

寒冷地河川における平面2次元河氷変動計算モデルの開発

北見工業大学 地域未来デザイン工学科
寒地土木研究所

吉 川 泰 弘
横 山 洋

寒冷地河川における平面2次元河氷変動計算モデルの開発

Development of 2-dimensional river ice calculation model on ice-covered rivers

吉川 泰弘¹・横山 洋²

¹ 北見工業大学 准教授

² 寒地土木研究所 主任研究員

要 旨

本研究の最終目的は、アイスジャム現象を解明して定式化し、平面2次元河氷変動計算モデルを開発し、iRICソフトウェアのソルバーとして組み込むことである。アイスジャム現象に至るまでの現象を区分すると以下となる。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河氷の流下、⑦河氷の堆積。今年度の研究内容は、②の河氷の破壊現象を明らかにするために現地観測を実施。③④について、著者らが導いた河氷流下堆積式の妥当性を現地観測結果との比較により確認。③④⑤⑥について、これらの現象を再現可能な実験を実施。なお、①と②の融解については、既往研究により河氷の形成と融解までの現象を再現できる計算式が提案され、現地観測結果の比較から妥当性の確認がなされている。本研究の結果、以下の事が明らかとなった。・著者らが導いた河氷流下堆積式を用いることにより、辺別川のアイスジャム発生地点を抽出できることを示した。河氷流下堆積式は、実河川で適用できる可能性を示した。・河氷の破壊の現象を明らかにするために、辺別川で現地観測を実施した。現地観測の結果、気温上昇と日射の影響により融雪が促されて流量および水位が上昇し、水位上昇の影響により河氷が破壊されて解氷に至る現象が予見された。今後、観測データの解析を進める予定である。・河氷の流下、堆積（アイスジャム）、決壊、流下の現象を対象に、実氷を用いたアイスジャム実験を実施した。実験の結果、実氷の流下、堆積に加えて、アイスジャムの決壊、流下現象を水理実験で再現することが出来た。今後、実験データの解析を進める予定である。・数値計算モデルに河氷流下堆積式を組み込み、その再現性を検討した。ポリプロピレン製の氷板模型を用いたアイスジャム実験を実施し、水位の実験値を得た。数値計算モデルによる水位の計算値との比較から、定性的に水位変動を再現可能であることを示した。一方で、河氷の空隙率、橋脚の影響の評価方法、氷塊がアーチ状になり固定される現象をどう表現するかなどの課題が明らかとなった。

《キーワード：結氷河川；アイスジャム；現地観測；数値計算；実氷》

1. はじめに

2018年3月9日の季節外れの大雨と暖気により、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、石狩川水系で6箇所、静内川水系で1箇所、網走川水系で2箇所、釧路川水系で2箇所の計11箇所に上る。被害は無いが氾濫危険水位を超過した箇所は、北海道全域で6箇所であった。3月9日に発生した災害は北海道全域に広がった。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」¹⁾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つたとの声も聞かれた。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。

一般に、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、上流では急激に水位を上昇させて氾濫し、下流では水位を低下させて取水障害を引き起こす。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。これらの現象を定量的に評価する手法として、数値計算モデルが有効である。本研究の目的は、アイスジャム現象を解明して定式化し、平面2次元河氷変動計算モデルを開発し、iRICソフトウェアのソルバーとして組み込むことである。

アイスジャム現象に至るまでの現象を区分すると以下となる。

- 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河氷の流下
- ⑦河氷の堆積（アイスジャム）

平成30年度の本研究助成で実施した内容は、②の河氷の破壊現象を明らかにするために現地観測を実施。③④について、著者らが導いた河氷流下堆積式²⁾の妥当性を現地観測結果との比較により確認。③④⑤⑥について、これらの現象を再現可能な実験を実施。なお、①と②の融解については、既往研究により河氷の形成と融解までの現象を再現できる計算式が提案され、現地観測結果の比較から妥当性の確認³⁾がなされている。

2. 河水流下堆積式の妥当性の確認（アイスジャム現象③④）

著者らが導いた河水流下堆積式²⁾は次式となる．

$$U_i = U_w - \frac{\frac{B_i}{B_d} \left(\frac{\rho_w - \rho_i}{\rho_w} \right) g H_i}{\sqrt{\frac{C_D}{2} \left(\frac{H_i}{L_i} \right)^2 + C_f \left(\frac{H_i}{L_i} \right) + \frac{C_L}{2}}} \quad (1)$$

U_i (m s^{-1}): 氷塊の速さ, U_w (m s^{-1}): 流水の速さ, B_i (m): 氷塊の横断方向の幅, B_d (m): 対象断面より下流の川幅, ρ_w (kg m^{-3}): 水の密度, ρ_i (kg m^{-3}): 氷の密度, g (m s^{-2}): 重力加速度, H_i (m): 氷塊の鉛直方向の厚さ, L_i (m): 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．式(1)を展開すると次式となる．

$$\frac{U_i}{U_w} = \frac{1}{1 + S_{ij}} \quad (2)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{F_{ri} \sqrt{\frac{B_d}{B_i} \sqrt{\frac{C_D}{2} \left(\frac{H_i}{L_i} \right)^2 + C_f \left(\frac{H_i}{L_i} \right) + \frac{C_L}{2}}}} \quad (3)$$

$$F_{ri} = \frac{U_i}{\sqrt{\left(\frac{\rho_w - \rho_i}{\rho_w} \right) g H_i}} \quad (4)$$

