

川幅漸縮部における実氷を用いたアイスジャム実験

Ice jam experiment using real ice in a river width gradual reduction area

北見工業大学工学部 ○学生員 山田 隆司 (Ryuji Yamada)
 北見工業大学工学部 正員 吉川 泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)
 北見工業大学工学部 学生員 堀 純斗 (Junto Hori)

1. はじめに

寒冷地では冬期に著しく気温が低下すると、河川内に河氷が形成し、春先に気温が上昇すると河氷が解氷される。解氷された河氷は下流へ流下し、河道内に滞留するとアイスジャム現象が起こる。アイスジャムの起こる箇所としては、河道狭窄部、支川合流部、堰、橋脚部、河道内砂州、縦断勾配の変化点、蛇行および湾曲部等¹⁾²⁾である。アイスジャム現象は、河川内を流下する流水をせき止めて急激な水位上昇を引き起こす。

2018年3月8日から9日にかけて、温帯低気圧が発達しながら北海道を通過し、道内全域に大雨と気温の上昇をもたらしたアイスジャム現象が発生³⁾した。このアイスジャム現象により、道内各地で急激な水位上昇を引き起こし、被害が発生した。北海道の美瑛町から旭川市に流れる辺別川では、河川内工事を行っていた社員が流下してきた河氷に埋もれて死亡する事故が発生した。辺別川では上流から砂州、堰、橋脚部があり、500m以内に危険箇所が多く位置している。これまでに堰、橋脚部におけるアイスジャム現象に関して、氷模型のポリプロピレン⁴⁾、実氷⁶⁾を用いた水理実験が実施されてきた。だが、これまでに砂州により川幅が漸縮する箇所の検討は実施されていない。

本研究は、砂州形状を想定して、川幅が漸縮する水路を作製し、氷模型及び実氷を用いたアイスジャム実験を実施した。川幅の形状によるアイスジャムスケール S_{ij} 、水深比、実氷速度に基づき検討を行った。

2. アイスジャム実験の条件

実験条件は、実河川のアイスジャム現象の現地データを基に設定した。氷模型実験と実氷実験を行った。実験水路は、漸縮角度に応じて CaseA(漸縮角度 90°)、CaseB(漸縮角度 60°)、CaseC(漸縮角度 30°)の3つに分けた。Case A は図-1、Case B は図-2、Case C は図-3の平面図に示す。

氷模型実験は、 $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 1\text{cm}$ のポリプロピレンを用い、ポリプロピレンを120枚(パターン1)、 $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 1\text{cm}$ を2つ重ね氷模型厚が2cmを60枚(パターン2)の実験を各3回実施した。

実氷実験は、氷塊を任意にハンマーで破碎させた。3つのアルミ製のバットを用いて作製した。それぞれ $32.5\text{cm} \times 23.5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 、 $32.5\text{cm} \times 24.5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 、 $25.5\text{cm} \times 19\text{cm} \times 3.5\text{cm}$ に沸騰水を注いで冷凍庫で凍らせて任意にハンマーで砕いた。破碎した氷を目測で大中小に偏りが無いように選別し、氷模型実験と同じ合計質量の1900gになるようにした。それぞれ長径、短径、厚さ、

質量を測定した。

模型縮尺は1/50、水路勾配はゼロ、流量は現地データを基にフルード相似測によって $0.001\text{m}^3/\text{s}$ とした。

実験水路の平面図は図-1に示す。水路延長は12.0mとし、水路幅は0.6mとした。水路幅を変更するために、実氷の投入位置(上下変動ゲート)から3.5m下流に $50\text{cm} \times 50\text{cm} \times 50\text{cm}$ のスタイロフォームで作製した砂州形状模型を設置した。加えて、図-2には $50\text{cm} \times 30.5\text{cm} \times 50\text{cm}$ の三角柱、図-3には $50\text{cm} \times 89\text{cm} \times 50\text{cm}$ の三角柱を水路に設置した。砂州形状模型の接水面にはプラスチック製の板を付着させた。投入方法は図-1、2、3の上下変動ゲートを水面まで下げ、氷模型・実氷投入位置に人の手で投入した。流下方法は実験開始時に上下変動ゲートを上げ、実氷を流下させた。

