

橋脚部におけるアイスジャム実験と再現計算

ICE JAM EXPERIMENT AND SIMULATION AROUND BRIDGE PIERS

吉川泰弘¹・横山洋²・伊波友生³

Yasuhiro YOSHIKAWA, Hiroshi YOKOYAMA and Yu INAMI

¹正会員 博(工) 北見工業大学准教授 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)

²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)

³正会員 修(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)

This study aimed to clarify the phenomenon of ice jams generated around bridge piers. The one-dimensional ice jams calculation model was proposed. This model is composed of water flow, ice flow and ice jams. In order to check the accuracy of this model, we conducted an ice jam experiment. The section of this experiment waterway is compound cross-section. The time series phenomenon of ice jams generated around bridge piers was able to be investigated in the experiment. This calculation model was able to simulate water level variation by ice jams. In order to improve calculation accuracy, we understood that it was important to consider the influence of ice jams on water flow appropriately in this model.

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

1. はじめに

冬期間である2018年3月9日, 季節外れの大雨と暖気によって, 北海道内の河川水位は急激に上昇し各地で被害をもたらした。石狩川水系辺別川では護岸工事中に現場代理人が流され死亡し, 沙流川では取水堰において車両3台流出する被害が起きた。浸水被害は, 床上浸水28件, 床下浸水61件あり, 災害は北海道全域に広がった¹⁾。冬期間の北海道河川は, 気温低下により河氷が形成されて結氷する。春先になると, 気温上昇により河氷は解氷されて下流へと流下する。流下する河氷が河道内で堆積するとアイスジャムとなり, 上流では水位が急激に上昇して氾濫し, 下流では水位が急激に低下する。さらにアイスジャムが解消されると, 下流へと多量の河氷が流下して被害を拡大させる。3月9日に発生した多くの災害は, 現地観測の結果, アイスジャム現象により引き起こされたことが分かっており, アイスジャム発生場所として, 河道内砂州, 勾配変化点, 河川構造物(橋梁), 本川合流点が上げられている²⁾。今後, 同様の気象条件となり, 同じ災害を引き起こす可能性があるため, アイスジャム現象の解明が急務となっている。

北海道全域で同時多発的に発生した「2018年3月北海道アイスジャム災害」は, 前例がなかったため, 現場では「何が起きたのか把握できなかった」との声が聞かれる

のと同時に, 発生時期, 発生場所に関する知見が望まれている。「発生時期」に関しては, 河氷が解氷した後にアイスジャムが発生するため解氷時期を推定すれば良い。既往研究³⁾では, 気温等を入力値として計算できる氷板厚において, この氷板厚が減少する時期に解氷現象が起こる可能性が高いことが示されている。「発生場所」に関しては, 河道内砂州のため低水路内の水面幅が狭くなっている場所や勾配変化点により流速が遅くなるような場所を対象にした既往研究⁴⁾がある。支川合流に関する既往研究⁵⁾では, 支川合流の影響により本川の水位が上昇し流速が遅くなりアイスジャムが発生しやすいという知見が得られている。また, 下流が完全に結氷している場所におけるアイスジャム現象を対象にした既往研究⁶⁾がある。一方で, 前述の河川構造物(橋梁)におけるアイスジャム現象に関しては, 十分には研究が実施されていない。アイスジャム現象を時間的空間的に理解する手法としては, 数値計算モデルが有効である。Carsonら⁷⁾は, 7つのアイスジャム数値計算モデルの検証を実施しているが, 橋脚部での現象は十分に研究されていない。

本研究は, 橋梁の橋脚部におけるアイスジャム現象を解明するために, アイスジャム計算モデルを構築して, 低水路と高水敷を設定したアイスジャム実験を実施し, アイスジャム発生時の縦断的な水位変化を測定した。さらに, アイスジャム現象による水位上昇を本計算モデルで再現することを試みた。

2. アイスジャム計算モデル

本計算モデルは、水の流れ、アイスジャム現象も表現可能な氷の流れに関する1次元の基礎式で構成した。河水は大別すると、硬い氷板（固定されたものは氷板、流下するものは浮氷、流下する氷サイズが1m以上のものは氷盤）と軟らかい晶氷、氷板および晶氷上に存在する積雪に分けられる。本計算モデルでは、流下する浮氷を対象としている。本計算モデルの概念図を図-1に示す。なお、断面は矩形断面として扱った。