式(2)より, U_i/U_w は0から1の範囲であり, 0の場合, 氷塊の速さ U_i はゼロとなり, 氷塊が静止している状態のアイスジャム現象となる．一方で, 式(3)のアイスジャムスケール S_{ij} が大きくなるほど, 式(1)の U_i/U_w はゼロに近づくことが分かる．言い換えると, S_{ij} の値が大きいほど, アイスジャムの危険性が高くなることを示している．

ここで, 実験値との比較から妥当性が確認できている式(1)の河水流下堆積式において, 現地へ適応可能かの検証を実施した．具体的には, 2018年3月に辺別川で発生したアイスジャムの発生場所を S_{ij} で抽出できるかの検証を実施した．

辺別川の河床高と川幅については, 詳細な横断測量データを入手できなかった．このため, Google Earthの2014年6月25日の衛星データを用いて, 辺別川の9線橋から下流0.5km, 9線橋から上流1.5kmを対象に, 河床高と川幅を読み取った．図-2.1に衛星画像と検討区間を示し, 図-2.2に読み取った河床高と川幅を示す．なお, Google Earthでは, 直接的に河床高を読み取れない．本検討では, 水面で読み取れた標高を河床高と仮定し河床勾配を求めて下流端の標高を0mとして検討を進めた．

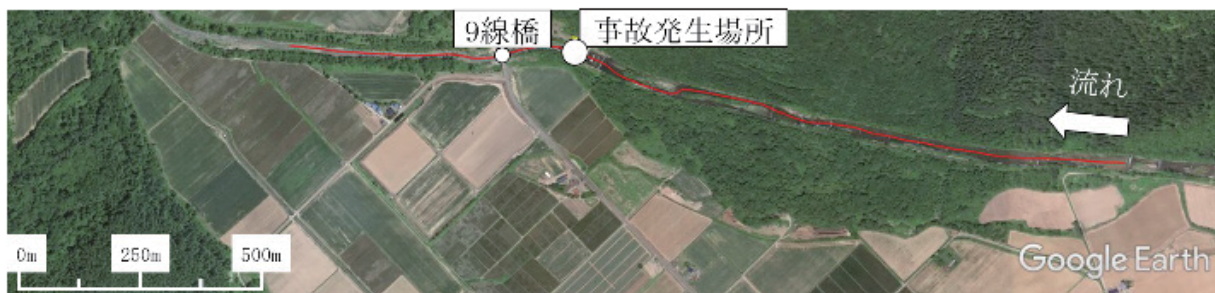


図-2.1 辺別川の衛星画像2014年6月25日と検討区間
(検討区間：赤線, 上方向：北, 流れ：右から左)

図-2.2の河床高をみると、縦断距離0.25km付近で急激な落差があり、上下流と比べて勾配変化点になっていることが分かる。なお、この地点に堰が設置されている。事故発生場所（縦断距離約0.16km）の川幅をみると、急激に狭くなっていることが分かる。本データから、事故発生場所は、勾配変化点の下流に位置し、川幅が急激に狭くなる場所であった。また、事故発生地点より上流の縦断距離約0.3kmから0.4km付近では、川幅が狭くなっている区間があり、この区間には砂州が形成されている。