水深測定は、圧力センサー(STS社製 ATM.1ST)を水路に3箇所設置し、測定した圧力を水深に換算して測定した。圧力センサーは図-1の赤い点で示し、上流端0m、水路幅が漸縮し始める地点から0.3m上流位置及び0.6m上流位置に設置した。測定間隔は1秒とした。水深を求めるために、実験を始める前の30秒間水深を計測し、30秒間の値の平均値を初期値とした。

水深比は測定水深を初期値で割った値とする。水深比の算出方法としては、各地点の最大水深を初期水深で割り、パターン1つで3回実験し、圧力センサー3箇所合計9個の水深比が出たものを平均化する。

室温は現地を再現するために実験室内冷房機で 5°C に設定し、圧力センサーで Case ごとに水温と室温を計測した。Case ごとの平均水温、平均室温は CaseA-1 が 16.7°C 、 4.8°C 、CaseA-2 が 14.0°C 、 7.3°C 、CaseB-1 が 15.8°C 、 7.8°C 、CaseB-2 が 15.8°C 、 8.0°C 、CaseC-1 が 15.3°C 、 9.2°C 、CaseC-1 が 14.6°C 、 7.8°C であった。

実験状況を把握するためにハンドヘルドカメラ(DJI社製 Osmo Pocket)を2か所に設置した。実氷速度計測(PIV解析)のため $50\text{cm} \times 50\text{cm} \times 50\text{cm}$ の上部に平面撮影として1台、水深上昇を把握のため側面撮影として1台を設置した。