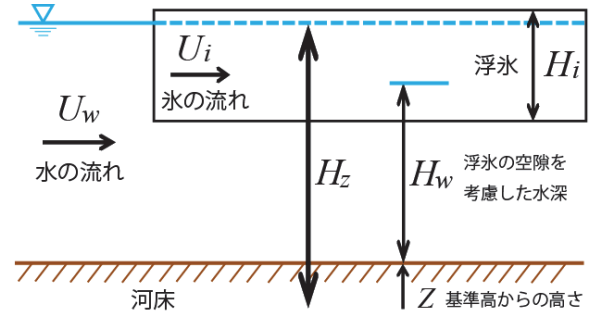


図-1 アイスジャム計算モデルの概念図

(1) 水の流れの計算

水の流れの基礎式は、次式の連続の式と運動の方程式を用いた。連続の式である式(1)の右辺第1項は、流下する浮氷の増減によって、浮氷の空隙を流れる流水面積の増減を表している。言い換えると、氷とともに運ばれる水の増減である。

$$\frac{\partial A_w}{\partial t} + \frac{\partial Q_w}{\partial x} = \lambda_i \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial A_i}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q_w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_w^2}{A_w} \right) + g A_w \frac{\partial H_z}{\partial x} + \frac{g n^2 U_w^2 S}{R^{1/3}} = 0 \quad (2)$$

A_w ：流積であり、水のみが流れる面積と浮氷の空隙箇所を流れる面積を足した値である。 A_i ：浮氷の断面積であり、氷と空隙を合わせた値である。 Q_w ：河川流量、 λ_i ：浮氷の空隙率であり、本実験の再現計算では試行錯誤の上、0.1を与えた。 ρ_w ：水の密度で1000.0kg/m³、 ρ_i ：氷の密度で917.4kg/m³、 t ：時間、 x ：距離、 U_w ：河川縦断方向の流水の速さ、 n ：Manningの粗度係数で本実験の再現計算では0.008s /m^{1/3}を与えた。 R ：径深、 S ：潤辺は、氷塊の厚さ H_i が後述する氷模型の厚さ0.6cmの2倍となった場合、完全結氷と仮定して算出した。

運動の方程式である式(2)の左辺第3項の $\partial H_z / \partial x$ は、水面勾配である。浮氷の存在により水位および水面勾配が変化し、流速が変化するとともに浮氷の速度を変化させるため、本計算モデルにおいて重要な値である。水位 H_z は、「河床高+浮氷の空隙を考慮した水深+浮氷の喫水深」として求めた。具体的な算出方法は、式(1)で求めた A_w を川幅 B で割り、浮氷の空隙を考慮した水深 H_w を求め、河床高 Z として、次式により水位 H_z を算出した。

$$H_z = Z + H_w + \frac{\rho_i}{\rho_w} (1 - \lambda_i) H_i \quad (3)$$

(2) 氷の流れの計算

浮氷の流れの基礎式は、次式の連続の式と河氷流下堆積式⁹⁾を用いた。

$$(1 - \lambda_i) \frac{\partial A_i}{\partial t} + \frac{\partial Q_i}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$Q_i = A_i U_i \quad (5)$$

$$U_i = U_w - \sqrt{\frac{\frac{B_i}{B_d} \left(\frac{\rho_w - \rho_i}{\rho_w} \right) g H_i}{\frac{C_D}{2} \left(\frac{H_i}{L_i} \right)^2 + C_f \left(\frac{H_i}{L_i} \right) + \frac{C_L}{2}}} \quad (6)$$

Q_i ：流下堆積する氷塊流量、 U_i ：河川縦断方向の氷塊の速さ、 B_i ：氷塊の横断方向の幅、 B_d ：対象断面より下流の川幅、 ρ_w ：水の密度、 ρ_i ：氷の密度、 g ：重力加速度、 H_i ：氷塊の鉛直方向の厚さ、 L_i ：氷塊の河川縦断方向の長さ、 C_D ：形状抵抗係数、 C_f ：摩擦抵抗係数、 C_L ：揚力係数である。

