

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

山田 隆司¹・吉川 泰弘²・小池 太郎³・横山 洋⁴

¹ 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: m2052200202@std.kitami-it.ac.jp

² 正会員 准教授 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 (Corresponding Author)

³ 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@std.kitami-it.ac.jp

⁴ 正会員 主任研究員 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)
E-mail: yokoyama-h22ab@ceri.go.jp

本研究は、橋脚部におけるアイスジャム現象の解明のために、実河川の現象に近い氷板と晶氷が混在する実氷を用いたアイスジャム実験を実施した。晶氷の影響を明らかにするために、氷板模型速度と流下堆積枚数、高水敷での氾濫範囲、水位水深変動を用いて検討を行った。晶氷を含む場合は、流下する氷板の下に晶氷が堆積して氷同士が固着し大きな塊として流下し、形状抵抗が大きくなる。このため、氷板速度は遅くなり、流下堆積枚数が増加することが分かった。また、晶氷を含む場合は、大きな氷塊となって流下するため、アイスジャム発生後の上流での氾濫速度は速く、晶氷を含まない場合に比べて急激に氾濫することが推察された。最終的な上流での氾濫範囲は晶氷有り無しで同程度であった。

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

1. はじめに

冬期の寒冷地の河川では、主に気温の低下にともない河川内に河氷が形成され、主に気温の上昇により河水が解氷される。解氷された河氷が河道内に堆積するとアイスジャムが発生する。アイスジャムは、狭窄部、支川合流部、橋脚部、堰、縦断勾配の変化点、河道内砂州、蛇行および湾曲部等の箇所^{1),2),3)}で発生する。アイスジャムにより、流下する流水がせき止められ急激な水位上昇を引き起こし、災害が起こる危険性がある。河氷を大別すると、硬い氷板、軟らかい晶氷、氷板又は晶氷上の積雪に区分できる。晶氷における治水上の問題は、前述のようにアイスジャムを発生させ、急激な水位上昇を引き起こす問題がある。利水上の問題は、晶氷が取水口に堆積し、取水口を閉塞させ、取水障害を引き起こす問題がある。本研究では、アイスジャム現象を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河氷の再堆積に区分した。

北海道ではアイスジャムによる急激な水位の上昇やア

イスジャムの決壊などによる人的被害が、近年、報告されている⁴⁾。2018年3月8日~9日に、温帯低気圧が発達しながら北海道に接近し、北海道全域に降雨と気温の上昇をもたらしたアイスジャムが発生した。道内では3月としては異例の大雪に見舞われていた。その直後の大雨と暖気の影響による雪解けにより河川の水位が急激に上昇し、道内各地でアイスジャム被害が発生した。北海道の辺別川では、河川内工事を行っていた技術者が雪に埋もれて死亡するアイスジャム被害が発生した。氷と雪が混在した河氷が河道内に堆積しアイスジャムが形成され、その後アイスジャムが決壊・流下したと推察されている。

橋脚部におけるアイスジャム現象に関して、氷模型としてポリプロピレン⁵⁾やポリエチレン⁶⁾を用いた実験が実施されてきたが、これらの氷模型では、アイスジャム現象の内、現象が十分に解明されていない⑤アイスジャムの決壊、⑥河氷の再流下を再現できない。この課題に対して、著者ら⁷⁾は実氷の氷板を用いた実験を実施している。しかし、実河川のアイスジャムは、氷板に加えて、晶氷、雪が混在するものであり、このような実験は十分には実施されていない。