3. アイスジャムスケール算出

次式より、アイスジャム発生危険箇所を把握するため S_{ij} : アイスジャムスケール⁴⁾を算出した。

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

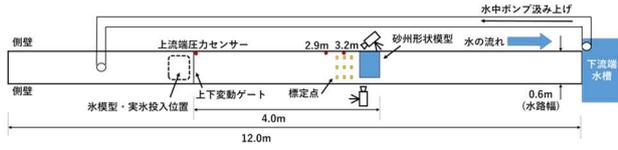


図-1 CaseA(漸縮角度 90°)実験水路の平面図

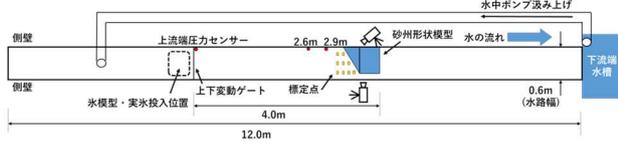


図-2 CaseB(漸縮角度 60°)実験水路の平面図

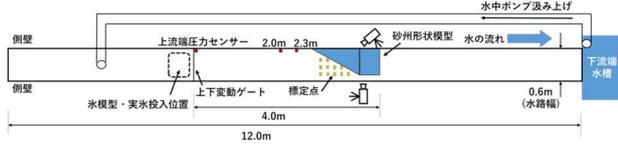


図-3 CaseC(漸縮角度 30°)実験水路の平面図

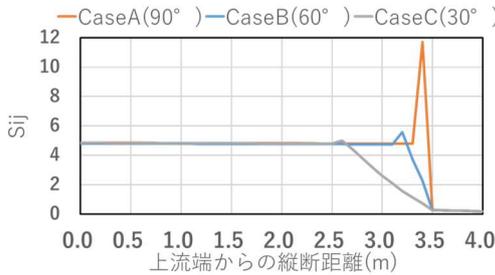


図-4 アイスジャムスケール S_{ij}

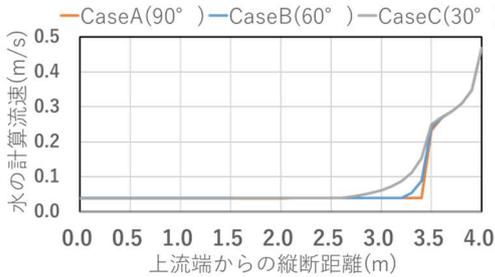


図-5 各 Case の計算流速

$$F_{ri} = \frac{U_i}{\sqrt{\frac{\rho_w - \rho_i}{\rho_w} g H_i}} \quad (2)$$

S_{ij} は、値が大きいほどアイスジャムが発生しやすい。ここで、 U_i (m/s)：実氷の速度、 U_w (m/s)：流速として、 U_i/U_w の値でアイスジャムの発生非発生を評価すると、アイスジャム発生時は $U_i = 0$ 、アイスジャム非発生時は $U_i = U_w$ となり、 U_i/U_w は、0～1 の範囲となる。本検討で用いている S_{ij} と U_i/U_w は、 $U_i/U_w = 1/(1 + S_{ij})$ の関係にある。 ρ_w (kg/m³)：水の密度で 1000、 ρ_i (kg/m³)：氷の密度で 917、 g (m/s²)：重力加速度で 9.8、 H_i (m)：実氷の厚さ、 B_i (m)：実氷の幅、 L_i (m)：実氷の河川縦断方向の長さ、 B_d (m)：下流の水路幅である。既往研究⁴⁾と同様に、 C_D ：形状抵抗係数は 0.4 を与え、 C_f ：摩擦抵抗係数は 1.0 を与え、 C_L ：揚力係数は 0.4 を与えた。

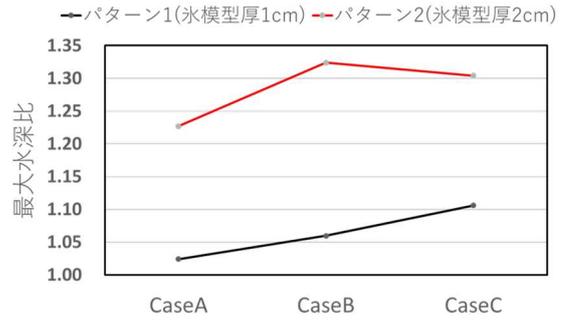


図-6 氷模型実験の各最大水深比

アイスジャムによる被害を防ぐための一つの方法として、事前にアイスジャム発生危険箇所を把握した上で、気象データを注視しながら現場状況を監視する方法が考えられる。実験水路の砂州形状模型より上流を対象に、河床高と水路幅を用いてアイスジャムスケールを求めて、アイスジャム発生危険箇所に関する検討を行った。

CaseA, B, C のアイスジャムスケール S_{ij} を図-4 に示す。X 軸の縦断距離は 0.0m が上下変動ゲート地点であり、4.0m が 50cm×50cm×50cm 砂州形状模型の下流端である。計算の縦断距離間隔は 0.1m おきとした。平均河床高は実験水路に勾配をつけなかったため全区間 0m、マンニングの粗度係数は 0.04(s/m^{1/3})とし、総計算時間 86400(s)とした。

計算結果として、CaseA は上流 3.3m から S_{ij} が上昇し、3.4m 地点では S_{ij} が 11.714 になった。CaseB は上流 3.1m から S_{ij} が上昇し、3.2m で 5.571 になった。CaseC は上流 2.5m から S_{ij} が上昇し、2.6m で 5.003 になった。CaseA, B, C ともに水路幅が漸縮し始める地点の 0.1m 上流のアイスジャムスケール S_{ij} が最大になった。3つの S_{ij} の値の大小に関しては、漸縮し始める水路幅の変化量に応じて、各 Case の最大値が決まると推察する。CaseA の上流 3.5m 箇所は川幅が 0.1m であり、CaseB の上流 3.3m 地点の川幅が 0.433m であり、CaseC の上流 2.7m 地点の川幅は 0.549m である。

各 Case の計算流速の計算を図-5 に示す。CaseA と CaseB, CaseC を比較すると、なだらかに水路幅が漸縮する CaseC は、急激に水路幅が漸縮する CaseA に比べて計算流速が速い。

4. 氷模型実験の結果

氷模型実験は CaseA のパターン 1, 2 を各 3 回、CaseB のパターン 1, 2 を各 3 回、CaseC のパターン 1, 2 を各 3 回の計 18 回の実験を行った。実験は全てアイスジャムが発生し、初期水深より水深が上昇した。実験結果を図-6 に示す。黒い実線がパターン 1 の氷模型厚 1cm であり、赤い実線がパターン 2 の氷模型厚 2cm になる。

