

# 橋脚部における 実氷を用いたアイスジャム氾濫実験

小池 太郎<sup>1</sup>・吉川 泰弘<sup>2</sup>・横山 洋<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 北見工業大学大学院 社会環境工学専攻 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)  
E-mail: m1952200121@mail.kitami-it.ac.jp

<sup>2</sup> 正会員 博(工) 北見工業大学 地域未来デザイン工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)  
E-mail: yoshi@mail.kitami-it.ac.jp

<sup>3</sup> 正会員 博(工) 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)

橋脚部におけるアイスジャム現象の解明を目的に、低水路と高水敷を設けた複断面水路を用いた実験を実施した。実験に用いた氷模型は、ポリプロピレンおよび実氷を用いた。本実験結果から以下のことが分かった。(1) アイスジャムにより氷模型の速度は減少し氷模型枚数は増加する。(2) アイスジャムにより氷模型は橋脚を迂回して高水敷へと流れて下流の低水路へと流下する。(3) アイスジャム発生後に、上流で氾濫が始まり、その後下流へと氾濫が始まる。(4) 氾濫速度は、流量が大きいほど速い。上流では氾濫速度はゼロに近づき、氾濫範囲は一定値となる。(5) アイスジャム発生地点の上流では水位が上昇し、直下流では水位が下降する。アイスジャム決壊後の直下流では水位が急激に上昇する。

**Key Words:** ice jam, experiment, bridge piers, water level variation, real ice

## 1. はじめに

2018年3月9日、季節外れの大雨と暖気によって河氷の解氷が進み、北海道内の多くの河川で水位が上昇し、各地で被害が発生した<sup>1)</sup>。富良野市布礼別川では、橋桁に堆積した河氷により水位が上昇し、流水は堤防を越水して浸水被害をもたらした。現地調査の結果、河道内及び橋脚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、越水の痕跡も見られた。美瑛町辺別川では九線橋から上流 200m 地点で堆積していた河氷が流下し、護岸工事中の作業員が流され死亡した。現地調査の結果、事故発生箇所上流に砂防施設があり、直上流の中州に多数の河氷残存及び水位上昇痕跡が見られた。解氷した氷と雪がダム状に集積しアイスジャムが形成され、それが決壊、流下したと推測された。

2018年3月9日の被害は各地で発生し、現地観測の結果アイスジャム現象による災害であると分かった。アイスジャム発生場所として、縦断勾配の変化点、本川・支川の合流点付近、河道内砂州、蛇行及び湾曲部、橋脚等の河川構造物が挙げられた。今後、同様の災害が起こる可能性があるため、アイスジャム現象の解明が必要とされている。アイスジャムとは閉塞氷であり、与えられた

場所における氷の蓄積で、川の中において水の流れを制限するものである。アイスジャム現象に至るまでの過程としては、①河氷の形成、②河氷の解氷(融解、破壊)、③河氷の流下、④河氷の堆積(アイスジャム)、⑤アイスジャムの決壊、⑥河氷の再流下、⑦河氷の再堆積と区分できる。

橋脚部におけるアイスジャムに関する既往研究としては、氷模型としてポリプロピレンを用いた実験<sup>2)</sup>やポリエチレンを用いた実験<sup>3)</sup>が実施されている。既往研究では、実氷と同じ比重の氷模型を用い、実験水路は単断面のものが多い。このため、アイスジャム発生後の高水敷への氾濫現象、アイスジャム発生後にアイスジャムが決壊する現象については十分には研究が実施されていない。

本研究は、アイスジャム現象の内、③河氷の流下、④河氷の堆積、⑤アイスジャムの決壊、⑥河氷の再流下を対象として、橋脚部におけるアイスジャム現象の解明を目的に、低水路と高水敷を設けた複断面水路を用いた実験を実施した。実験に用いる氷模型は、既往研究で用いられているポリプロピレンに加えて、研究事例が少ない実氷を用いた。実験結果の解析により、橋脚部におけるアイスジャム発生時の氷模型の速度と枚数、高水敷での氾濫状況、水位変動について検討を行った。