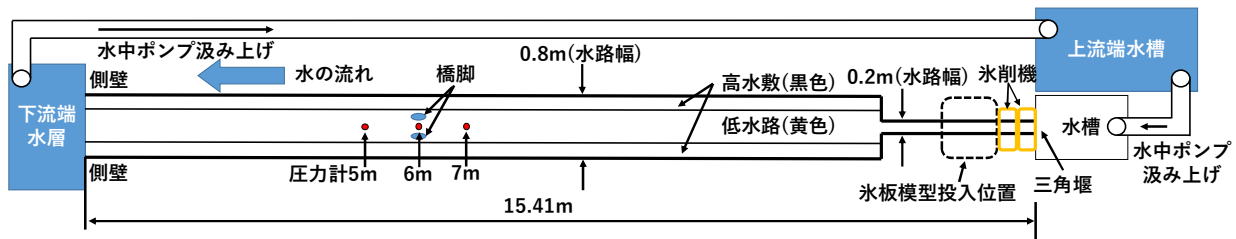


図-1 実験水路の平面図

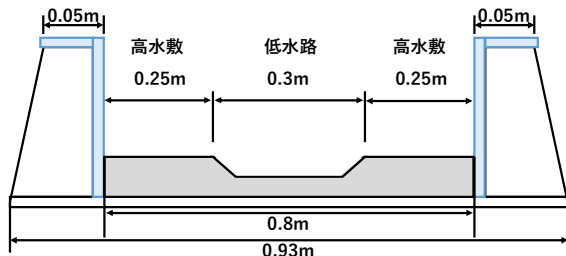


図-2 実験水路の標準断面図

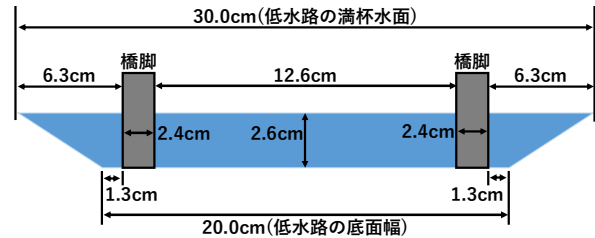


図-3 橋脚設置断面図(下流端から6m地点)

本研究は、橋脚部におけるアイスジャム現象の解明のために、より実河川の現象に近い氷板と晶氷が混在する条件のアイスジャム実験を実施した。アイスジャム発生時の氷板模型速度と流下堆積枚数、高水敷での氾濫範囲、水位水深変動について検討を行った。

2. 橋脚部におけるアイスジャム氾濫実験

(1) 実験条件

実験条件は、実河川のアイスジャムの現地調査データを基に設定した既往研究⁷⁾の実験条件と同様とした。実験ケースは、氷の量は同一として、氷板のみの Case1、氷板と晶氷が混在する Case2 とした。なお、Case1 は、既往研究⁷⁾で実施されたものである。

模型縮尺は 1/100、水路勾配は 1/120 とした。実験水路の平面図を図-1 に示し、標準断面図を図-2 に示し、橋脚設置断面図を図-3 に示す。図-1 より水路延長 15.41m とし、上流端から実氷を投入し下流端は段落ちを設けた。図-2, 3 より、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 とした。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箇所とした。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見られる。橋脚模型は、図-1 の下流端から 6m 地点において、図-3 に示す配置で楕円形の橋脚 2本を設置した。

上流端流量は、Case1、Case2 ともに 0.7L/s とした。氷量は、Case1 と Case2 で同一の 0.6L/s とし、8 秒間投入した。実氷の氷板模型と晶氷模型の割合は、Case1 で氷板 10 と晶氷 0、Case2 で氷板 8 と晶氷 2 とした。氷板模型のサイズは、4cm×4cm、厚さ 0.6cm とした。サイズはアイスジャム発生後に河道に堆積していた最大のサイズ

4m、厚さ 0.6m の現地調査データから決定⁷⁾した。氷板模型は、図-1 で示す位置から投入した。投入方法は、Case1 は 1 秒当たり 62.5 枚の計 500 枚、Case2 は 1 秒当たり 50.0 枚の計 400 枚の氷板模型を人の手により投入した。晶氷模型は、図-1 で示す位置に氷削機(かき氷機)を 2 台縦断方向に設置し、2 台併せて 1 秒当たり 110g の計 880g を自動で水路内に投入した。氷削機の刃の高さは 1.5mm とした。なお、氷板模型は、氷模型速度を PIV 解析により求める際に判読しやすいように、氷板は全体を朱の墨汁濃度 0.25% で着色した。晶氷模型に関しては着色していない。