パターンでの比較は、全ての Case がパターン 1 より 2 の方が最大水深比は高くなっている。その要因としては、パターン 2 はポリプロピレンを 2 つ重ねたものであり、パターン 1 よりも氷模型厚さがある。そのためアイスジャムが発生した際に、通水面積が小さくなり流水を塞

ぐ面積が多くなるため最大水深比が上昇したと考えられる。

Case での比較は、CaseA より CaseB, C の方が最大水深比はパターン 1, 2 ともに高くなっている。その要因としては、アイスジャムが発生した際の詰まる状態が関係している。CaseA は狭窄部に詰まると上流から流下してきたポリプロピレンが上流 3.5m の左側の横断方向に滞留する。CaseB, C は CaseA と違い三角柱を設置させたので詰まったものより上流のポリプロピレンの行き場がなくなり、下流方向に流下するため、CaseA に比べ狭窄部に堆積する氷模型量が多くなり、最大水深比が高くなったと推察できる。

5. 実氷実験の結果

実氷実験は各 Case2 回の合計 6 回実施した。CaseA-1 の実氷個数は 16 個、平均長辺は 10.8cm、平均短辺は 8.1cm、平均実氷厚は 2.2cm、合計質量が 1902g。CaseA-2 の実氷個数は 11 個、平均長辺は 12.0cm、平均短辺は 8.1cm、平均実氷厚は 2.2cm、合計質量が 1907g。CaseB-1 の実氷個数は 9 個、平均長辺は 14.9cm、平均短辺は 11.1cm、平均実氷厚は 2.4cm、合計質量が 1892g。CaseB-2 の実氷個数は 9 個、平均長辺は 14.1cm、平均短辺は 11.1cm、平均実氷厚は 2.5cm、合計質量が 1896g。CaseC-1 の実氷個数は 17 個、平均長辺は 12.1cm、平均短辺は 7.9cm、平均実氷厚は 2.1cm、合計質量が 1873g。CaseC-2 の実氷個数は 15 個、平均長辺は 12.1cm、平均短辺は 8.7cm、平均実氷厚は 2.0cm、合計質量が 1917g であった。

実氷速度は、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 解析により算出した。解析格子サイズは、CaseA, B, C ともに 52×52pixel とした。速度結果を出す際に透明である実氷の判別が難しく、流水を計測してしまう可能性を加味し、検査領域内の相関係数 0.9 よりも小さいものを過誤ベクトルとして算出し、ベクトルを除去した。解析の範囲は、上流 3.5m 地点の水路幅 0.1m になる箇所から 0.01m 上流の 3.49m 地点から 3.39m 地点である。速度の算出方法は、計算間隔の時間を 30FPS で行ったため、30 データを平均化させて速度を算出した。

Case ごとの経時水深比・実氷速度を図-7 から図-12 に示す。実氷実験は全てアイスジャム現象が発生した。実氷が狭窄部に詰まってから全ての実氷が上流 3.5m 地点の狭窄部を流下する時間は CaseA-1 が 86 秒間、CaseA-2 が 201 秒間、CaseB-1 が 90 秒間、CaseB-2 が 179 秒間、CaseC-1 が 65 秒間、CaseC-2 が 66 秒間であった。

CaseA-1 の図-7 より 73 秒に 0.087m/s で実氷が流下しアイスジャムが発生し始め、その後速度がゼロに近づき水深比が上昇し始める。121 秒に詰まっていた実氷が融解され水路床へ実氷が潜り、その上を上流に堆積していた実氷が 0.048m/s で流下した。156 秒に上流 3.5m 地点で詰まった実氷より上流に位置する実氷が 0.046m/s で流下し、その後、詰まっている実氷も流下しアイスジャムは解消された。163 秒に 3.2m 地点で最大水深比 1.079 を計測した。