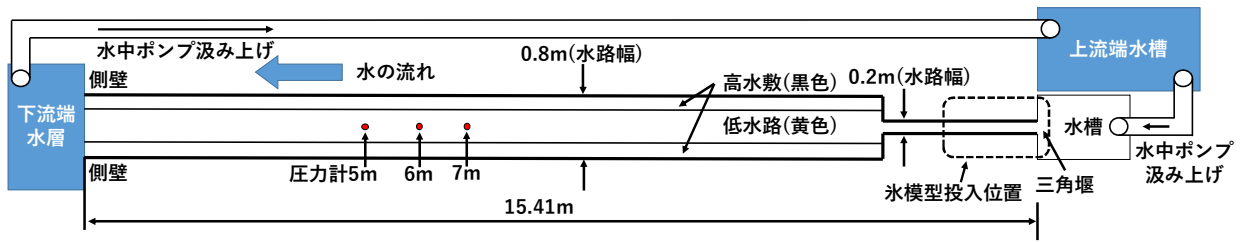


図-1 実験水路の平面図

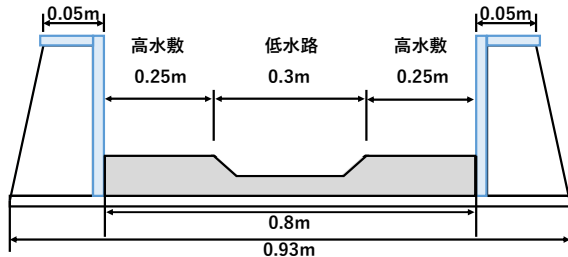


図-2 実験水路の標準断面図

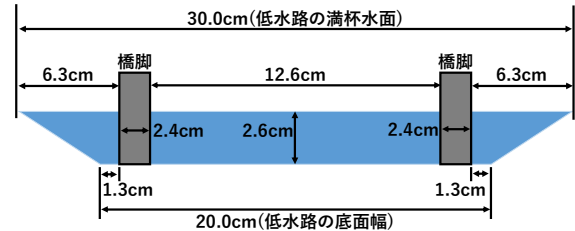


図-3 橋脚設置断面図(下流端から6m地点)

## 2. 橋脚部におけるアイスジャム実験

### (1) 実験条件

実験の水路形状、流量、氷量、氷サイズは、現地調査による詳細なデータが存在する2010年2月に渚滑川で発生したアイスジャム<sup>4)</sup>を参考に設定した。実験ケースは、実河川の氷と同等の比重0.92であるポリプロピレン製の氷模型を用いたCase1と、比重0.89の実氷を用いたCase2の2ケースとした。

水路形状の設定方法について述べる。アイスジャム発生前の流量 $14\text{m}^3/\text{s}$ 、アイスジャム発生区間となる河口から11kmから20kmの区間を対象とした一般断面不等流計算結果<sup>6)</sup>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、低水路の底面幅20cm、低水路の満杯水面幅30cm、水路の最大幅80cm、勾配は1/120を設定した。実験水路を図-1に示し、標準断面を図-2に示す。水路延長15.41m、低水路底面から高水敷高までの高さ2.6cm、高水敷幅25cm×左右2箇所とし、水路下流端は段落ちを設けた。橋脚模型は、図-1の下流端から6m地点において、渚滑川の記念橋を対象にして橋脚間距離の最短距離を参考に図-3に示す配置で橋脚2本を設置した。水路側壁は現象を把握するために一部は透明なアクリル素材とした。側壁のアクリル素材部以外の部分と水路底面部は木製とし、シーラ塗布による防水加工を行い、表面塗装を2回行った。表面塗装の色は、氷模型および高水敷氾濫の判別が可能となるように、低水路を黄色、高水敷を艶消し黒色に塗装した。