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、Case1 は実験前 1.3°C、実験後 1.9°C、Case2 は実験前 1.4°C、実験後 1.5°C であった。水温管理のために、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氷削機で粉碎して水槽内に投入している。

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、29 秒頃から橋脚箇所では氷板模型の堆積が始まっている。図-4 d) より、橋脚地点で橋脚を支点にアーチ状に堆積しアイスジャムが発生している。図-4 e) より、氷板模型が橋脚箇所では固定され流水が高水敷に氾濫している。図-4 f) の 70 秒に実氷の流下とともにアイスジャムが決壊し、75 秒にはアイスジャムは



図-4 アイスジャム実験状況 (氷板のみ, Case1)

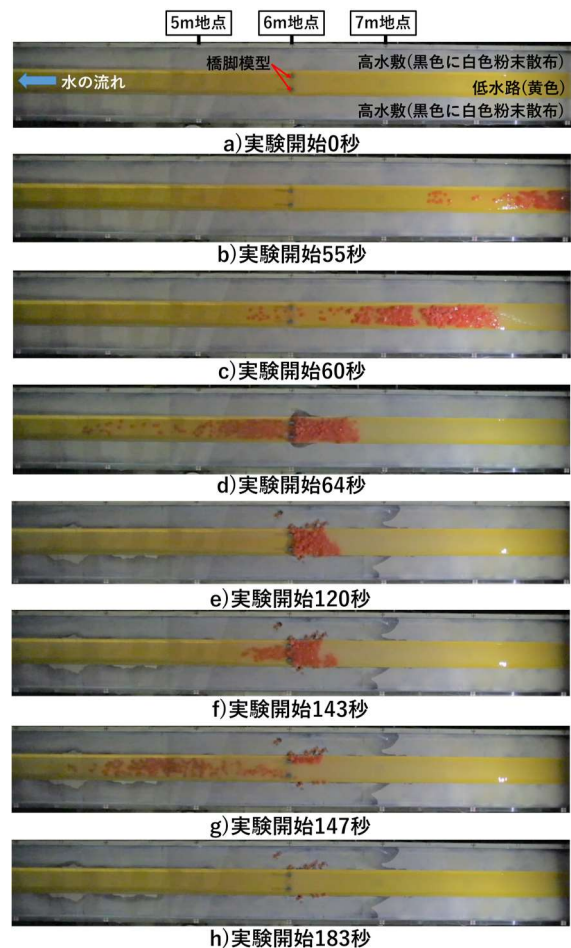


図-5 アイスジャム実験状況 (氷板と晶氷, Case2)

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。

Case2 の図-5 d) より、64 秒頃から橋脚箇所では氷板模型および晶氷模型の堆積が始まっている。図-5 e) より、堆積の形状は、Case1 のようにアーチ状にはならず、横断面方向と並行して直線的に堆積した。また、氷板模型が橋脚箇所固定されアイスジャム発生し流水が高水敷に氾濫した。図-5 f) の 143 秒に実氷の流下とともにアイスジャムが決壊し、147 秒にはアイスジャムは解消された。実氷総投入枚数 400 枚に対して、120 秒における低水路内の平面上の実氷堆積枚数は 238 枚であった。

(3) 氷板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。

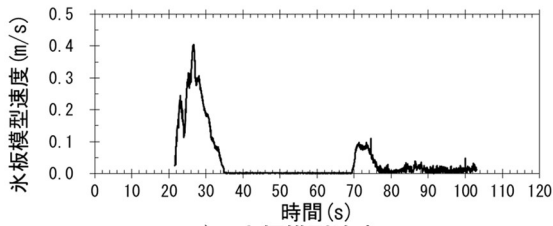
Case1 を図-6 a) b) に示し、Case2 を図-7 a) b) に示す。

