4.2	0.3	8×8	Site 1
C1-4	4.2	0.3	4×4	Site 1
C1-5	3.5	0.6	8×8	Site 1
C1-6	3.5	0.6	4×4	Site 1
C1-7	3.5	0.3	8×8	Site 1
C1-8	3.5	0.3	4×4	Site 1
C1-9	2.8	0.6	8×8	Site 1
C1-10	2.8	0.6	4×4	Site 1
C1-11	2.8	0.3	8×8	Site 1
C1-12	2.8	0.3	4×4	Site 1
C2-1	4.2	0.6	8×8	Site 2
C2-2	4.2	0.6	4×4	Site 2
C2-3	4.2	0.3	8×8	Site 2
C2-4	4.2	0.3	4×4	Site 2
C2-5	3.5	0.6	8×8	Site 2
C2-6	3.5	0.6	4×4	Site 2
C2-7	3.5	0.3	8×8	Site 2
C2-8	3.5	0.3	4×4	Site 2
C2-9	2.8	0.6	8×8	Site 2
C2-10	2.8	0.6	4×4	Site 2
C2-11	2.8	0.3	8×8	Site 2
C2-12	2.8	0.3	4×4	Site 2

表-2 測定機器及び仕様

計測項目	測定機器・仕様
水位	圧力センサー（光進,ATM.1ST）,精度 $\leq \pm 0.25\%$ /s ロガー（株式会社キーエンス,NR-600スタンドアロン計測ユニット）
水温	水銀温度計,目盛単位1℃
垂直動画	1眼レフデジタルカメラ（Canon, Mark II）,24mm単焦点レンズ1920×1080ピクセル
側面動画	デジタルビデオカメラ（JVCケンウッド,GZ-EX350）,1920×1080ピクセル

しており $u_i = u_{w0}$ となり $\lambda = 1$ 、完全なアイスジャムに至る時 $u_i = 0$ となり $\lambda = 0$ となる。

アイスジャムの規模を表す値であるアイスジャムスケール $S_{ij}$ は、集積した氷板を群体として扱い、氷板群に働く力のモーメントのつり合いから得た以下の式(2)で表される。



(a)C1 シリーズ

(b)C2 シリーズ

図-3 完全結氷区間上流部での氷板滞留枚数及び平均移動速度

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

氷板の速度と氷板の厚さで表される河氷のフルード数  $F_{ri}$  は以下の式(3)で表される。

$$F_{ri} = \frac{u_i}{\sqrt{\left(\frac{\rho_w - \rho_i}{\rho_w}\right) g H_i}} \quad (3)$$

ここで、 $B_1$  (m) : アイスジャム発生箇所の平均水路幅、 $B_2$  (m) : アイスジャム下流の水路幅、 $L_i$  (m) : 集積した氷板群の縦断長、 $H_i$  (m) : 集積した氷板群の平均的な厚さ、

$u_i$  (m/s) : 平均氷板移動速度、 $\rho_i$  (kg/m<sup>3</sup>) : 氷の密度、 $\rho_w$  (kg/m<sup>3</sup>) : 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、 $g$  (m/s<sup>2</sup>) : 重力加速度である。本研究では既往研究<sup>9)</sup>に倣い、 $g=9.8\text{m/s}^2$ 、 $C_D=0.4$ 、 $C_f=1.0$ 、 $C_L=0.4$ 、 $\rho_i=917\text{kg/m}^3$ 、 $\rho_w=1000\text{kg/m}^3$ とした。

平均氷板移動速度  $u_i$  は、完全結氷区間の上流0.5m区間でのPTV解析で得た値を用いる。氷板群の縦断長  $L_i$  はPTV解析対象区間の縦断長と同じく0.5mとした。氷板平均厚さ  $H_i$  (m) は、完全結氷区間の上流側0.5m区間に滞留した氷板枚数を撮影画像から1秒間隔で判読し、この区間に滞留する氷板全体の体積を対象区間面積で割ることで算出した。

アイスジャム発生直前の流速  $u_{w0}$  については、本研究では1次元的に河道内の氷板挙動を考えるため、以下に

示す手順で実測水理量から断面平均流速を算出した。

- 完全結氷区間の上流区間内の2箇所測定した水位データ（実験C1シリーズはSite2内のNo.3とNo.4、実験C2シリーズはSite3内のNo.5とNo.6）のうち、氷板投入開始直前の1秒間における両地点の水深平均値を、上流部断面の平均水深とした。
- 上流部断面内での流速は一様と仮定し、流下断面平均流速を算出した。