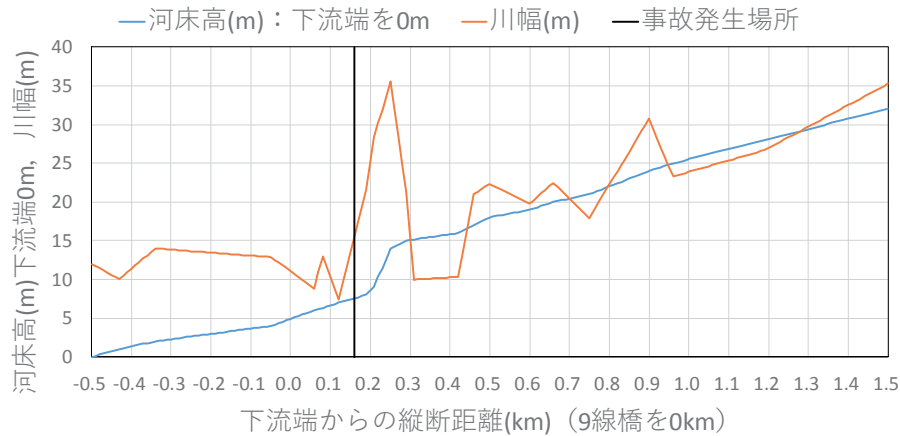


図-2.2 辺別川の河床高と川幅

S_{ij} の未知数は、 U_i 、 H_i 、 B_i 、 L_i である。本検討では、以下の手順により値を得た。上流端の流量は辺別川観測所の2018年3月8～10日の最大流量 $19.76\text{m}^3/\text{s}$ 、下流端水深は等流水深 0.59m とし、不定流計算を実施し、各断面の流速 U_w と水深 H_w を算出した。氷塊の速度 U_i は最大で流速 U_w になるため $U_i = U_w$ とし、氷塊の厚さ H_i は、水深が深いほど氷塊は堆積できる可能性が高いため、算出した水深を堆積可能な氷塊の厚さと仮定して $H_i = H_w$ とした。 B_i は、最大で川幅になるため、この断面（ B_d の一つ上流の断面）の川幅を与えた。 L_i は、任意に 10m を与えた。これらの値を代入して算出した S_{ij} を図-2.3に示す。図-2.3より、事故発生場所で S_{ij} の値が大きくなっていることから、実際のアイスジャム発生場所を S_{ij} で評価可能であることが分かる。一方で、事故発生場所より上流において、 S_{ij} の値が高い区間が3箇所ある。この区間は、砂州の形成により川幅が狭くなっている区間である。「氷と雪が一気に押し寄せてきた」との現地証言から、これらの上流3箇所のいずれかでアイスジャムが発生し、その後、アイスジャムが決壊して急激に下流へと流れ、事故発生場所で再度アイスジャムが発生した現象が推察できる。なお、事故後の事故発生場所において、多量の氷塊の堆積が現地で確認されている。本検討により、現地における既往成果の河氷流下堆積式の妥当性を確認した。

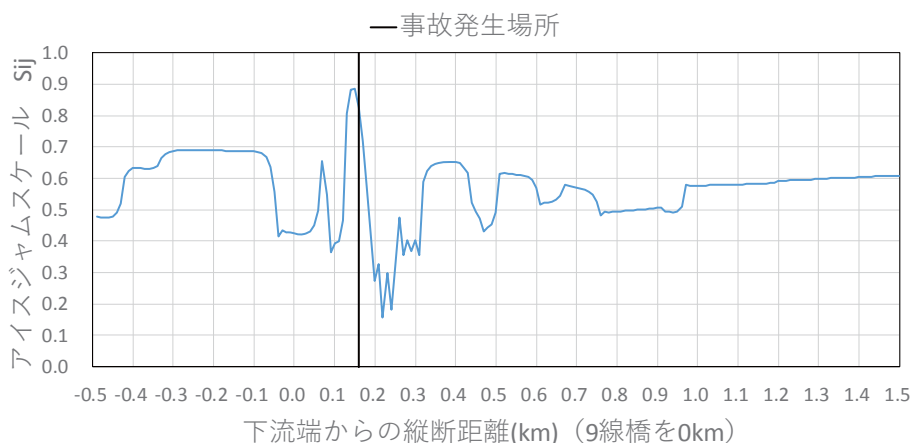


図-2.3 辺別川のアイスジャムスケール S_{ij}

3. 辺別川における現地観測（アイスジャム現象②）

2018年3月北海道アイスジャム災害において人災が発生した辺別川を対象に、河水の解氷現象の現地観測を実施した。観測期間は、2019年2月上旬から4月上旬であり、3月下旬現在、観測期間中となっている。主な観測項目は、カメラ、水位、氷温である。図-3.1に辺別川における機器設置場所を示す。



図-3.1 辺別川における機器設置場所

図-3.2に辺別川における機器設置状況を示す.



図-3.2 辺別川における機器設置状況

現時点では、速報になるが、観測対象区間の最上流部NO.1における氷温と気温の観測データを図-3.3に示し、縦断的な水位変動を図-3.4に示す。図-3.3より2019年2月25日に氷温度がプラスになっていることから、河氷が解氷したことが推定される。解氷前の2月24日をみると気温がプラスになっている。2月24日の気象庁の美瑛観測所の日照時間を見ると終日晴天であることが分かる。一方で、図-3.4より解氷前の2月24日に下流のNO.4,5,6において水位が上昇している。

一つの仮説として、2月24日の気温上昇と日射の影響により融雪が促されて流量および水位が上昇した。水位上昇の影響により河氷が破壊されて解氷に至ったと推察される。本観測より、河氷の破壊による解氷が観測された可能性が高い。今後、観測データの解析を進める予定である。