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、Case1 と Case2 とともに 52×52 pixel とした。Case1 では x 軸, y 軸とも $1 \text{ pixel} = 0.052 \text{ m}$ とし、Case2 では x 軸, y 軸とも $1 \text{ pixel} = 0.0528 \text{ m}$ 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

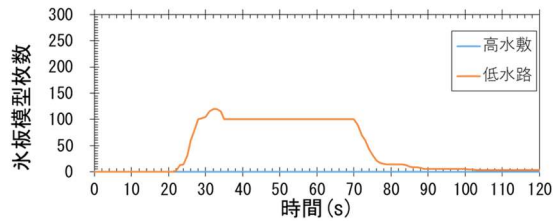
として速度ゼロ以下を除いた値(65 データ)を平均して速度を求めた。Case2 では橋脚 6.0m からアイスジャム端点である 6.3m までの低水路内を範囲として速度ゼロ以下を除いた値(20 データ)を平均して速度を求めた。

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) b) より、22 秒から氷板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 35 秒にかけてゼロに近づき、35 秒から 70 秒まで停止状態が続いた。アイスジャム発生は 34 秒であったが、アイスジャム発生時にアーチ状の中心部を氷板が通過したため、速度がゼロになったのは 35 秒である。氷板の氷模型枚数は 30 秒付近にかけて増加する。カメラ画像より 30 秒付近までは氷板の堆積は確認されず橋脚部を通過する。34 秒でアイスジャム発生し、橋脚地点でアーチ状に形成された。そのため、橋脚付近の氷板は 20 枚程度流下し枚数が減少した。34 秒以降はアイスジャムが発生し、氷板枚数の変化は小さくなる。その後、70 秒から氷板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氷板は下流へと流下し



a) 氷板模型速度



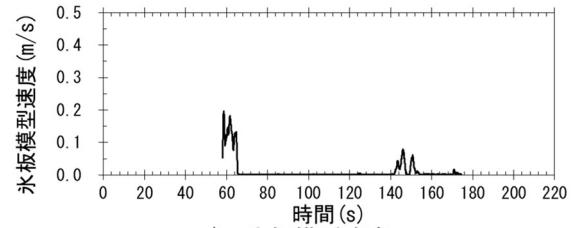
b) 氷板模型の流下堆積枚数

図-6 氷板模型速度と流下堆積枚数
(氷板のみ, Case1)

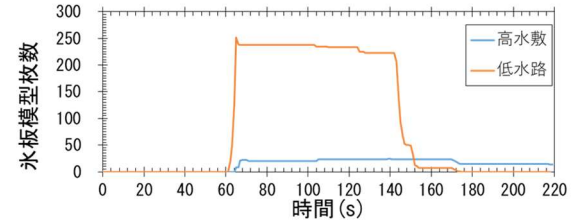
た. なお, 76 秒以降の氷板枚数の減少は, 橋脚部と低水路の間に堆積している氷板が流下したためである.

Case2の図-7 a)より, 58秒から氷板の速度と枚数が上昇している. 速度は59秒でピークになりその後, 約64秒にかけてゼロに近づき, 氷板の流下堆積枚数は64秒にかけて上昇する. 64秒以降はアイスジャムが発生し, 氷板は停止状態が続き, 流下堆積枚数の変化は小さい. その後, 141秒でアイスジャムの決壊が開始され, 147秒でアイスジャムは解消された. 142秒以降の氷板枚数の減少は, Case1と同様に, 橋脚部と低水路の間に堆積している氷板が流下したためである.

