

# アイスジャム発生時における氷径分布と水深上昇に関する水理実験

Hydraulic experiment on ice size distribution and water depth rise during ice jam occurrence

北見工業大学 ○学生員 室井悠希 (Yuki Muroi)

北見工業大学 正員 吉川泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)

北見工業大学 学生員 中西郁弥 (Fumiya Nakanishi)

## 1. はじめに

北海道内の多くの河川では、春になると気温の上昇や大雨により解氷した河氷が下流へと流れ、河道内で河氷が詰まるとアイスジャムが発生し、急激に水位を上昇させ災害が発生する。被害を防ぐためにはアイスジャム現象を解明する必要がある。既往研究<sup>1)2)3)4)5)</sup>では、アイスジャム発生の危険性が高い流速の遅くなる箇所である支川合流点、橋脚部、堰を対象とした水理実験が実施されている。また、実氷や模型氷を用いた実験<sup>2)3)</sup>では、アイスジャムによる水深上昇には、越流水深よりも模型氷が厚い条件や、氷模型同士が集積するような条件が関係することを示している。しかし、アイスジャム発生時の氷径分布や流量が水深上昇に与える影響は十分には解明されていない。

そこで、本研究では、水路内に金網を設置して意図的にアイスジャムを発生させる実験を実施して、アイスジャム発生時の氷径分布と流量の違いによる水深上昇の違いについて検討した。

## 2. アイスジャム実験

### 2.1 実験水路

アイスジャム実験の条件は、2018年3月の辺別川で発生したアイスジャムのデータを基に模型縮尺1/100として決定した。実験水路を図-1に示す。水路長14.5m、水路幅0.3m、高さ0.4m、水路勾配は1/8300とした。水路勾配は、水路床に設置する圧力センサーを流水中に水没させるために、初期条件となる等流水深が深くなるように設定した。水路のマニングの粗度係数は、等流水深の実験値を用いて算出し0.008であった。

意図的にアイスジャムを発生させるために、下流から1.4mの位置に図-2、3に示す0.3m×0.4m金網を設置した。金網の製作については後述する。金網の固定方法は、コの字に加工した木材、C字クランプ、金網が模型氷と水流によって流下しないようにL字金具を用いて図-4のように固定した。

水深測定は、図-1の緑の長方形の位置、具体的に水路下流端から0.9m、1.9m、3.4mの3カ所に設置した圧力センサー(S&DL mini MODEL-4900)を用いて測定した。水路下流から順に圧力センサーNo.1、No.2、No.3とする。実験状況の撮影は、水路側面にハンドヘルドカメラ(DJI社製 Osmo Pocket)、実験水路の平面的な状況を撮影するために滑車台を用いてデジタルカメラ(OLYMPUS TG-1)を設置して撮影した。

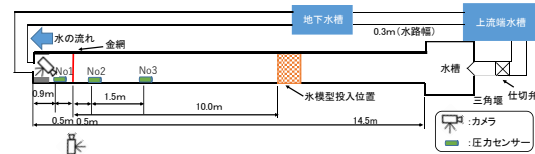


図-1 実験水路(平面図)

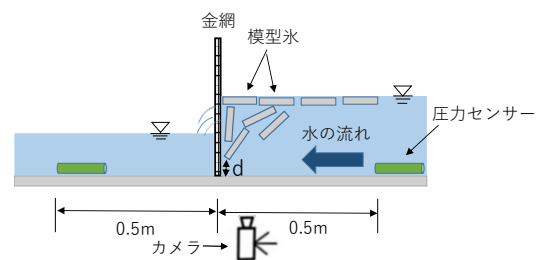


図-2 実験水路(下流から1.4m付近拡大)



図-3 金網(0.3m×0.4m)

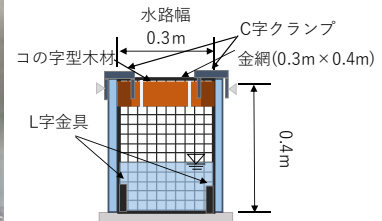


図-4 実験水路(断面図)

### 2.2 金網の製作

製作した金網を図-3に示す。金網は、強度を持たせて水の抵抗が小さくなるように工夫した。金属棒の材質は強度に優れたステンレスを用いた。金属棒は、直径4mmを外枠に、直径2mmを内側の網目部分に用いた。網目のサイズは、2cm×2cmの模型氷が留まるように1.5cmとした。接着剤にセメダイン金属用高強度接着剤(メタルロック P25Gセット AY-123)を用いた。