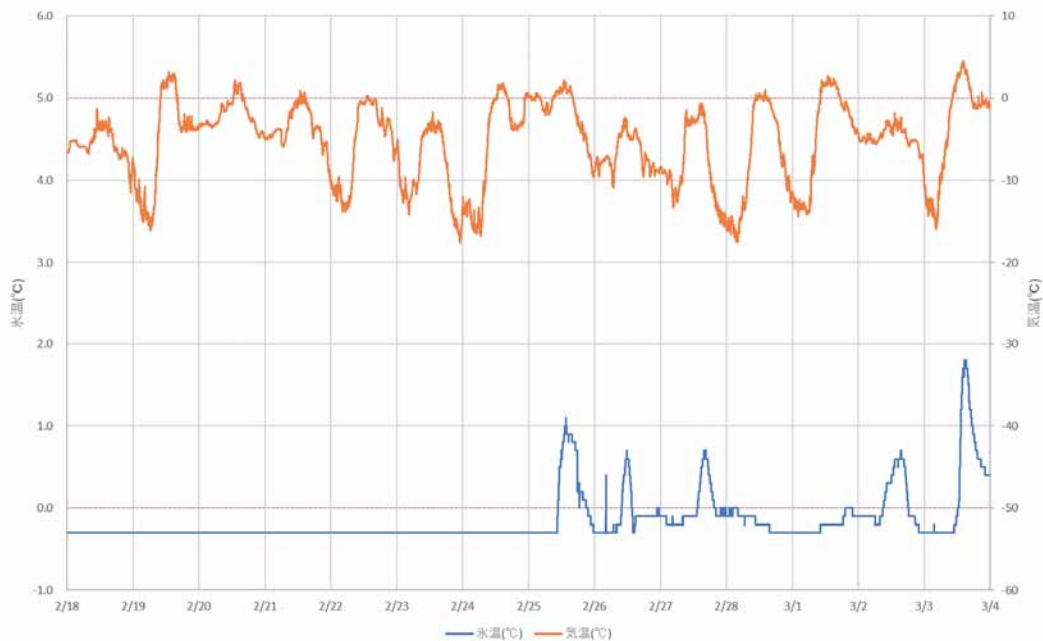


図-3.3 辺別川における氷温と気温 (2019年2月18日～3月4日)

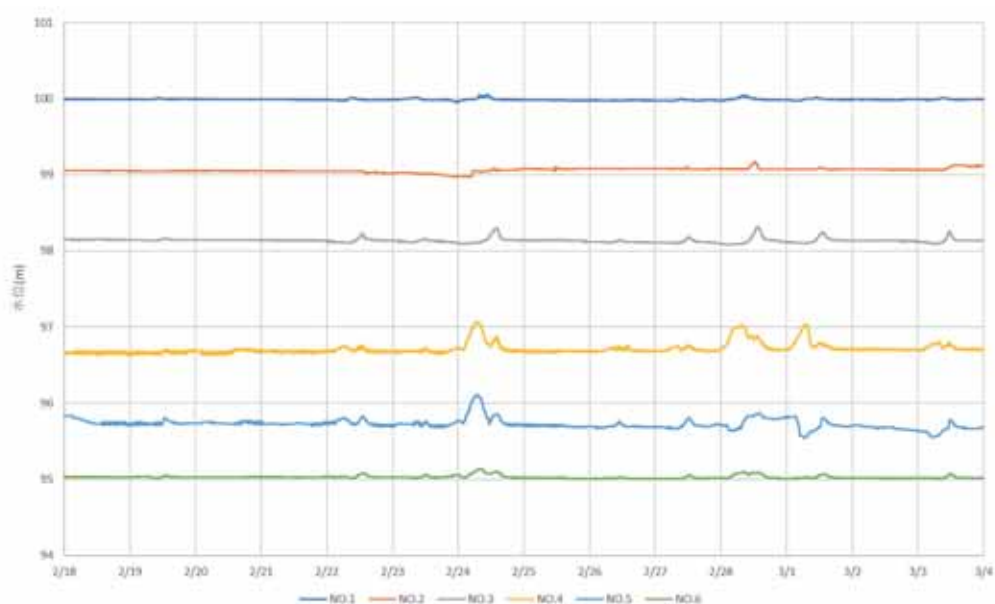


図-3.4 辺別川における水位変化 (2019年2月18日～3月4日)











4. アイスジャム実験（アイスジャム現象③④⑤⑥）

実氷を用いたアイスジャム実験を実施した。実験に先立ち、実氷の挙動を把握するために実氷の着色を試みた。2019年3月に実験を実施した。実氷のアイスジャムによる水位上昇を再現し、その後、実氷が融解してアイスジャムが決壊するまでの現象を実験で再現した。

(1) アイスジャム実験用の実氷の作製

実験時に判別しやすい実氷を作製するために、表-4.1に示す着色剤と濃度の条件で実氷を作製し、実際の実験条件に合わせて流水に浮かべて検証を実施した。氷のサイズは、4cm×4cm×0.6cmである。

表-4.1 実氷作製に用いる着色剤と濃度の条件

着色材	色	色見本	濃度										
			0.05%	0.10%	0.20%	0.25%	0.50%	0.75%	2.5%	5.0%	7.5%	10.0%	15.0%
墨汁	黒					○	○	○	○	○	○		
	朱					○	○	○	○	○	○		
入浴剤	橙									○		○	○
絵の具	黒					○	○	○		○			
	青					○	○	○		○			
	朱					○	○	○		○			
	橙					○	○	○		○			
食用色素	黒		○	○	○								
	青		○	○	○								
	橙		○	○	○								

墨汁（黒、朱）においては、濃度0.25%は、実氷の融解後も水は目立った着色は見られず、判別が容易であった。一方で、濃度0.50%、0.75%は、実氷を手で持つと手に色が付着し、さらに濃度2.5%、5.0%、7.5%では、水に入れると実氷の着色剤が溶出し、水が着色されて判別が困難であった。