Case1とCase2を比較すると, 氷板が橋脚部に到達する時刻は, Case1は22秒, Case2は58秒で, 晶水を含むCase2の方が遅い. 画像をみるとCase2は, Case1と比べて氷同士が固着し, 長さ約1m60cm×幅約30cmの大きな塊として流下した. Case2の方が遅い要因として, 晶水は氷板に比べて流動性が高いため, 流下している氷板下面の鉛直方向に晶水が付着して, 形状抵抗が大きくなったことが推察できる. なお, 流下する氷塊を水と氷を含む氷塊と考えると, Case1の氷塊の間隙は水であり, Case2の氷塊の間隙は晶水である. 水の密度は晶水よりも大きいため, Case1の氷塊はCase2よりも重い. このためCase1の氷塊は, Case2よりも重力の影響を受けると推察できる. 一方で, 水を含まない氷のみの氷塊を考えると, Case2の氷塊の方が晶水の質量分だけ重いのでCase1よりも重力の影響を受けると推察できる. 今回の実験条件では, Case2の氷塊の速度が遅い結果であったが, 氷塊に水分が含まれない条件の場合は, 氷塊の体積が大きいが, 重力の影響により速度が速くなる可能性がある.



a) 氷板模型速度



b) 氷板模型の流下堆積枚数

図-7 氷板模型速度と流下堆積枚数
(氷板と晶水, Case2)

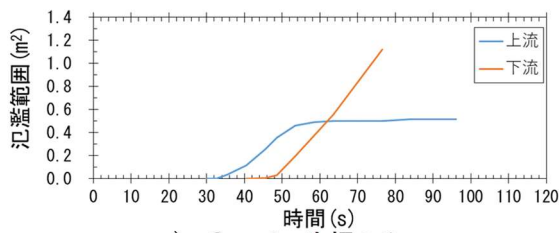
アイスジャム発生時間を比較すると, 氷板模型速度から, Case1は, 35秒から70秒で速度がゼロとなり発生時間は35秒間, Case2は, 67秒から141秒で速度がゼロとなり発生時間は74秒間であった. Case2の方が, アイスジャム発生時間が長い. この要因として, Case2は, 氷同士が固着し大きな塊の状態のままでアイスジャムが発生しており, Case1に比べて氷板の間隙に晶水が付着し氷塊の間隙率が小さくなり, 氷塊内を通過する流水が減少するため, 氷塊内の融解が進まずにアイスジャムが解消されづらいことが推察される. 図-6 b)と図-7 b)より, Case1に比べてCase2の氷板枚数が多いことも間隙率が小さいことを示唆している.

本検討から, 晶水を含む場合は, 流下する氷板の下に晶水が堆積して氷同士が固着し, 大きな塊として流下し, 形状抵抗が大きくなる. このため晶水を含む場合は, 氷板速度は遅くなり, 流下堆積枚数が増加することが分かった.

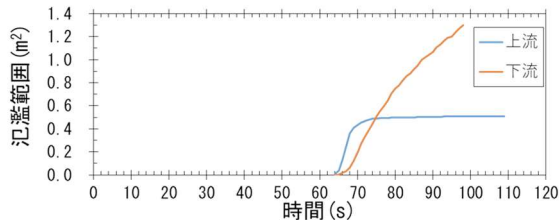
(4) 氾濫範囲の経時変化

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, 橋脚地点の上流範囲1.5m²と下流範囲1.5m²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, 34秒で橋脚部に氷板が堆積し, 上流範囲の高水敷への流水の氾濫が開始した. その13



a) Case1 氷板のみ



b) Case2 氷板と晶氷

図-8 高水敷における氾濫範囲

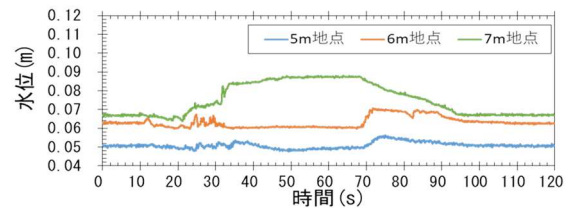
秒後に下流範囲の氾濫が開始した。上流は約 58 秒で氾濫速度が遅くなり勾配がゼロに近づくのに対して、下流は氾濫速度は一定値となり下流へと氾濫範囲を拡大させる。なお、下流の 76 秒以降はカメラ画像の範囲を超えたため計測不能となっている。最終的な氾濫距離は、上流で約 1.0 m、下流で 3.0 m 以上であった。最終的な上流の氾濫範囲は、 0.513 m^2 であった。上流における氾濫範囲がゼロから一定値に近づくまでの氾濫速度は $0.023 \text{ m}^2/\text{s}$ であり、下流は $0.035 \text{ m}^2/\text{s}$ であった。ここで氾濫距離とは、氾濫範囲において橋脚部から上流方向または下流方向へ最大で到達した地点までの距離である。