計算条件として、クーラン数0.005、計算区間断面10cmとした。また、試行錯誤を行い、 B_i と L_i は、その断面の川幅の値を与え、橋脚の影響として橋脚設置断面の川幅を0.3倍とし、氷塊の速さが流水の速さの0.5倍以下となった場合、氷塊の速さをゼロとして計算を実施した。なお、これらの値の妥当性について、今後、さらなる検討が必要である。

3. 橋脚部におけるアイスジャム実験と再現計算

(1) 実験水路、実験条件、測定項目

実河川で発生したアイスジャムにおいて、詳細な現地観測データが存在する2010年2月に渚滑川で発生したアイスジャム^{9),10)}を対象として、実験水路形状、流量、氷量、氷サイズを決定した。

実験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14m³/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

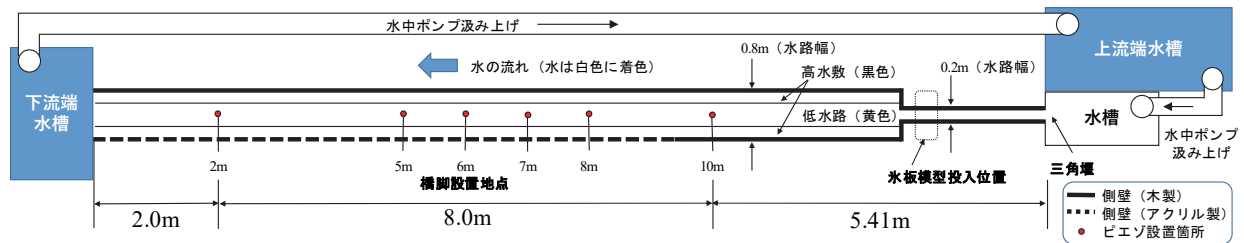


図-2 実験水路の平面図

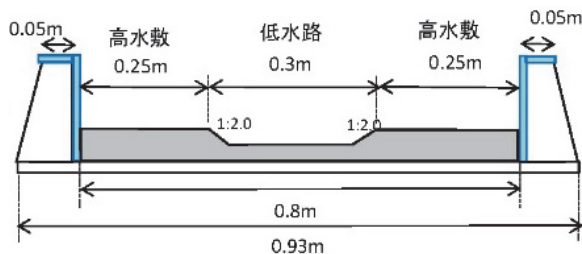


図-3 実験水路の標準断面図

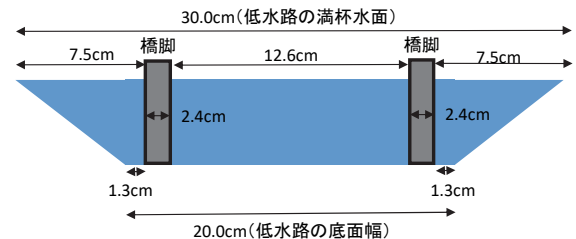


図-4 橋脚設置断面図(下流端から6m地点)

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-2に示し，標準断面を図-3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，低水路勾配1:2，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-2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-4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，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286m³/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，実験ではフルード相似則より1.4L/sとした。上流端流量は，下流端に設置した水槽から水中ポンプで上流の水槽（8.5m×1.5m×0.9m）へと汲み上げて，上流の水槽から水路に直結した水槽に汲み上げて三角堰からの越流させる構造とし，三角堰からの越流水深を用いて上流端流量を管理した。なお，本実験に先立ち容量式により流量の検定を実施した。

流水は，高水敷への冠水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。なお，本実験の総水量は8288Lである。着色した水の比重については，標準比重計（ピクノメーター）で比重を測定し，1.022の値であった。

氷量は，アイスジャム発生前の氷量60m³/sを参考にフルード相似により0.6L/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4cm×4cm，厚さ0.6cmとした。氷模型は，実河川の氷と同等の比重0.92であるポリプロピレンを用い，500枚作製した。氷模型速度をPTV解析により求めることを想定し，氷模型を判読しやすいように，氷模型の両面において，氷模型の全面を蛍光オレンジで着色し，両面に直径2cmの円形を設けて青色で着色した。氷模型投入位置は，図-2の下流端から13.5mの位置とした。氷模型の投入方法は，図-2の投入位置において，投入時間8秒で1秒当たり62.5枚の氷模型を人の手により投入した。