上流端流量は、アイスジャム発生時の最大流量 $286\text{m}^3/\text{s}$ を参考にして、本実験水路でアイスジャムが発

生する条件を予備実験にて検討した。検討の結果、最大流量の半分の値を採用し、Case1のポリプロピレン実験ではフルード相似則より $1.4\text{L}/\text{s}$ とした。一方、Case2の実氷実験では、 $1.4\text{L}/\text{s}$ でアイスジャムが発生しなかった、このため、さらに半分の $0.7\text{L}/\text{s}$ とした。

Case1の流水は、高水敷への氾濫を判別しやすいように、白色の入浴剤(アース製薬、バスロマンプレミアムスキンケア)を用いて濃度2%で着色した。着色した水の比重は、標準比重計(ピクノメーター)で測定し、1.022の値であった。Case2の流水は、実氷が融解しないように水温を低下させる必要がある。水槽内に冷却装置(トーマス科学器械TRL-117G2S)を設置し、角型の氷200L程度を実験開始前にかき氷器で粉碎して水槽内に投入した。着色する場合、濃度管理が困難になるため、Case2の流水は着色せずに真水を用いた。一方でCase2では、高水敷に流水が氾濫したかを判別するために、高水敷に白色の水溶性粉末の入浴剤を散布した。流水が高水敷に氾濫する場合、入浴剤が溶けて下地の艶消し黒色が現れる。

氷量は、アイスジャム発生前の氷量 $60\text{m}^3/\text{s}$ を参考にフルード相似により $0.6\text{L}/\text{s}$ とした。氷サイズは、アイスジャム発生後に河道に堆積していた氷の最大の氷サイズ4m、厚さ0.6mの値から、氷サイズを $4\text{cm}\times 4\text{cm}$ 、厚さ0.6cmとした。Case1、Case2ともに、氷模型を各500枚作製した。氷模型速度をPIV解析により求める際に、氷模型を判読しやすいように、Case1の氷模型は全体を蛍光オレンジで着色し、中心に直径2cmの円形を設けて青色で着色した。Case2の実氷は全体を朱の墨汁濃度0.25%で着色し、中心に直径2cmの円形を設けて黒の墨汁濃度0.25%で着色した。

氷模型の投入位置はCase1は図-1の下流端から13.0~15.4m、Case2は図-1の下流端から15.4~15.9mの位置とした。投入方法は、投入時間8秒で1秒当たり62.5枚の



図-4 アイスジャム実験状況 (ポリプロピレン, Case1)

氷模型を人の手により投入した。

水位測定は、図-1 示す低水路底面に圧力センサー(STS社製 ATM.1ST)を 3 箇所設置し、測定された圧力から水位に換算して測定した。測定間隔は、0.01 秒とした。水温は実験前後で測定し、ポリプロピレン氷模型を用いた実験は 実験前後 14°C、実氷模型を用いた実験は実験前 1.3°C 実験後 1.9°C であった。なお、水温 14°C で粘性係数 0.00117 Pa・s、水温 1.6°C で粘性係数 0.00170 Pa・s である。今回の実験では、実氷模型を用いた実験の方が粘性係数が大きい条件であった。

実験状況を把握するために、水路上方に 1 眼レフデジタルカメラ(Canon EOS Mark II)1 台を設置し、水路縦断距離 6m の範囲を撮影した。

## (2) アイスジャム実験状況

Case1 のカメラ画像を図-4 に示し、Case2 のカメラ画像を図-5 に示す。

Case1 の図-4 c) より、17 秒頃からアイスジャムが発生した。最初に流速の遅い橋脚外側に氷模型が堆積し、橋脚を支点として上流に弧を描くようにアーチ形状に氷模型が堆積した。図-4 d) ~ h) より、アイスジャム発生後に流水と氷模型が橋脚上流の左右岸の高水敷に乗り上げ