### 2.3 実験条件

アイスジャム実験条件を表-1に示す。流量は0.014m<sup>3</sup>/s、0.016m<sup>3</sup>/sの2ケースとした。模型氷の氷径分布は、表-2に示す8パターンを設定した。流量2パターン、模型氷8パターンの計16ケースについて、各ケースを3回実施して計48回の実験を実施した。3回実施した理由は、模型氷の投入動作のバラつき等で模型氷の詰まり方に違いが出るためである。

模型氷については、実際の河川での河氷と同等の比

表-1 アイスジャム実験条件と各ケースの初期水深と水深比

case A	流量 (m <sup>3</sup> /s)	初期水深 (m)	水深比	case B	流量 (m <sup>3</sup> /s)	初期水深 (m)	水深比
case A-①-1	0.014	0.143	1.36	case B-①-1	0.016	0.150	1.38
①-2		0.143	1.33	①-2		0.151	1.40
①-3		0.143	1.38	①-3		0.151	1.36
case A-②-1		0.143	1.35	case B-②-1		0.150	1.42
②-2		0.143	1.38	②-2		0.150	1.44
②-3		0.142	1.34	②-3		0.151	1.40
case A-③-1		0.143	1.39	case B-③-1		0.150	1.47
③-2		0.143	1.44	③-2		0.150	1.41
③-3		0.144	1.44	③-3		0.151	1.44
case A-④-1		0.142	1.37	case B-④-1		0.151	1.43
④-2		0.143	1.41	④-2		0.150	1.46
④-3		0.143	1.42	④-3		0.150	1.44
case A-⑤-1		0.142	1.50	case B-⑤-1		0.146	1.49
⑤-2		0.142	1.48	⑤-2		0.149	1.49
⑤-3		0.142	1.55	⑤-3		0.150	1.53
case A-⑥-1		0.142	1.48	case B-⑥-1		0.147	1.53
⑥-2		0.141	1.52	⑥-2		0.148	1.50
⑥-3		0.141	1.44	⑥-3		0.149	1.60
case A-⑦-1		0.141	1.41	case B-⑦-1		0.148	1.56
⑦-2		0.141	1.40	⑦-2		0.149	1.55
⑦-3		0.141	1.36	⑦-3		0.149	1.63
case A-⑧-1		0.142	1.48	case B-⑧-1		0.150	1.49
⑧-2		0.143	1.47	⑧-2		0.150	1.63
⑧-3		0.143	1.42	⑧-3		0.149	1.63

表-2 模型氷のパターン

	黄 2cm×2cm×0.5cm	紫 2cm×2cm×1cm	赤 4cm×4cm×0.5cm	黒 4cm×4cm×1cm
①	200枚	100枚		
②		200枚		
③				50枚
④	400枚			
⑤		100枚		25枚
⑥	200枚		50枚	
⑦			50枚	25枚
⑧			100枚	

重であるポリプロピレンを用いた。1回の実験で用いる模型氷の体積は 800cm<sup>3</sup> で統一した。既往研究<sup>2)</sup>より、模型氷のサイズは、実河川においてアイスジャム発生後に河道に堆積していた河水の最大サイズ 3.7m より、4cm×4cm とした。その他に 2cm×2cm を追加した。

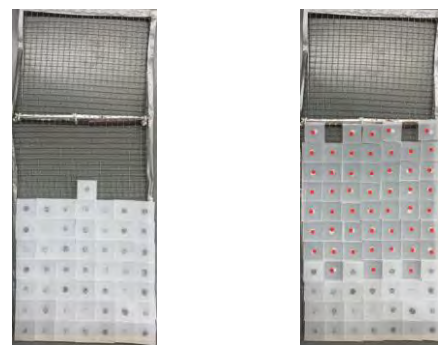
模型氷の投入方法は、図-5 のように事前に 29.5cm×65cm の金網上に模型氷を並べて、水面が波立たないように流水中に金網を入れて金網を引き抜くことで模型氷を投入した。手動ではあるが同じ条件で模型氷を投入できるように工夫した。2種類の模型氷を投入する際は、下流方向に面積や体積の大きい模型氷を並べ、その上流方向に小さい模型氷を金網に並べて投入した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 水深比