水位測定は，図-2示すように，低水路底面にピエゾ（圧力センサー，STS社製 ATM.1ST）を6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。なお，データロガーは，KEYENCE NR-600 スタンドアロン計測ユニットを用いた。水温は，実験前後で測定し，ともに14℃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 MarkII）1台を設置し，水路縦断距離6mの範囲を撮影した。

アイスジャム実験は，橋脚模型を設置しないケースと設置するケースの2ケース実施した。

(2) アイスジャム実験状況

水路上方より撮影したカメラ画像において，橋脚を設置した実験ケースの状況を図-5に示す。図-5(c)の17秒頃からアイスジャムが発生した。具体的には，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-5(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ている。その後，橋

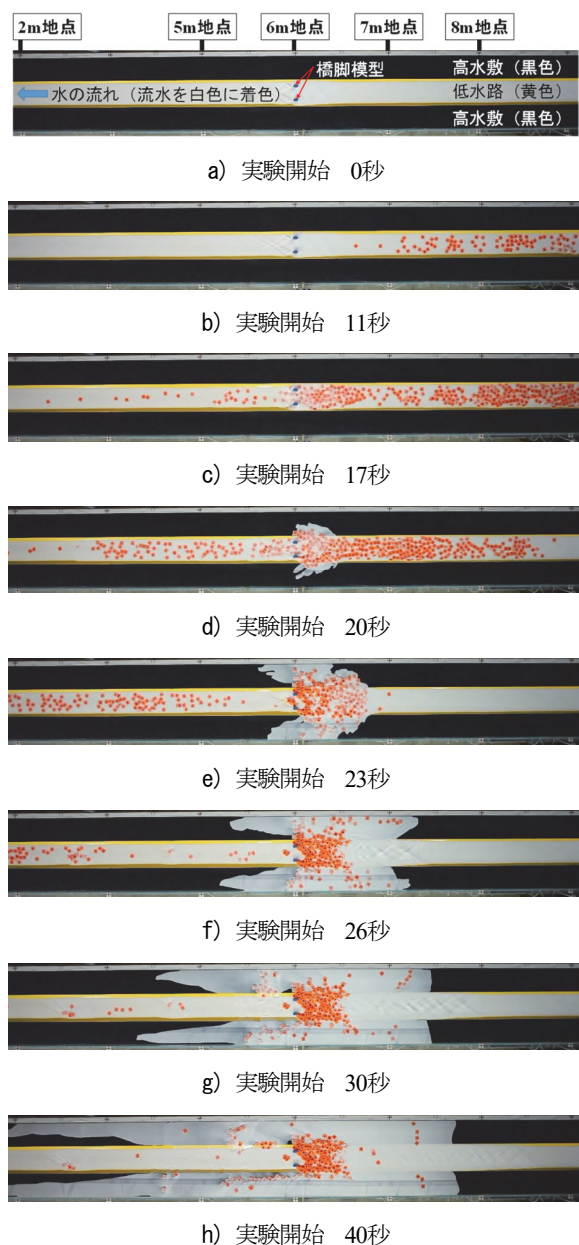


図-5 アイスジャム実験状況（平面画像，橋脚あり）

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面に堆積している．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約300枚，高水敷に堆積した枚数は約50枚であった．

(3) アイスジャム実験における水位変化

アイスジャム現象を理解する上で水位変化を把握することは重要である．実験時の水位変化において，橋脚を設置していないケースを図-6に示し，橋脚を設置したケースを図-7に示す．なお，図中の実験水位は0.2秒で移動平均した値を図示した．

図-6の橋脚なしのケースにおいて，8m地点の実験開始15秒で水位が下降している．カメラ画像をみると，上

流の約8.5m地点の実験開始14～15秒で氷模型が低水路内で堆積し，その後，実験開始16秒で堆積していた氷模型が塊となって下流へと流下している．8m地点の実験開始15秒で水位が下降した要因として，上流の約8.5mで氷模型が堆積し流水を堰き止めたため，下流の水位が下降したと推定できる．その後の水位上昇は，上流の約8.5mで堆積した氷模型が流下したため，下流の水位が上昇したと推定できる．約8.5m地点で氷模型が堆積した要因の一つとして，氷模型の投入は人の手によって実施しているため，水に影響を与えないように滑らかに均等に投入することが厳密にできなかったことが要因として考えられる．2.0m地点の実験開始約45秒で水位が上昇し，実験開始50秒で水位が下降している要因は，最下流端で氷模型が堆積したため水位が上昇し，その後，人の手によって氷模型を取り除き水位が下降したためである．