入浴剤（橙）においては、全ての濃度で水に入れるとすぐに実氷の着色剤が溶出し、水が着色されて判別が困難であった。濃度10.0%と15.0%においては、実氷が完全に水没し水面に浮くことはなかった。

絵の具（黒、青、朱、橙）においては、濃度0.25%は、着色が薄く判別が困難であった。濃度0.50%～5.0%は、実氷を手で持つと手に色が付着し、水に入れると実氷の着色剤が溶出し、水が着色されて判別が困難であった。

食用色素（黒、青、橙）においては、全ての種類・濃度で、水に入れると実氷の着色剤が溶出し、水が着色されて判別が困難であった。

本検証の結果，墨汁濃度0.25%が最適であった．実氷の作製に当たっては，氷のサイズは，4cm×4cm×0.6cmにおいて，直径2cmの円を黒の墨汁で着色し，周囲を朱の墨汁で着色した．作製手順を写真-4.1，4.2，4.3に示す．



着色材製作（黒：0.25%）



着色材注入



冷凍庫で凍結



凍結後取り出し

写真-4.1 実氷の中央部作製



型取り材 (ミスターシリコン)



氷板模型敷き詰め作業



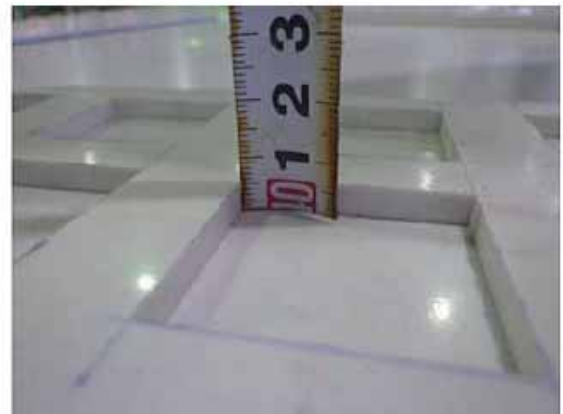
型取り材流し込み作業



氷板製作用型枠完成(20枚分)



氷板製作用型枠(40mm×40mm)



氷板製作用型枠(6mm)

写真-4.2 実氷の外枠型枠作製



着色材製作 (朱: 0.25%)



冷蔵庫保存



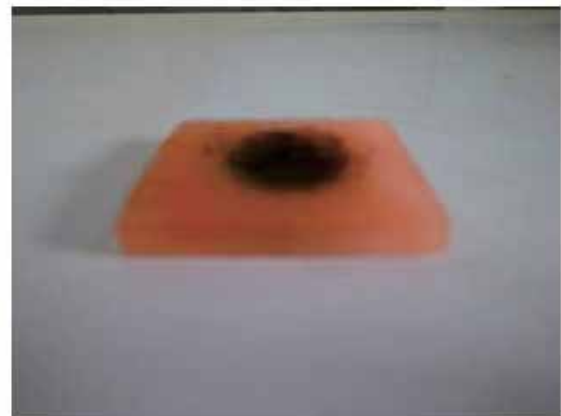
中央部 (内側) 配置



着色材注入



冷凍庫で凍結



実氷板完成

写真-4.3 実氷作製手順

(2) アイスジャム実験の実施

実験水路は、寒地土木研究所の実験棟に設置した図-4.1に示す水路を用いた。水路勾配1/120である。図-4.1の下流から6mの地点に図-4.2に示す橋脚2台を設置した。水位測定のために、水路底面に7箇所、ピエゾを設置した。

上流流量0.7L/sを流し、着色した実氷を500枚用意して上流から氷量を0.6L/sの条件で8秒間投入した。実験前水温は1.3℃、実験後水温は1.9℃であった。水路の高水敷に流水が冠水したかを判別するために、高水敷に白色の入浴剤（水溶性粉末）を散布した。

アイスジャム発生時の状況を図-4.3に示す。本実験は、実氷の流下、堆積に加えて、アイスジャムの決壊、実氷の流下現象を再現出来た。今後、実験データの解析を進める予定である。