アイスジャム発生による水深の上昇について、水深比を用いて評価した。本検討での水深比とは、上昇した水深を初期水深で割った値である。初期水深は実験開始前 30 秒間の水深を平均した値とした。上昇時の水深は実験終了から 30 秒前の水深を平均した値とした。

表-1 に初期水深と水深比を示す。本実験の全てのケースで、初期水深よりもアイスジャム発生時の水深が上昇した。各流量における最大の水深比は、case A-⑥と case B-⑧の条件で確認された。



左：模型氷パターン③ 右：模型氷パターン⑦  
図-5 投入する模型氷の状況

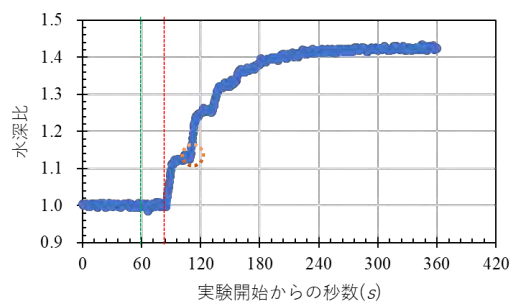
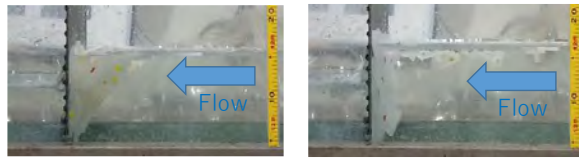


図-6 水深比の経時変化(case A-③)

#### 3.2 アイスジャム現象と水深比の経時変化

アイスジャム発生時の水深比の経時変化について、特徴的な case A-③を事例にして考察する。水深比の経時変化を図-6 に示す。緑の点線が模型氷を投入した時間、赤い点線がアイスジャム発生時間、オレンジの点線の丸は水深が急激に上昇した時間を示している。アイスジャム発生時から急激に水深が上昇し、約 20 秒間安定して、その後、さらに水深が急激に上昇している。この急激に水深が上昇する時間では、金網に近い模型

氷が水深の上昇により前傾し、垂直になることで通水面積が急激に小さくなった。このため水深が急激に上



左 : caseA-⑥ 右 : caseB-⑥  
 図-7 アイスジャム発生時の側面での流況



左 : caseA-⑥ 右 : caseB-⑥  
 図-8 アイスジャム発生時の平面での流況

昇したと推察される。他の実験条件でも同様の現象が発生している。しかし、投入する模型氷が全て小さい条件の④400枚(2cm×2cm×0.5cm)では、急激な水深の上昇は他と比べて小さい。模型氷のサイズの違いにより急激に水深が上昇しない場合があった。

3.3 流量の違いによるアイスジャム現象の違い

流量の違いによるアイスジャム現象の違いを検討するために、混合した氷径分布である⑥ 200枚(2cm×2cm×0.5cm)+50枚(4cm×4cm×0.5cm)のパターンについて検討する。

図-7 にアイスジャム発生時の側面での流況を示す。case A-⑥では、水面に赤の模型氷(4cm×4cm×0.5cm)、水路床付近に黄の模型氷(2cm×2cm×0.5cm)が堆積している。case B-⑥では、赤の模型氷(4cm×4cm×0.5cm)が鉛直下方向にも堆積しており、その隙間に黄の模型氷(2cm×2cm×0.5cm)が堆積して、より通水面積を狭める現象となった。

図-8 にアイスジャム発生時の平面での流況を示す。水面に滞留する模型氷は、case B-⑥で流量が大きくなると鉛直下方向に沈み込み、水面に滞留する模型氷はcase A-⑥に比べて少ない。

流量が大きいと模型氷は鉛直下方向に沈み込み、通水面積を小さくさせて水深が上昇すると推察される。

3.4 氷径分布の違いによる水深比の違い

氷径分布の違いによる水深比の違いを検討する。模型氷の各パターンと水深比の関係を図-9 に示す。

図-9 より、③50枚(4cm×4cm×1cm)と⑤100枚(2cm×2cm×1cm)+25枚(4cm×4cm×1cm)以外で流量の増加によって水深比は大きい値となる。模型氷パターン③と⑤