図-7の橋脚ありのケースにおいて，8m地点の実験開始約11秒で水位が下降している．カメラ画像をみると，上流の約9.0m地点の実験開始約11秒で氷模型が低水路内で堆積し，その後，実験開始12秒で堆積していた氷模型が塊となって下流へと流下している．8m地点の実験開始11秒で水位が下降した要因として，上流の約9.0mで氷模型が堆積し流水を堰き止めたため，下流の水位が下降したと推定できる．その後の水位上昇は，上流の約9.0mで堆積した氷模型が流下したため，下流の水位が上昇したと推定できる．約9.0m地点で氷模型が堆積した要因の一つとしては，前述の氷模型投入を人の手によって実施していることが考えられる．

図-7において，橋脚を設置している6m地点の実験開始16～17秒で水位が上昇し，実験開始23秒では水位が下降している．カメラ画像と図-5をみると，実験開始16～17秒で氷模型の堆積（アイスジャム）が始まり，実験開始23秒で氷模型が上流に弧を描くようにアーチ状にアイスジャムを形成し，下流へと流下する氷模型を減少させている．橋脚を設置している6m地点において，氷模型のアイスジャムにより水位が上昇するが，その後，氷模型がアーチ状に堆積することにより橋脚箇所での水位が下降したと推定できる．一方で，アイスジャムによる影響を受ける上流の7m地点では，実験開始約23秒から水位が上昇し，最大で約2.2cm水位が上昇している．

(4) アイスジャム現象の再現計算

実験値と計算値の水位変化において，橋脚を設置していないケースを図-6に示し，橋脚を設置したケースを図-7に示す．

図-6の橋脚なしのケースにおいて，10m地点の水位変化では，計算値は実験値を良く再現している．一方で，8m地点の実験開始15秒付近の水位変化において，計算水位は実験水位を再現していない．また，その後の7m地点，6m地点，5m地点，2m地点の計算水位のピーク値と実験水位のピーク値の位相がずれている．これらの要