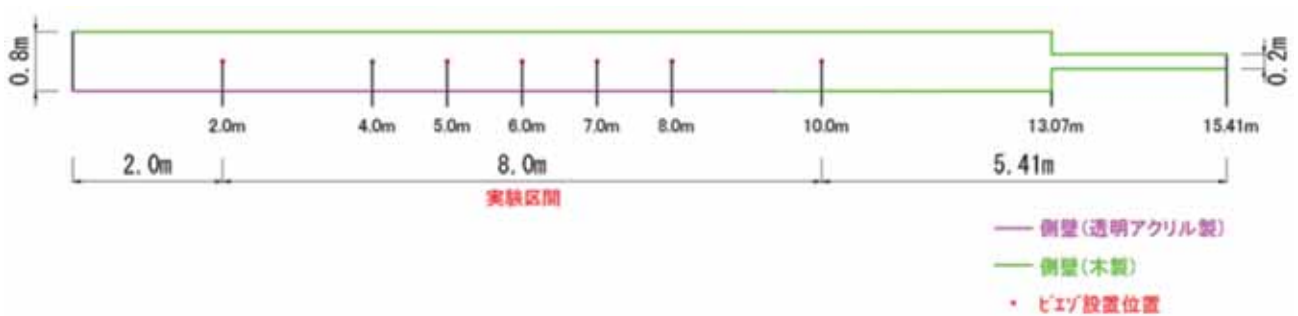


図-4.1 アイスジャム実験水路（流下方向は右から左）

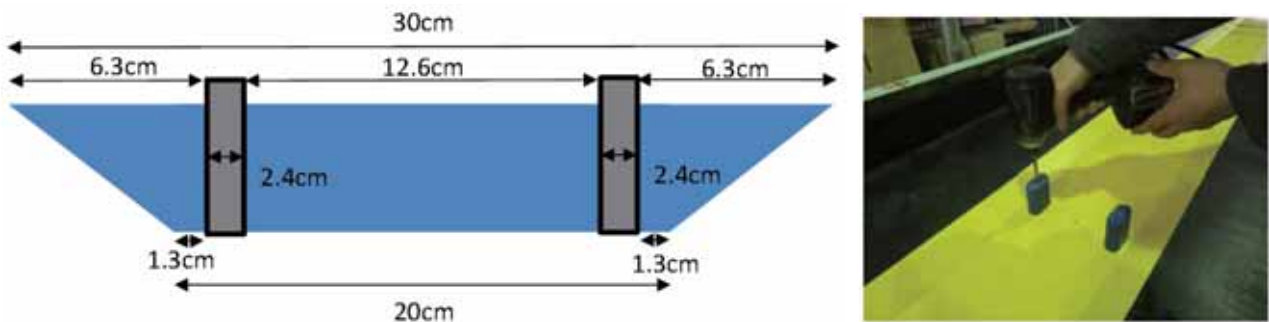


図-4.2 アイスジャム実験に用いた橋脚（下流から6m地点に設置）



図-4.3 アイスジャム発生時の状況（流下方向は右から左，黄色が低水路）

(3) 氷板模型を用いたアイスジャム実験と数値計算による再現

a) 実験水路, 実験条件, 測定項目

2010年2月に渚滑川で発生したアイスジャム^{4),5)}を対象として, 実験水路形状, 流量, 氷板量, 氷板サイズを決定した.

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 $14\text{m}^3/\text{s}$ およびアイスジャム発生区間KP11からKP20の横断データを用いた一般断面不等流計算結果から, 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, 低水路底面幅 20cm , 低水路満杯幅 30cm , 最大水路幅 80cm , 勾配は, $1/120$ を設定した. 実験水路を図-4.1に示す. 水路延長 15.41m , 低水路底面から高水敷面までの高さ 2.6cm , 低水路勾配 $1:2$, 高水敷幅 $25\text{cm}\times$ 左右2箇所とし, 水路下流端は段落ちを設けた. 橋脚模型として, 渚滑川の記念橋を参考に図-4.2に示す橋脚2本を図-4.2の下流端から 6m の地点に設置した. 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, 氷板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, アイスジャム発生前の流量 $14\text{m}^3/\text{s}$ より $1.4\text{L}/\text{s}$ 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 ($8.5\text{m}\times 1.5\text{m}\times 0.9\text{m}$) へと汲み上げて, 上流の水槽から別の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ている.

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.

氷板量は, アイスジャム発生前の氷板量 $60\text{m}^3/\text{s}$ より $0.6\text{L}/\text{s}$ とした. 氷板サイズは, アイスジャム発生後に河道に堆積していた氷板の最大の氷板サイズ 4m , 厚さ 0.6m の値から, 氷板サイズを $4\text{cm}\times 4\text{cm}$, 厚さ 0.6cm とした. 氷板模型は, 実河川の氷板と同等の比重 0.92 であるポリプロピレンを用い, 500 枚作製した. 氷板模型速度をPTV解析により求めるため, 氷板模型を判読しやすいように, 氷板模型の両面において, 氷板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. 氷板模型投入位置は, 図-4.1の下流端から 13.5m の位置とした. 氷板模型の投入方法は, 投入位置において, 投入時間 8 秒とし, 1 秒当たり 62.5 枚の氷板模型を投入した.

水位測定は, 図-4.1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7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°C 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 (CanonEOS Mark II) 1台を, 水路縦断距離 6m の範囲を撮影できるが角となるように設置した.