### 3. 実験結果及び考察

#### (1) アイスジャム発生状況

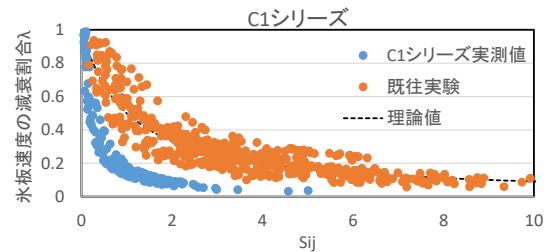
既往研究により、河川流量が少なく、氷板量が多く、氷板サイズが大きい場合にアイスジャムが早期に発生することが指摘されている<sup>2)</sup>。そこでC1シリーズとC2シリーズでそれぞれ完全結氷区間上流部の氷板挙動を比較し、完全結氷区間上流部での氷板滞留の特徴を比較する。

図-3はC1及びC2シリーズでの結氷区間上流部0.5m区間での氷板移動速度と氷板滞留枚数の時間変化を示したものである。最もアイスジャム発生が起りやすいとされるC1-9及びC2-9（流量2.8L/s、氷板投入量0.6L/s、氷板サイズ8cm）を基準に、流量、氷板量、氷板サイズによる氷板挙動の違いを比較検証した。

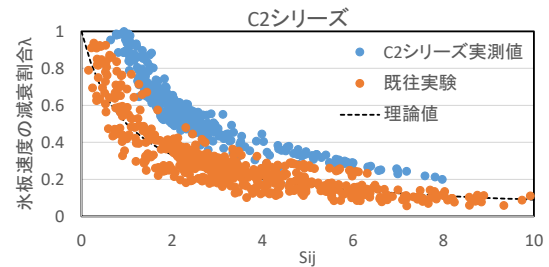
まずC1シリーズで、流量が異なるC1-1、C1-5、C1-9を比較する。流量が2.8L/sのC1-9に比べ、3.5L/sのC1-5、4.2L/sであるC1-1の方が氷板移動速度が小さく、また早い時刻に氷板移動速度がほぼ0に到達している。氷板量の違いについて、氷板量0.6L/sのC1-9と0.3L/sのC-11を比較しても、氷板移動速度がほぼ0に到達する時刻には違いはみられない。同様に氷板サイズの異なるC1-9とC1-10の比較でも、むしろ氷板サイズが小さいC1-10で早い時刻で氷板移動速度がほぼ0となっている。以上からC1シリーズについては、アイスジャム発生と流量、氷板量、氷板サイズの間には関係がみられなかった。

一方C2シリーズでは、氷板移動速度がほぼ0になる時刻は流量2.8L/sのケースC2-9、3.5L/sのケースC2-5、4.2L/sのケースC2-1の順に遅くなっており、滞留氷板枚数も流量が増えるに従い増加しており、流量が大きくなるに従いアイスジャム発生が遅くなる傾向が明確にみられる。また氷板量が0.6L/sのC2-9と0.3L/sのC2-11を比較すると、C2-9の方が氷板移動速度がより早期に減衰すると同時に氷板滞留枚数が増加しており、氷板量が多いほど氷板滞留がより進む傾向がみられた。一方、氷板サイズについては、サイズ4cmのC2-10で氷板閉塞枚数が安定しておらず、両者の特徴比較は困難であった。

以上から、完全結氷区間が急縮しているC2シリーズで流量、氷板量がアイスジャム発生に影響を及ぼすことがうかがえた。一方、氷板サイズは両シリーズともに明瞭な差を確認できなかった。一方、完全結氷区間が急縮



(a)C1 シリーズ



(b)C2 シリーズ

図-4 氷板速度減衰割合とアイスジャムスケール

しているC1シリーズでは、流量、氷板量、氷板サイズともにアイスジャム発生との明瞭な関係は伺えなかった。

#### (2) 氷板速度の減衰割合による整理

氷板速度の減衰割合 $\lambda$ の理論値と実験値を比較した結果を図-4に示す。 $\lambda$ の理論値は、式(1)による $S_{ij}$ との関係をプロットしたものである。 $\lambda$ の実験値は、前述した氷板投入開始直前の断面平均流速 $u_{w0}$ と、完全結氷区間上流側0.5m区間内での氷板平均移動速度 $u_i$ から算出した。また $\lambda$ が1以上となることは理論上ないことから、 $u_i > u_{w0}$ となるデータは除外した。また参考として、既往の河幅変化を伴うアイスジャム実験結果<sup>9)</sup>を重ね合わせている。既往実験結果は概ね理論値と適合していることがわかる。

図-4(a)より、C1シリーズにおいては $\lambda$ と $S_{ij}$ の関係は実験値と理論値で大きく異なり、同じ $S_{ij}$ に対して $\lambda$ の実験値は理論値よりも小さい。これは氷板の滞留が進むにつれ、理論値で得られる氷板速度の減衰よりも実験による氷板速度の減衰が大きいことを意味する。