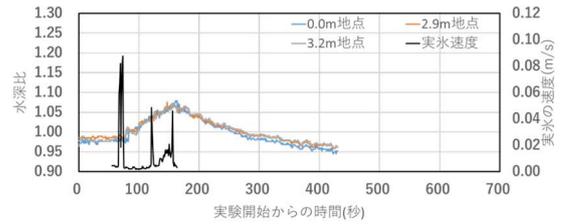


図-7 CaseA-1 経時水深比・実氷速度

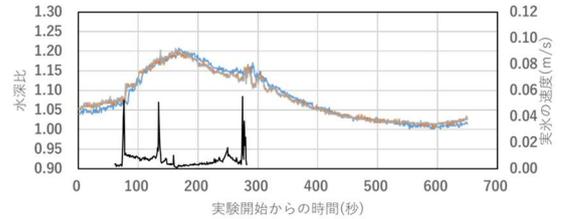


図-8 CaseA-2 経時水深比・実氷速度

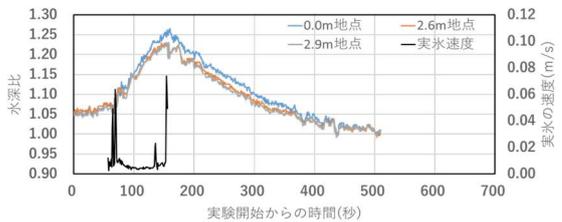


図-9 CaseB-1 経時水深比・実氷速度

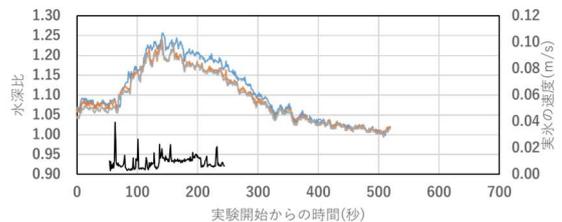


図-10 CaseB-2 経時水深比・実氷速度

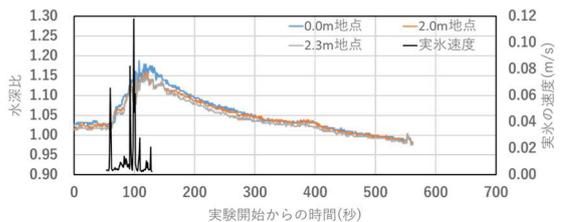


図-11 CaseC-1 経時水深比・実氷速度

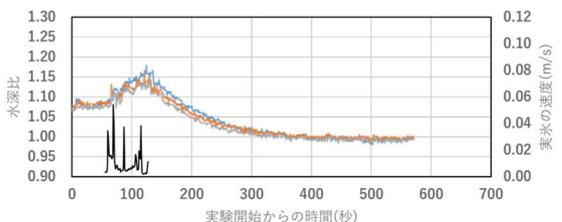


図-12 CaseC-2 経時水深比・実氷速度

CaseA-2 の図-8 より 76 秒に 0.053m/s で実氷が流下しアイスジャムが発生し始め、その後速度がゼロに近づき水深比が上昇し始める。134 秒に詰まっていた実氷が 0.051m/s で流下する。168 秒に 3.2m 地点で最大水深比 1.208 を計測した。その後、287 秒で実氷が流下しアイ

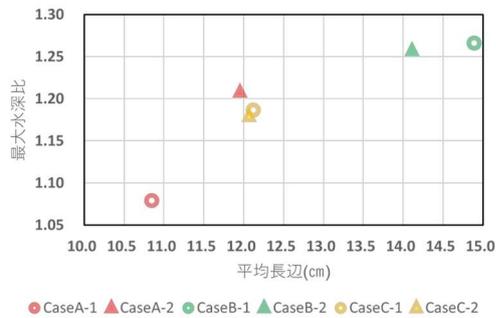


図-13 最大水深比と平均長辺

スジャムが解消された。

CaseB-1の図-9より65秒に0.049m/s, 69秒に0.064m/sで実氷が流下し70秒にアイスジャムが発生し始め, その後速度がゼロに近づき水深比が上昇し始める。135秒に上流の実氷が流下し, 実氷が折り重なるように滞留する。154秒に0.074m/sで流下し, 3.2m地点で最大水深比1.266を計測した。その後, 156秒で実氷が流下しアイスジャムが解消された。