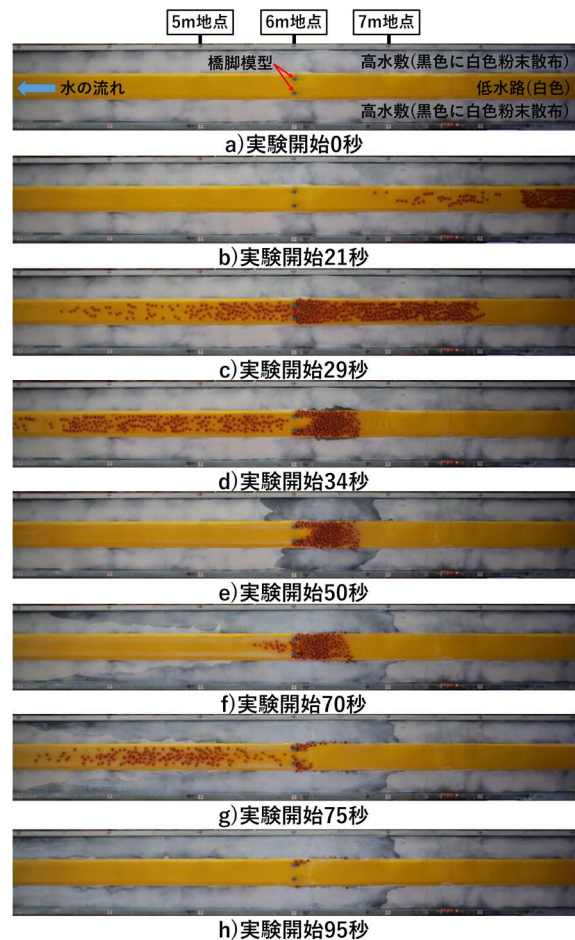


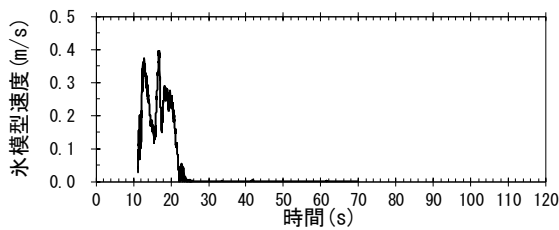
図-5 アイスジャム実験状況 (実氷, Case2)

ている。その後、橋脚を迂回して流水と氷模型が下流の低水路内に戻り、氷模型の一部は低水路法肩に堆積した。氷模型総投入枚数 500 枚に対して、アイスジャムにより低水路内に堆積した枚数は 300 枚、高水敷に堆積した枚数は 49 枚であった。

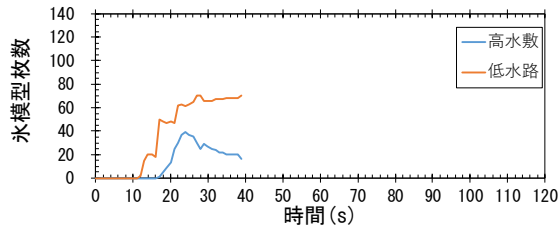
Case2 の図-5 c) より、29 秒頃からアイスジャムが発生した。ポリプロピレン氷模型実験と同様橋脚を支点として実氷がアーチ状に堆積した。アイスジャム発生後は高水敷に流水のみ氾濫した。なお、実氷は高水敷に乗り上げずに低水路内に堆積した。

高水敷に乗り上げなかった要因の一つとして、実氷の融解が考えられる。実氷が融解して小さくなり、アイスジャムの発生が遅れ、多くの実氷が下流へと流れたため、堆積する実氷の量が少なくなり高水敷に実氷に乗り上げられなかったと考えられる。なお氷の融解の影響については既往研究<sup>7)</sup>より、流速  $u$ 、水深  $h$  とすると  $u/h^{1/4}$  の値で評価できる。フルード相似を適応すると、現地 1.12 で実験 1.02 であった。