一方、図-4(b)より、C2シリーズにおいても $\lambda$ と $S_{ij}$ の関係は実験値と理論値で大きく異なるが、C1シリーズとは逆に、同じ $S_{ij}$ に対して $\lambda$ の実験値は理論値よりも大きい。これは氷板の滞留が進むにつれ、理論値で得られる氷板速度の減衰よりも実験による氷板速度の減衰が小さいことを意味する。

そこで、C1シリーズについて、式(2)のアイスジャムスケールにおける下流側河道幅 $B_2$ を変化させ、理論値に近くなる補正下流河道幅 $B_2'$ を試行錯誤して算定した。結果を図-6に示す。補正値を本来の下流河道幅 $B_2=0.8\text{m}$ に対して1/16である $B_2'=0.05\text{m}$ で設定したところ、実験値

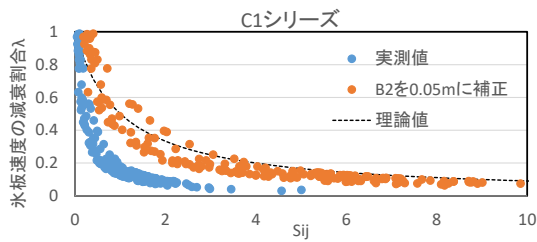


図-5 氷板速度減衰割合の補正結果 (C1 シリーズ)

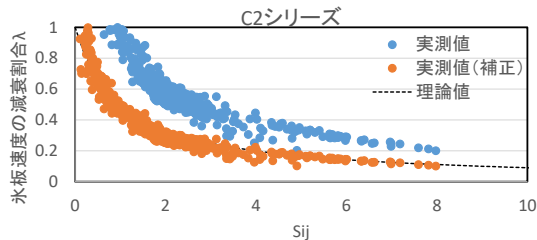


図-6 氷板速度減衰割合の補正結果 (C2 シリーズ)

は理論値とほぼ合致した。

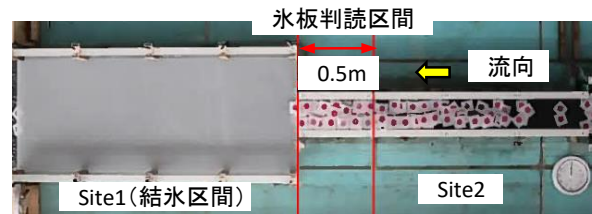
C2シリーズについては、 $B_2'$ を試行的に合わせるのではなく、河道狭窄直上流で死水域が発生し、氷板移動速度に影響していると考え、 $\lambda$ を評価する $u_{w0}$ を補正した。 $u_{w0}$ は当初定義した上流側全断面(水路幅0.4m)での平均流速ではなく、死水域分を除外した水路幅0.2m分を有効な流下断面として平均流速を算出し、 $\lambda$ と $S_{ij}$ の関係を再整理した。図-7にその結果を示す。 $\lambda$ と $S_{ij}$ の関係は理論値に近づく結果となった。式(2)では河道幅が縮小する影響を考慮しているが、アイスジャム発生前の氷板移動速度の評価で横断面の死水域を考慮しておく必要があるといえる。

### (3)完全結氷区間の川幅比の違いに関する考察

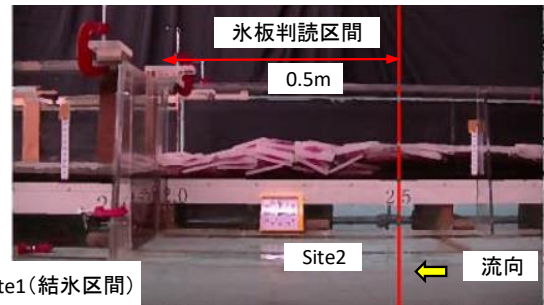
前述したとおり、C1シリーズでの氷板移動速度の減衰割合で、本来の下流河道幅 $B_2=0.8m$ に対して1/16である $B_2'=0.05m$ で設定することで、実験値と理論値がほぼ合致した。ここではその理由について氷板滞留状況を考察していく。

写真-1は同一流量、氷板量、氷板サイズでのアイスジャム実験として、実験C1-9とC2-9の完全結氷区間上流部の氷板鉛直撮影と側方撮影結果を示したものである。C1-9では、Site2からSite1へ流入する際に断面が急拡大するとともに、縦断勾配がSite2の1/120からSite1では水平になり、アイスジャム発生箇所付近では流速が低減する条件にある。さらに完全結氷によるSite1水面の氷板と、上流から流入する氷板が重なり合うことが促進される傾向がうかがえる。