CaseB-2の図-10より63秒に0.039m/sで実氷が流下しアイスジャムが発生し始め, その後速度がゼロに近づき水深比が上昇し始める。101秒に上流に位置した実氷が漸縮部の実氷に潜り込む。138秒に上流3.5m地点で詰まっている実氷が流下し, 142秒に3.2m地点で最大水深比1.257を計測した。その後, 243秒で実氷が流下しアイスジャムが解消された。

CaseC-1の図-11より60秒に0.066m/sで実氷が流下しアイスジャムが発生し始め, その後速度がゼロに近づき水深比が上昇し始める。99秒にアイスジャムが起こしていた実氷が0.118m/sで一気に流下した。108秒に3.2m地点で最大水深比1.187を計測した。その後, 127秒で実氷が流下しアイスジャムが解消された。

CaseC-2の図-12より60秒に0.035m/s, 69秒に0.054m/sで実氷が流下し70秒にアイスジャムが発生し始め, その後速度がゼロに近づき水深比が上昇し始める。87秒に詰まっていた実氷が融解され河床へ実氷が潜り, その上を上流に堆積していた実氷が0.037m/sで流下した。115秒に流下し小さい実氷が詰まる。124秒に3.2m地点で最大水深比1.179を計測した。その後, 128秒で実氷が流下しアイスジャムが解消された。

結果として, 最大水深比はCaseB及びCaseCは各2回の実験で同等の値であった。CaseAは最大水深比が1.079と1.208と値に差がある。その要因としては, 図-7の平均長辺がCaseA-1は10.8cm, CaseA-2は12.0cmであり, CaseA-1の実験平面映像から, 水路の0.1mを通過してしまう10cm以下の実氷が10cm以上の実氷よりも先に流下してしまったため, アイスジャムが発生した際の実氷滞留量がCaseA-2よりも少なくなり, またアイスジャム発生時の実氷滞留厚が小さくなったと推察する。

実氷の速度の傾向は見出せなかった。要因としては, 実氷の作製方法と考える。実氷は急速に凍らせると水中の空気も取り込んだまま凍ってしまい, 白くなる。そうになると速度解析の際に実氷と流水の判別はしやすいが,

アイスジャムが発生した時に融解速度が高く実験結果にばらつきができてしまう。実河川は気泡のない透明な氷であり, 融解がしづらいものである。実河川の再現性を高めるのであれば, 同一量の気泡が入った実氷を使用するか, 透明な実氷を作製するべきである。

各最大水深比はCaseA-1が1.079, CaseA-2が1.208, CaseB-1が1.266, CaseB-2が1.257, CaseC-1が1.187, CaseC-2が1.179であった。平均長辺と最大水深比を図-13に示す。平均長辺と比例して最大水深比が高くなり, 漸縮角度による違いは明確ではない。

6. まとめ

漸縮部でアイスジャムスケール S_{ij} が高い値を示し, アイスジャム実験においてもその地点でアイスジャムが発生した。アイスジャムスケール S_{ij} の妥当性が確認できた。一方で, 最大水深比とアイスジャムスケール S_{ij} の比例関係は明らかにならなかった。

氷模型実験では, 氷模型厚を大きくするとアイスジャムが発生した際に, 流水を塞ぐ面積が多くなるため最大水深比を高くなると推察される。

実氷実験では, 最大水深比と関係がある値として実氷の平均長辺が挙げられた。さらに, 最大水深比を高くさせる条件として, 通水面積が小さくなることが考えられ, アイスジャム発生危険箇所の流速が速いほど実氷同士が集積する状況が考えられる。漸縮部でみると, 漸縮角度 90° よりも 30° の方が流速は速い。

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_1339I_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2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) 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, 水工学論文集, 第76巻2号, pp.I_169-I_174, 2020.
- 7) 山田隆司, 吉川泰弘, 小池太郎: 実氷の枚数と形状が堰周辺のアイスジャム現象に与える影響, 土木学会, 年次学術講演会講演概要集, 第75回, 2-238, 2020.