図-5 f) の 70 秒に実氷の流下と伴にアイスジャムが決壊し、75 秒にはアイスジャムは解消された。実氷総投入枚数 500 枚に対して、50 秒における低水路内の平面上の実氷堆積枚数は 100 枚であった。

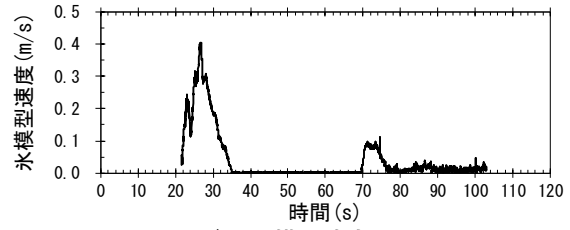


a) 氷模型速度

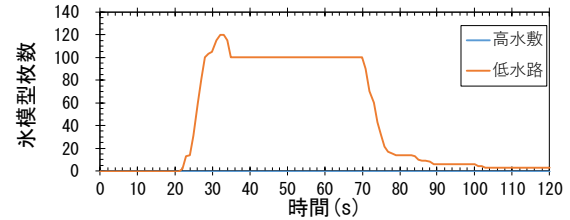


b) 氷模型の流下堆積枚数

図-6 氷模型速度と流下堆積枚数  
(ポリプロピレン, Case1)



a) 氷模型速度



b) 氷模型の流下堆積枚数

図-7 氷模型速度と流下堆積枚数  
(実氷, Case2)

### (3) 氷模型速度と流下堆積枚数

氷板模型速度と流下堆積枚数の経時変化を計測した。Case1を図-6 a)b)に示し、Case2を図-7 a)b)に示す。

氷板模型速度は、市販のソフトウェア(カトウ光研株式会社製FlowExpert2D2C)を用いてカメラ画像のPIV解析により求めた。解析格子サイズは $15 \times 15$ pixelとして、Case1ではx軸、y軸とも $1\text{pixel}=0.0540\text{m}$ とし、Case2ではx軸、y軸とも $1\text{pixel}=0.0526\text{m}$ とした。解析の範囲と速度の算出方法は、Case1では橋脚6.0mからアイスジャム端点である6.5mまでの低水路内を範囲として速度ゼロ以下を除いた値(50データ)を平均して速度を求めた。Case2では橋脚6.0mからアイスジャム端点である6.7mまでの低水路内を範囲として速度ゼロ以下を除いた値(65データ)を平均して速度を求めた。

流下堆積枚数は、橋脚模型から上流のアイスジャム端点までを範囲として、低水路と高水敷に区分して、1秒間隔で平面画像を基に判読した。このため、氷模型が鉛直方向に重なっている場合は判読できない。

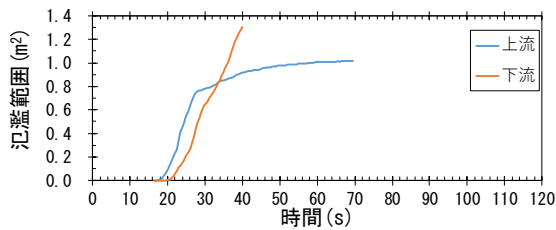
Case1の図-6 a)より、11秒から氷模型の速度と枚数が上昇している。その後、速度は15秒にかけて遅くなり16秒では速度が上昇している。カメラ画像をみると14~15秒に上流の約8.5m付近で氷模型が堆積しており、16秒で堆積した氷模型が流下を開始したためと推定できる。17秒には、橋脚地点で氷模型が堆積して高水敷に流水と氷模型が氾濫する。氷模型速度は17秒から24秒にかけてゼロに近づく。

Case1の図-6 b)より、高水敷の氷模型枚数をみると24秒をピークに減少する。高水敷に存在する氷模型が下流の低水路へと流下したことが要因である。低水路の氷模型枚数は、高水敷へ氷模型が流れ始める25秒から枚数の変化が小さい。低水路内に堆積した枚数は300枚であ