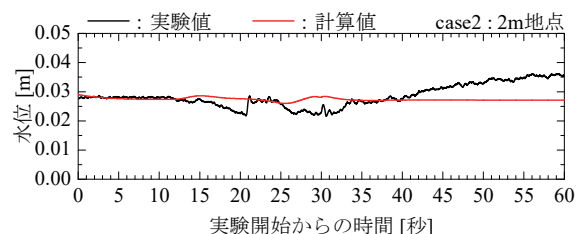
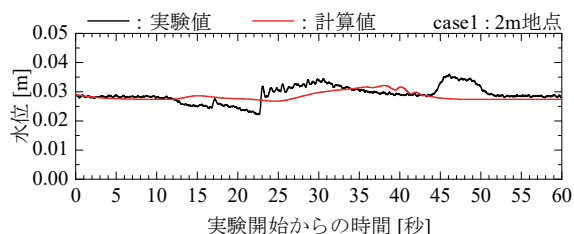
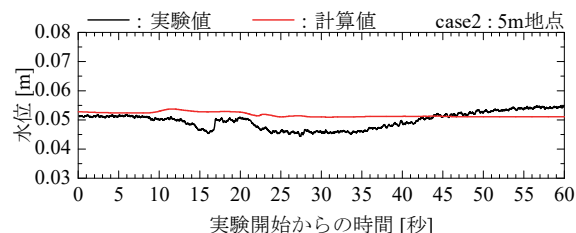
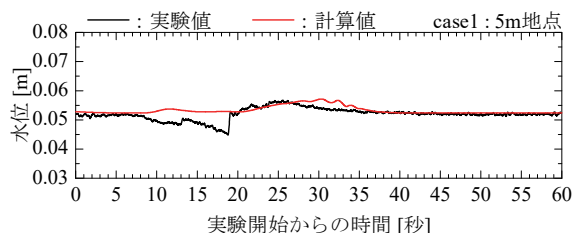
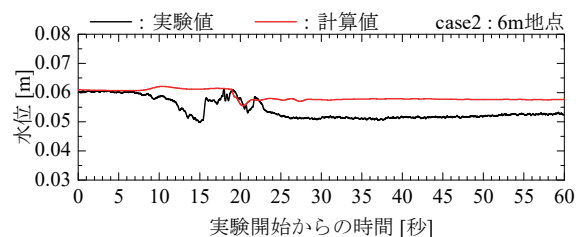
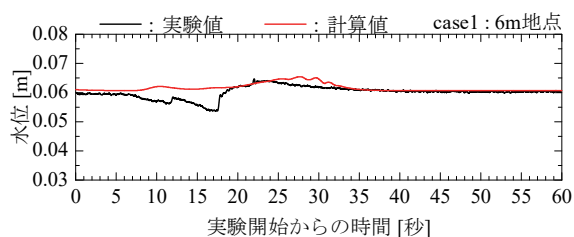
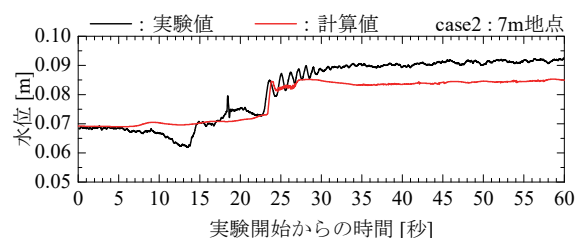
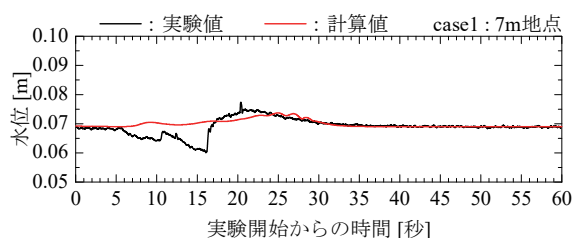
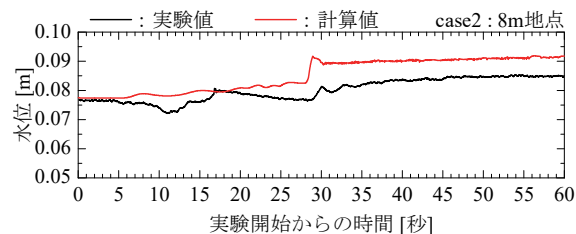
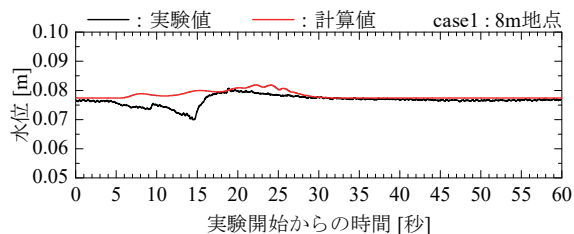
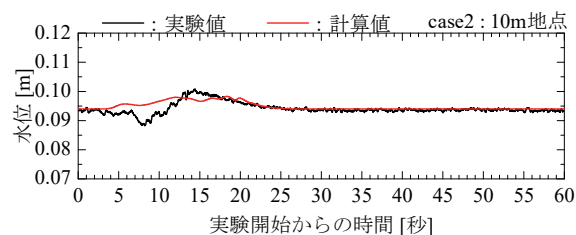
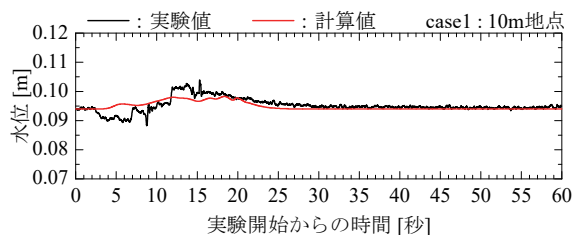


図-6 実験値と計算値の水位の比較（橋脚なし）

図-7 実験値と計算値の水位の比較（橋脚あり）

因として、前述の氷模型投入方法の影響が考えられる。実験開始0秒と実験開始60秒の全ての地点の水位をみると計算値は実験値を良く再現していることが分かる。

本検討により、本計算モデルは氷の流下現象による水位変化を再現できる可能性を示した。

図-7の橋脚ありのケースにおいて、10m地点の水位変

化では、計算値は実験値を良く再現している。8m地点の実験開始29秒以降の下流のアイスジャムに伴う水位変化において、計算値は実験値よりも高い。実験では高水敷に氾濫して水位上昇が抑えられるのに対して、計算では高水敷を考慮していないため、水位が実験よりも上昇したためと考えられる。7m地点の実験開始30秒以降の