実験の結果, 流速が遅い橋脚の外側に氷板模型が滞留し, 橋脚を支点として上流に向けてアーチ形状となりアイスジャムが発生した. アイスジャム発生直後 (17 秒) から橋脚直上流 (No.5) の水位が上昇し, 最大約 2.2cm 水深が上昇した. アイスジャム発生後に, 橋脚上流の左右岸の高水敷において, 流水と氷板模型が乗り上げた. その後, 橋脚を迂回して流水と氷板模型が低水路内に戻り, 氷板模型の一部は低水路法面に堆積した. 氷板模型総投入枚数 500 枚に対して, アイスジャム約 300 枚, 高水敷約 50 枚の堆積が見られた.

b) 数値計算によるアイスジャム現象の再現

本計算モデルは、河川水の流れ、河氷の流れに関する計算式で構成し、断面は矩形断面とした。なお、本研究の最終目的は、平面2次元計算モデルの開発であるが、本年度は、河氷流下堆積式²⁾の妥当性を確認することを第一目標として、より簡便な1次元計算モデルを用いた。河氷は大別すると、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が、本計算モデルでは、流下する硬い氷盤を対象としている。

河川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(5)の右辺は、流下する河氷の増減によって、河氷の空隙を流れる流水面積の増減を表している。

$$\frac{\partial A_w}{\partial t} + \frac{\partial Q_w}{\partial x} = \lambda_i \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial A_i}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q_w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_w^2}{A_w} \right) + g A_w \frac{\partial H_z}{\partial x} + \frac{g n^2 U_w^2 S}{R^{1/3}} = 0 \quad (6)$$

A_w (m²) : 流積であり、水のみが流れる面積と河氷の空隙箇所を流れる面積を足した値である。 A_i (m²) : 河氷の断面積であり、氷と空隙を合わせた値である。 Q_w (m³ s⁻¹) : 河川流量, λ_i :河氷の空隙率であり、本実験では試行錯誤の上0.1を与えた。 ρ_w (kg m⁻³) : 水の密度で1000, ρ_i (kg m⁻³) : 氷の密度で917.4, t (sec) : 時間, x (m) : 距離, U_w (m s⁻¹) : 河川縦断方向の流水の速さ, n (s m^{-1/3}) : Manningの粗度係数, R (m) : 径深, S (m) : 潤辺は、氷塊の厚さ H_i が氷板模型の厚さ0.6cmの2倍となった場合、完全結氷と仮定して、河氷を考慮して算出した。

式(6)の左辺第3項の $\partial H_z / \partial x$ は、水面勾配である。河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河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 (m)は、「河床高+水のみが流れる水深+氷板と氷板下の河氷の喫水深」として求めた。具体的な算出方法は、式(5)で求めた A_w を川幅 B で割り、河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、水位差から水面勾配を算出した。

$$H_z = Z + H_w + \frac{\rho_i}{\rho_w} (1 - \lambda_i) H_i \quad (7)$$

河氷の流れの基礎式は、次式の連続の式と河氷流下堆積式²⁾を用いた。前出の式(10)は、河氷を氷の集合体の氷塊と考え、氷塊に作用する力の回転モーメントをゼロと仮定して導いた式である。

$$(1 - \lambda_i) \frac{\partial A_i}{\partial t} + \frac{\partial Q_i}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

$$Q_i = A_i U_i \quad (9)$$

$$U_i = U_w - \sqrt{\frac{\frac{B_i (\rho_w - \rho_i)}{B_d \rho_w} g H_i}{\frac{C_D}{2} \left(\frac{H_i}{L_i} \right)^2 + C_f \left(\frac{H_i}{L_i} \right) + \frac{C_L}{2}}} \quad (10)$$

Q_i (m³ s⁻¹) : 流下堆積する氷塊流量, U_i (m s⁻¹) : 河川縦断方向の氷塊の速さ, B_i (m) : 氷塊の横断方向の幅, B_d (m) : 対象断面より下流の川幅, ρ_w (kg m⁻³) : 水の密度, ρ_i (kg m⁻³) : 氷の密度, g (m s⁻²) : 重力加速度, H_i (m) : 氷塊の鉛直方向の厚さ, L_i (m) : 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、試行錯誤の上、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1/2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。

図-4.1における10m, 8m, 7m, 6m, 4m, 2mにおける実験値と計算値の水位において, 橋脚なしの結果を図-4.4に, 橋脚ありの結果を図-4.5に示す.

橋脚なしの図-4.4においては, 氷板模型投入の影響が上流から下流と伝わっている状況が水位から分かる. アイスジャムが発生していないため, 水位の急激な上昇は見られない.