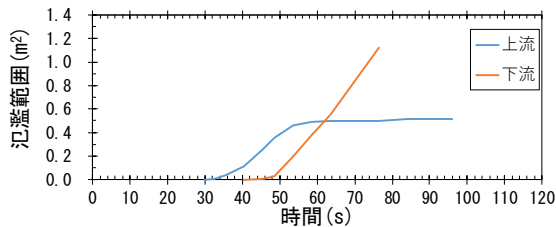
り、判読した枚数は70枚であった。 $300/70=4.28$ となり、アイスジャム発生区間の低水路内に70枚の氷模型層が約4層存在すると考えられる。氷模型厚 $0.006\text{m} \times 4=0.024\text{m}$ で低水路高さは $0.026\text{m}$ であることから、低水路内全域に氷板模型が存在していたことが分かる。言い換えると、低水路に堆積可能な氷模型枚数に達したため、25秒以降は氷模型枚数の変化が小さくなったと推定される。なお、40秒以降は速度と枚数の変化が小さいため計測していない。

Case2の図-7 a)b)より、22秒から実氷の速度と枚数が上昇している。速度は約26秒でピークとなり約34秒にかけてゼロに近づき、実氷の氷模型枚数は30秒付近にかけて増加する。カメラ画像より30秒付近までは実氷の堆積は確認されず橋脚部を通過する。34秒にはアイスジャムが発生し、実氷は橋脚部で上流方向に弧を描くようにアーチ状に堆積した。アーチが形成されたため、橋脚付近の実氷は20枚程度流下し枚数が減少した。35秒以降は停止状態が続き、実氷枚数の変化は小さくなる。その後、70秒から実氷が流下を始めてアイスジャムの決壊が開始された。75秒にはアイスジャムは解消されて実氷は下流へと流下した。なお、76秒以降の実氷枚数の減少は、橋脚部と低水路の間に堆積している実氷が流下したためである。

本検討から、アイスジャムにより、氷模型の速度が減少し、氷模型枚数が増加することが分かった。Case1より、アイスジャムにより氷模型は橋脚を迂回して高水敷へと流れて下流の低水路へと流下する。Case2より、アイスジャムの決壊時の実氷の速度は、アイスジャム発生時よりも遅いことが分かった。



a) ポリプロピレン, Case1



b) 実氷, Case2

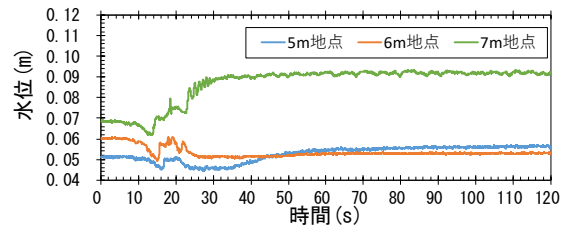
図-8 高水敷における氾濫範囲

#### (4) 氾濫範囲の経時変化

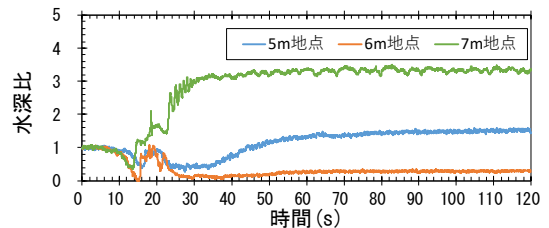
アイスジャム発生時の高水敷の氾濫状況を明らかにするために、橋脚地点の上流 1.5m<sup>2</sup>と下流 1.5m<sup>2</sup>に高水敷を区分して、高水敷の氾濫範囲の経時変化を計測した。画像処理ソフトウェア(Wayne Rasband (NIH)製 ImageJ)を用いて、Case1は撮影画像を二値化して、Case2は撮影画像から氾濫範囲をマウスで指定して高水敷の流水の面積を計測した。Case1を図-8 a)に示し、Case2を図-8 b)に示す。