Case2 の図-8 b) より、64 秒で橋脚部に氷板が堆積し、上流範囲の高水敷への流水の氾濫が開始した。その 1 秒後に下流範囲の氾濫が開始した。上流と下流でほぼ同時に氾濫が始まり、75 秒で上流と下流の氾濫範囲は同程度となる。上流は 74 秒で一定値に達し、下流は 65 秒から範囲を拡大していく。なお、下流の 99 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 1.1 m、下流で 3.0 m 以上であった。最終的な上流の氾濫範囲は、 0.510 m^2 であった。上流における氾濫範囲がゼロから一定値に近づくまでの氾濫速度は $0.086 \text{ m}^2/\text{s}$ であり、下流は $0.039 \text{ m}^2/\text{s}$ であった。

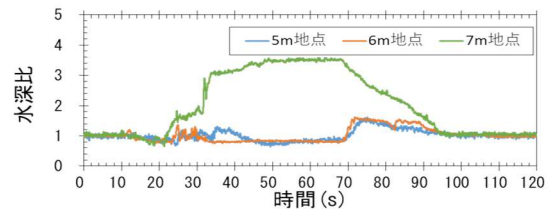
本検討から、晶氷を含む場合は、大きな水塊となって流下するため、アイスジャム発生後の上流での氾濫速度は速く、晶氷を含まない場合に比べて急激に氾濫することが推察された。一方で、最終的な上流での氾濫範囲は晶氷有り無しで同程度であった。

(5) アイスジャム発生時の水位水深変動

アイスジャム現象において、現場で注視すべき水理量

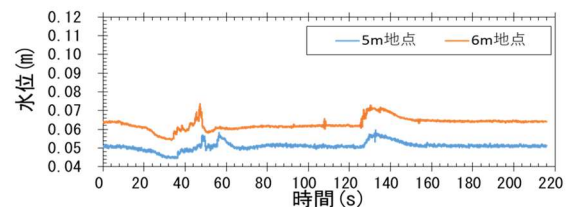


a) 水位の経時変化

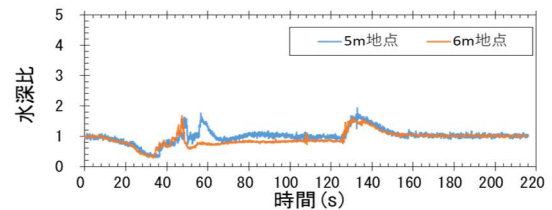


b) 水深比(初期水深比に対する水深割合)

図-9 水位と水深比 (氷板のみ, Case1)



a) 水位の経時変化



b) 水深比(初期水深比に対する水深割合)

図-10 水位と水深比 (氷板と晶氷, Case2)

として水位が上げられる。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。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。なお Case2 の 7m 地点の水位は欠測である。

Case1 の図-9 a) より、35 秒後から上流の 7m 地点で水位は上昇し、5m 地点と 6m 地点では水位は下降している。約 20 秒から 30 秒の期間は、氷板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、5m 地点および 6m 地点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-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、実験開始 10 秒後から 5m 地点と 6m 地点で水位が下降している。この要因として、画像および実験状況から、氷板と晶氷が混在する大きな氷