一方C2-9においては、完全結氷区間であるSite3の上流側で、Site2の水面付近で流入河水が重なり合っているものの、河床付近は氷板滞留はみられない。これはSite3からSite2への流入が断面急縮でかつ勾配が水平から1/120に

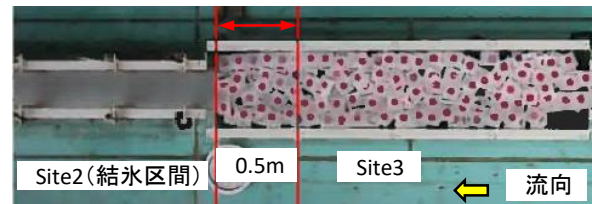


垂直上方からの撮影

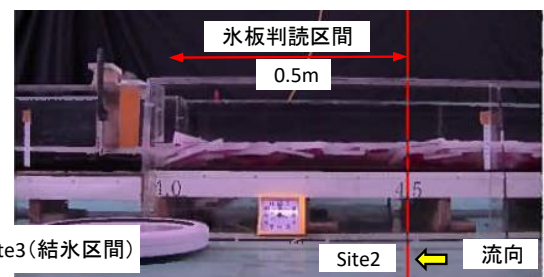


側方からの撮影

(a)実験 C1-9



垂直上方からの撮影



側方からの撮影

(b)実験 C2-9

写真-1 完全結氷区間上流側の氷板滞留状況

変化するため、断面変化部で流れが加速される傾向にあるためである。

式(2)では断面形状の川幅変化を考慮しているが、縦断方向の勾配変化や完全結氷による河水補足などによる流況変化までは十分とらえきれない。補正時に河道幅を大幅に低減する必要がある理由の1つとしてこれらの点が考えられるが、どの程度まで有効断面の変化として考えるべきかは、今回は結論が得られなかった。

なおここまで述べた内容は、現時点では推論の段階であるため、今後氷板の滞留機構を各実験条件で十分考察していきたい。

#### 4. まとめ

完全結氷区間上流側で生じるアイスジャム現象について、既往研究で得られた氷板速度の減衰割合とアイスジャムスケールを用いて結果を整理した。本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 完全結氷区間が拡大しているケース (C1シリーズ) では $\lambda$ と $S_{ij}$ の関係は理論式とは異なり、実測値は理論値より氷板滞留が進行する傾向となった。今回の実験では、下流断面の河道幅を実際の1/10以下に縮小したと仮定した場合に、実験値は理論値と概ね合致した。
- 完全結氷区間が縮小しているケース (C2シリーズ) では、アイスジャム発生直前の氷板速度を適切に評価することで、減衰割合 $\lambda$ とアイスジャムスケール $S_{ij}$ の関係が既往の理論式とほぼ合致した。
- C1シリーズで $\lambda$ と $S_{ij}$ の関係は理論式と異なる原因について考察した。理由の1つとして、完全結氷区間に接続する断面変化部での流れが氷板滞留をより促進し、既存の $\lambda$ と $S_{ij}$ の関係で得られるアイスジャム発生条件と異なる結果となった可能性がある。

今後、断面変化部での氷板滞留の機構をより詳細に検証し、 $\lambda$ と $S_{ij}$ の関係について整理を進めていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 土木研究所寒地土木研究所編, 結氷河川解析マニュアル(案) (<http://river.ceri.go.jp/contents/tool/keppyoceri1d.html>), 2013.
- 2) 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, 第17巻, pp.353-358, 2011.
- 3) 土木研究所寒地土木研究所編, アイスジャムによる脅威 (VOL.1) (<http://river.ceri.go.jp/contents/ice/icejam1.pdf>)
- 4) 阿部孝章, 吉川泰弘, 平井康幸: 北海道太平洋岸地域における河川津波の痕跡調査, 寒地土木研究所月報特集号 (報告) pp.29-36, 2012.
- 5) 例えば中田満洋, 菊谷智孝: 結氷河川における取水確保対策について—永山床止めからの安定取水確保対策—, 平成13年度北海道開発技術研究発表会, 河-11, 2002.
- 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) 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の抽出に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.72, No.4, pp.I\_601-I\_606, 2016.
- 8) Yasuhiro Yoshikawa, Yasutaka Kuroda, Takaaki Abe, Toshihito Toyabe, Hotaek Park, Kazuhiro Oshima: Study on the ice-jam occurrence based on hydraulic experimentation, Proceedings of The 23th International Symposium on Ice, 2016.
- 9) 鳥谷部寿人, 吉川泰弘, 岡部博一, 田中忠彦: 支川合流を考慮したアイスジャム発生に関する実験的研究, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.73, No.4, I\_1339-I\_1344, 2017.