Case1の図-8 a)より、17秒で橋脚部に氷模型が堆積し、上流範囲の高水敷への流水の氾濫が開始した。その2秒後に下流範囲の氾濫が開始した。橋脚部上流で氾濫が開始した後に、流水は橋脚を迂回して下流の高水敷に流れたためである。氾濫速度を示す図中の傾きをみると、上流範囲と下流範囲の傾きが同程度である。しかし、上流は約 28 秒で氾濫速度が遅くなり勾配がゼロに近づくのに対して、下流は氾濫速度は一定値となり下流へと氾濫範囲を拡大させる。なお、下流の 40 秒以降はカメラ画像の範囲を超えたため計測不能となっている。最終的な氾濫距離は、上流で約 2m、下流で 3m 以上であった。

Case2の図-8 b)より、34秒で橋脚部に実氷が堆積し、上流範囲の高水敷への流水の氾濫が開始した。その 13 秒後に下流範囲の氾濫が開始した。流量が 2 倍の Case1 に比べて Case2 では下流範囲の氾濫開始時刻が遅れる結果となった。氾濫速度を示す図中の傾きをみると、上流範囲と下流範囲の傾きが同程度であり、Case1 と比べて遅い。上流は約 58 秒で氾濫速度が遅くなり勾配がゼロに近づくのに対して、下流は氾濫速度は一定値となり下流へと氾濫範囲を拡大させる。なお、下流の 76 秒以降はカメラ画像の範囲を超えたため計測不能となっている。最終的な氾濫距離は、上流で約 1m、下流で 3m 以上であった。

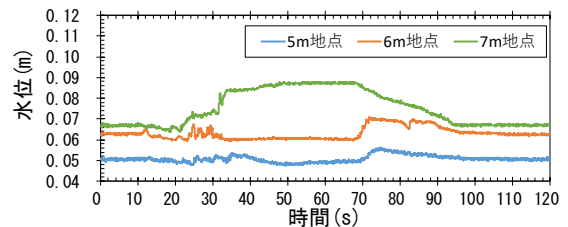


a) 水位の経時変化

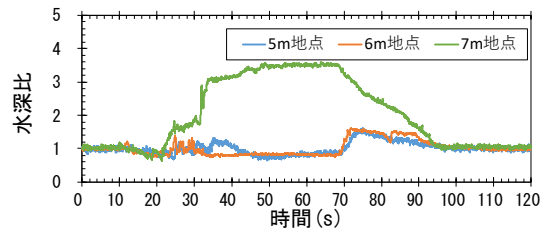


b) 初期水深に対する毎秒の水深の比

図-9 水位と水深比 (ポリプロピレン, Case1)



a) 水位の経時変化



b) 初期水深に対する毎秒の水深の比

図-10 水位と水深比 (実氷, Case2)

本検討から、Case1とCase2より、アイスジャム発生後に、上流で氾濫が始まり、その後下流へと氾濫が始まる。氾濫速度は、流量が大きいため速い。上流では氾濫速度はゼロに近づき、氾濫範囲は一定値となる。

### 3. アイスジャム発生時の水位変動

アイスジャム現象において、現場で注視すべき値として水位が挙げられる。水位と初期水深に対する水深の変動について、実験データを 0.2 秒で移動平均して、Case1は図-9 a)b)に示し、Case2は図-10 a)b)に示す。なお、水深比は初期水深を  $h'$  とし、毎秒の水深を  $h$  として  $h/h'$  で算出した。

Case1の図-9 a)より、アイスジャム発生 17 秒後から上流の 7m 地点で水位は上昇し、橋脚地点 6m および下流 5m で水位は下降している。約 44 秒後の 5m 地点と 6m 地