アイスジャムに伴う水位変化において、計算値は実験値よりも低い。一方で、6m地点と5m地点では、計算値は実験値よりも高い。要因の一つとして、本計算モデルの水の流れの基礎式において、アイスジャムが流水へ与える影響、言い換えるとアイスジャムの抵抗を小さく見積もっていることが考えられる。方法としては、アイスジャム発生地点ではManningの粗度係数の値を高くするなどの方法が考えられる。2m地点の実験開始40秒以降の水位変化において、計算値は実験値よりも低い。実験では上流においてアイスジャムにより高水敷に氾濫した流水が橋脚を迂回して下流の低水路に流入し水位を上昇させるのに対して、計算では高水敷を考慮していないため、水位が実験よりも下降したと考えられる。

本検討により、本計算モデルでアイスジャム発生箇所より上流の水位上昇と下流の水位下降を再現できることを示した。一方で再現性を高めるためには、計算モデルの基礎式においてアイスジャムが流水へ与える影響を適切に評価すること、高水敷を考慮することが上げられた。

4. まとめ

橋脚部におけるアイスジャム現象を解明するために、アイスジャム計算モデルを構築して、低水路と高水敷を設定したアイスジャム実験を実施し、アイスジャムによる水位変化において計算値と実験値の比較を実施した。本研究により以下のことが分かった。

アイスジャム実験の結果、橋脚外側の流速の遅い箇所から氷模型の堆積が始まり、上流に弧を描くようにアーチ形状に氷模型が堆積し、アイスジャムが形成された。アイスジャムの影響により高水敷および低水路法面に氷模型が堆積することが分かった。水位変化は、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ことが分かった。上流にいくほどアイスジャムの影響は小さくなる。アイスジャム発生地点よりさらに下流にいくと、高水敷に乗り上げた流水が再び低水路内に流入するため水位が上昇する。本実験により、橋脚部におけるアイスジャム現象を把握することができた。

アイスジャム計算モデルによる計算水位と実験水位の比較から、橋脚なしのケースでは、本計算モデルは氷の流下現象による水位変化を再現できることを示した。橋脚ありのケースでは、本計算モデルでアイスジャム発生箇所より上流の水位上昇と下流の水位下降を再現できることを示した。一方で再現性を高めるためには、計算モデルの基礎式においてアイスジャムが流水へ与える影響を適切に評価すること、高水敷を考慮することが上げら

れた。

本研究成果は、冬期間の河川工事の安全性の確保、アイスジャムの発生時期と発生場所の把握、水位上昇量の予測、気候変動による影響の定量的評価の検討資料に資する。

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) 北海道危機対策課：3月8日から9日にかけての大雨と融雪等による被害状況等(第2報), http://www.pref.hokkaido.lg.jp/s_m/ktk/higaiho2_20180308_ooame.pdf (閲覧日：2019年4月1日)
- 2) 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.
- 3) Yasuhiro YOSHIKAWA, Yasuharu WATANABE, Akashi ITOH : A SIMPLE EQUATION FOR ICE SHEET THICKNESS AND ICE FORMATION/BREAKUP PREDICTION, Journal of JSCE, Vol.2, pp.203-213, 2014.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 横山洋, 吉川泰弘, 矢部浩規：完全結氷地点におけるアイスジャム発生条件, 国土交通省, 北海道開発技術研究発表会, 第61回, 防災-9, 防32(治), 2018.
- 7) Carson,R., Groeneveld,J., Healy,D., She,Y., Malenchak,J., Morris,M., Saucet,J.P., Kolerski,T., Shen,H.T. : Tests of Numerical Models of Ice Jams - Phase 3, 14th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, 2007.
- 8) 吉川泰弘, 朴昊澤, 大島和裕, 横山洋：寒冷地河川における簡易的なアイスジャム計算モデルに関する検討, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, pp.I_351-I_356, 2018.
- 9) 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.
- 10) 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.

(2019. 4. 2受付)