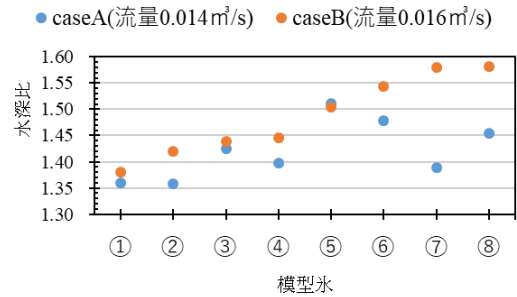
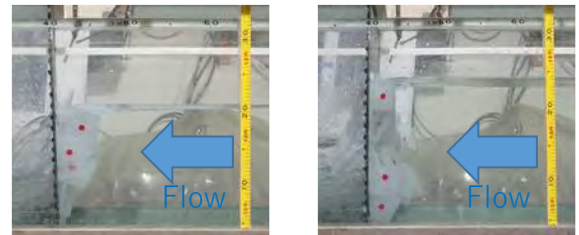


図-9 模型氷の各パターンと水深比(平均値)



左 : caseA-⑧ 右 : caseB-⑧  
 図-10 アイスジャム発生時の側面での流況

では、流量増加に伴い模型氷の鉛直下方向への沈み込みが発生しないため、水深比が大きくならなかったと推察される。

図-9 の caseA と caseB において、模型氷のサイズが小さい下記の3ケースの水深比は、模型氷の厚さ0.5cmの枚数が増えると水深比が大きい結果であった。

- ①200枚(2cm×2cm×0.5cm)+100枚(2cm×2cm×1cm)
- ②200枚(2cm×2cm×1cm)
- ④400枚(2cm×2cm×0.5cm)

図-9 の caseB において、模型氷のサイズの大きい下記の3ケースの水深比を見ると、模型氷の厚さ0.5cmの枚数が増えると水深比が大きい結果であった。

- ③50枚(4cm×4cm×1cm)
- ⑦50枚(4cm×4cm×0.5cm)+25枚(4cm×4cm×1cm)
- ⑧100枚(4cm×4cm×0.5cm)

一方で、caseA の模型氷パターン⑦の水深比は③よりも小さい。図-5 は模型氷パターン③と⑦の投入した模型氷である。撮影した動画を見ると、模型氷パターン⑦では、黒の模型氷(4cm×4cm×1cm)が鉛直下方向に沈み込み、その後ろに赤の模型氷(4cm×4cm×0.5cm)が堆積したが、赤の模型氷の鉛直下方向への沈み込みはなかった。黒の模型氷の沈み込みにより水深が上昇し流速が減少したため、赤の模型氷が沈み込むまでの流速に至らなかったと推察される。一方で、模型氷パターン③では、黒の模型氷(4cm×4cm×1cm)は鉛直下方向に沈み込んでいる。模型氷パターン③と⑦における水面に存在する模型氷の枚数は、模型氷パターン⑦の方が多。模型氷の沈み込みの違いにより、模型氷パターン⑦の水深比は③よりも小さくなったと推察される。

図-9 において、caseA の模型氷パターン⑦と⑧の水深比と、caseB の模型氷パターン⑦と⑧の水深比では、大きな差が発生している。模型氷パターン⑧のアイスジ

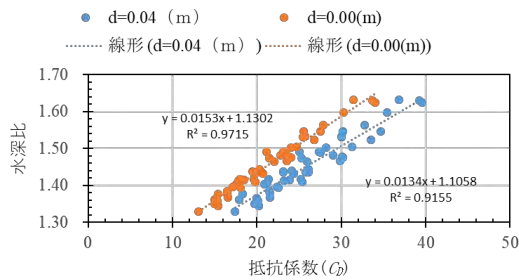


図-11 抵抗係数と水深比

ヤム発生時の側面での流況を図-10 に示す。図-10 より、流量が大きいcaseBの場合は、模型氷は鉛直下方向に沈み込み通水面積を小さくさせて水深が上昇している。caseA-⑧とcaseB-⑧の水深比に差が発生した要因として、模型氷の鉛直下方向への沈み込みが考えられる。