点を見ると逆勾配になっている。要因として、橋脚上流で高水敷に氾濫した流水が流下して再び低水路内に流入するためと考えられる。なお、18秒から30秒の水位の微振動は、カメラ画像より氷模型の塊が橋脚に衝突し発生した波と考えられる。図-9 b)より、上流7m地点の水深は初期水深に比べて約3倍に上昇している。

Case2の図-10 a)より、アイスジャム発生34秒後から上流の7m地点で水位は上昇し、橋脚地点6mおよび下流5mで水位は下降している。約20秒から30秒の間は、実氷の通過により水位が変動している。アイスジャムが決壊するまでの70秒まで7m地点の水位は上昇している。アイスジャム決壊後は、橋脚地点6mおよび下流5mの水位は急激に上昇する。一方で、上流7m地点の水位は緩やかに下降する。図-10 b)より、上流7m地点の水深は初期水深に比べて約3倍に上昇しており、Case1と同程度である。一方で、橋脚地点6mおよび下流5mの水深は初期水深に比べて約1.5倍に急激に上昇している。本実験結果は、現場において、上流のアイスジャムが決壊した場合、下流の地点で水深が安定している中で急激に水深が上昇し危険が及ぶことを示唆している。

本検討から、アイスジャム発生地点の上流では水位が上昇し、直下流では水位が下降する。アイスジャム決壊後の直下流では水位が急激に上昇することが分かった。

#### 4. まとめ

橋脚部を有する複断面水路における実氷を用いたアイスジャム実験の手法を確立した。本実験により、アイスジャム現象における氷模型の速度と枚数の関係、高水敷への氾濫現象の経時変化、流量の違いによる氾濫速度の違い、アイスジャム発生時の水位変化、アイスジャム決壊時の水位変化について明らかにした。

アイスジャム発生の有無は流量の影響が大きい。一方で、上流からの水量が同じであるポリプロピレンと実氷

において、アイスジャムによる水深の上昇は初期水深に対して約3倍と同程度である。水深の上昇に関しては水量の影響が大きいことが推察される。

謝辞：本研究は、北海道河川財団の研究助成、JSPS 科研費 JP18K04361, JP17H01870 の助成を受けたものである。また、本実験では(株)水工リサーチよりご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 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, pp.I\_1039-I\_1044, 2018.
- 2) 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.
- 3) Jun Wang, Jian Hua, Jueyi Sui, Peng Wu, Tao Liu and Pangpan g Chen : The impact of bridge pier on ice jam evolution – an experimental study, J. Hydrol. Hydromech., Vol.64, pp.75–82, 2016.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 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, 土木学会, 河川技術論文集, 第20巻, pp.241-246, 2014.
- 7) 吉川泰弘, 渡邊康玄, 早川博, 平井康幸 : 河川結氷時の観測流量影響要因と新たな流量推定手法, 土木学会, 水工学論文集, 第54巻, pp.1075-1080, 2010.

(Received May 31, 2019)

(Accepted August 7, 2019)

## ICE JAM FLOOD EXPERIMENT USING REAL ICE AROUND BRIDGE PIERS

Taro KOIKE, Yasuhiro YOSHIKAWA and Hiroshi YOKOYAMA

This study aimed to clarify the phenomenon of ice jams generated around bridge piers. We conducted an ice jam experiment. The section of this experiment waterway is compound cross-section. Polypropylene and actual ice were used for the ice model in this experiment. The study clarified the following. (1) By ice jams, the speed of the ice model decreases and the number increases. (2) The ice model was detoured at bridge piers and flowed on the high-water channel. And it was flowing into the low-water channel in the downstream. (3) After ice jam occurrence, Flooding begins from the upstream site. Later, Flooding flowed to the downstream site. (4) The flooding speed is fast when discharge is large. As time passes, the flooding area becomes the constant value. (5) In the ice jams site, the upstream water level went up, the downstream water level descended. The downstream water level has been increased suddenly after ice jams breaking.