塊として流下しており、上流の流水をせき止めながら流下していることが挙げられる。実験開始 34 秒から 47 秒にかけて、5m 地点と 6m 地点で水位が上昇している。その後、5m 地点と 6m 地点の水位は下降し、アイスジャム発生した 64 秒から一定値となる。橋脚を設置した 6m 地点では、34 秒から 47 秒にかけての水位の増加量は 1.3 倍である。アイスジャム決壊前の 124 秒では、5m 地点と 6m 地点で水位は上昇する。画像より、この時刻で氷塊が流下している。アイスジャム決壊時の 143 秒では水位は下降している。

Case1 と Case2 のアイスジャム発生前の下流の水位を比較すると、Case2 では、氷板と晶氷が混在する大きな氷塊として流下しており、上流の流水をせき止めながら流下していることから、Case1 に比べて下流の水位は下降することが分かった。また、5m 地点の水位変動については、実験状況からアイスジャム発生後に高水敷へ氾濫した流水が高水敷の 6m 地点を経由し下流の低水路へ流入する影響を受ける。

3. まとめ

橋脚部におけるアイスジャム現象の解明のために、より実河川の現象に近い氷板と晶氷が混在する条件のアイスジャム実験手法を確立し、実験により晶氷の影響について検討を行い、以下の事が明らかとなった。

晶氷を含む場合は、流下する氷板の下に晶氷が堆積して氷同士が固着し大きな塊として流下し、形状抵抗が大きくなる。このため晶氷を含む場合は、氷板速度は遅くなり、流下堆積枚数が増加することが分かった。また、晶氷を含む場合は、大きな氷塊となって流下するため、アイスジャム発生後の上流での氾濫速度は速く、晶氷を含まない場合に比べて急激に氾濫することが推察された。一方で、最終的な上流での氾濫範囲は晶氷有り無しで同程度であった。また、本研究では、今まで十分に実験が実施されてこなかった氷板と晶氷が混在するアイスジャム実験において、実験データを取得した。これらのデー

タは、アイスジャム計算モデルの計算結果の検証データとしての活用が期待できる。

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。

参考文献

- 1) 伊波友生, 横山洋, 吉川泰弘, 矢部浩規, 前田俊一, 鳥谷部寿人: 嶮淵川におけるアイスジャムと河道狭窄の影響に関して, 土木学会, 河川技術論文集, 第 25 巻, pp.91-96, 2019.
- 2) 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.
- 3) 吉川泰弘, 横山洋, 伊波友生: 橋脚部におけるアイスジャム実験と再現計算, 土木学会, 河川技術論文集, 第 25 巻, pp.109-114, 2019.
- 4) 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.
- 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.
- 6) Jun Wang, Jian Hua, Jueyi Sui, Peng Wu, Tao Liu and Pangpang Chen: The impact of bridge pier on ice jam evolution - an experimental study, *J. Hydrol. Hydromech.*, Vol. 64, pp.75-82, 2016.
- 7) 小池太郎, 吉川泰弘, 横山洋: 橋脚部における実氷を用いたアイスジャム氾濫実験, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.75, No.2, pp.I_1411-I_1416, 2019.

(Received June 30, 2020)
(Accepted August 28, 2020)

ICE JAM FLOOD EXPERIMENT USING MIXED REAL ICE WITH ICE SHEET AND FRAZIL SLUSH AROUND BRIDGE PIERS

Ryuji YAMADA, Yasuhiro YOSHIKAWA, Taro KOIKE and Hiroshi YOKOYAMA

This study aims to clarify the ice jam phenomenon around piers. We conducted an ice jam experiment which used mixed real ice with ice sheet and frazil slush. In order to clarify the effect of frazil slush, the experimental results show that ice velocity, number of ice, floods area variations, water level variations. In the case of containing frazil slush, they accumulate underneath the flowing ice sheet, sticking to each other and flowing down as large blocks. And, Ice sheet velocity is slowed down because the shape resistance increases. In the case of containing frazil slush, the ice flows downstream as large ice blocks. When ice jam is generated, the upstream floods area velocity increases and floods rapidly.