図-9 において、模型氷パターン②と③、模型氷パターン④と⑧の水深比を比較すると、模型氷のサイズが大きい方が小さい場合に比べて水深比が大きい。

図-9 において、異なる模型氷のサイズを混合した下記の2ケースの水深比を見ると、caseAでは模型氷の厚さ1.0cmの枚数が増えると水深比が大きくなるが、caseBでは模型氷の厚さ0.5cmの枚数が増えると水深比が大きくなる。

⑤100枚(2cm×2cm×1cm)+25枚(4cm×4cm×1cm)、

⑥200枚(2cm×2cm×0.5cm)+50枚(4cm×4cm×0.5cm)

本実験では、異なる模型氷のサイズが混合した場合のアイスジャムによる水深比は、流量により異なる結果となった。

本実験は、模型氷の堆積の状況により水深比の結果にばらつきがあった。要因として、模型氷の投入時の動作の差によって、模型氷の水路の流れ方や詰まり方に違いが発生したことが考えられる。

### 3.5 抵抗係数( $C_D$ )と水深比

実験データを用いて、抵抗係数と水深比の関係を整理した。抵抗係数は運動方程式である(1)と、物体にかかる抵抗の式である(2)を連立させることで求めた。

$$F = \rho QV_1 - \rho QV_2 + \frac{\rho g B(h_1^2 - h_2^2)}{2} \quad (1)$$

$$F = \frac{\rho C_D A V_1^2}{2} \quad (2)$$

$$A = (h_1 - d)B \quad (3)$$

$C_D$ [無次元]: 抵抗係数,  $\rho$ [kg/m<sup>3</sup>]: 水の密度,  $V_1$  [m/s]: 圧力センサーNo.2 から測定した値から求めた流速,  $h_1$  [m]: 圧力センサーNo.2 から測定した水深,  $V_2$  [m/s]: 圧力センサーNo.1 から測定した値から求めた流速,  $h_2$  [m]: 圧力センサーNo.2 から測定した水深  $A$  [m<sup>2</sup>]: 代表面積  $d$  [m]: 模型氷と水路床の距離である。

全ケースの抵抗係数と水深比の関係を図-11 に示す。本実験水路は水路床から0.04mは金具で覆われ可視化出来ない。このため、 $d$ を正確に測定出来なかった。本検討では、 $d=0.00$ 、 $d=0.04$ の2パターンの場合で抵抗係数と水深比の関係を整理した。図-11 より、抵抗係数が大きいと水深比も大きくなる。また、 $d$ の値が小さいと抵抗係数は大きい。参考までに、抵抗係数と水深比の近似式を1次直線で示した。近似式は決定係数  $R^2$  が1に近くなるように選定した。

## 4. まとめ

本研究では、金網を用いてアイスジャムを意図的に発生させる実験を実施し、模型氷の氷径分布および流量と水深上昇の関係について検討した。実験結果から得られた知見を以下に示す。

- 1) 流量が大きいと模型氷は鉛直下方向に沈み込み通水面積を小さくさせて、水深が上昇する。
- 2) 模型氷のサイズが大きいと水深比は大きくなるが、同じ模型氷のサイズの場合では厚さが薄い模型氷の枚数が増えると水深比は大きくなる。異なる模型氷のサイズが混合した条件では、流量によって堆積状況および水深比が異なる。
- 3) 抵抗係数が大きいと水深比も大きくなる。また、模型氷と水路床の距離  $d$  の値が小さいと抵抗係数は大きくなる。

## 参考文献

- 1) 山田隆司, 吉川泰弘, 小池太郎, 横山洋: 氷板と晶氷が混在した橋脚部におけるアイスジャム氾濫実験, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.76, No.2, pp.I\_169-I\_174, 2020.
- 2) 山田隆司, 小池太郎, 吉川泰弘, 横山洋: 堰にけるアイスジャム発生条件に関する実験的研究, 土木学会北海道支部, 年次技術研究発表会論文集, 第78号, B-28, 2022.
- 3) 堀純斗, 吉川泰弘, 山田隆司: 川幅漸縮部のアイスジャム実験における氷模型厚と水深変動に関わる検討, 土木学会北海道支部, 年次技術研究発表会論文集, 第78号, B-27, 2022.
- 4) 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, pp.I\_1339-I\_1344, 2017.
- 5) 原文宏, 榎国夫, 佐伯浩: 橋脚形状が氷盤のアーチ形成に及ぼす効果に関する研究, 土木学会, 水工学論文集, 第39巻, pp.607-612, 1995.