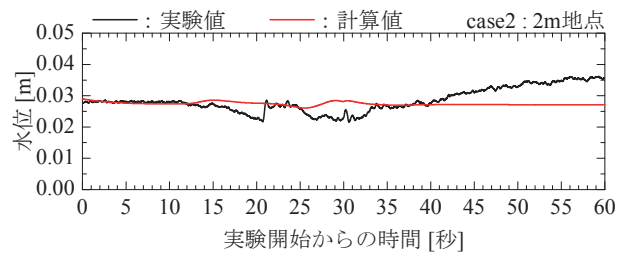
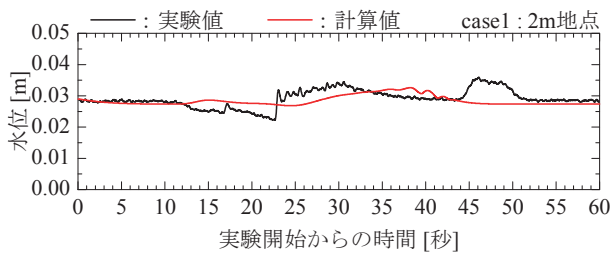
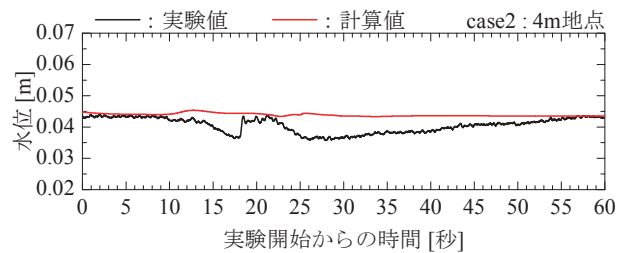
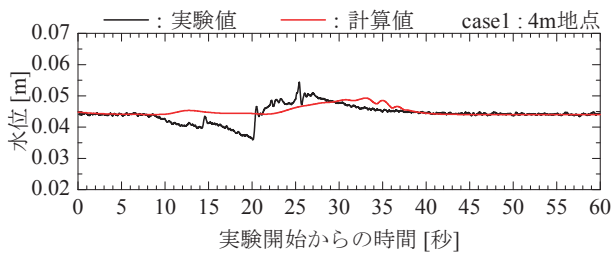
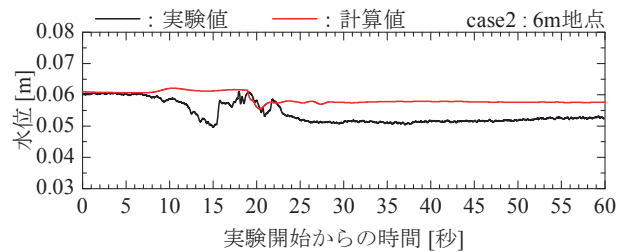
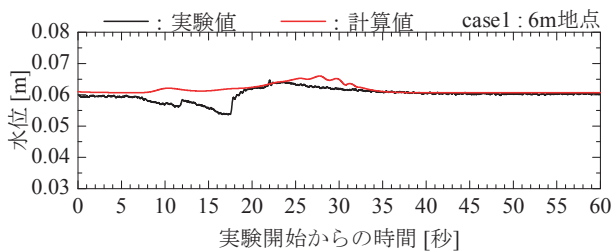
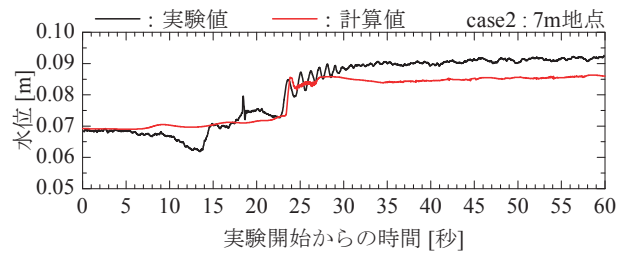
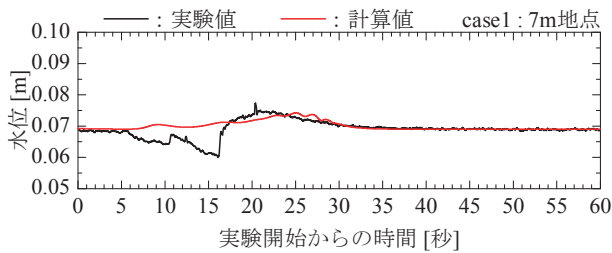
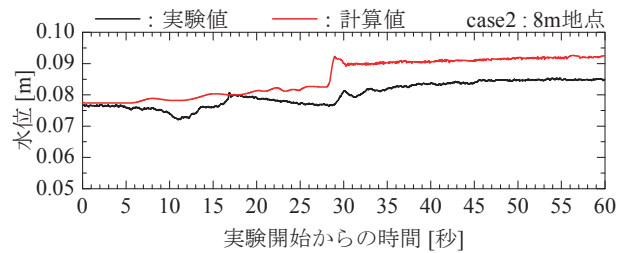
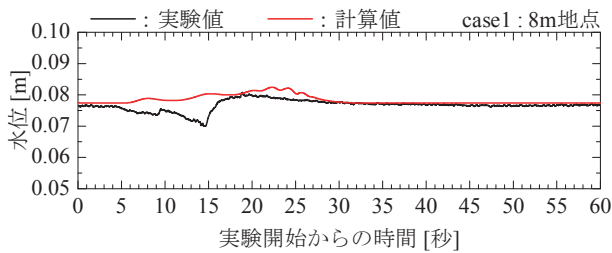
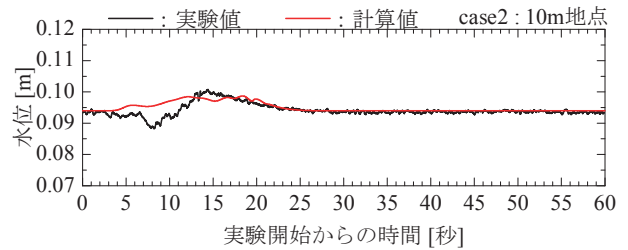
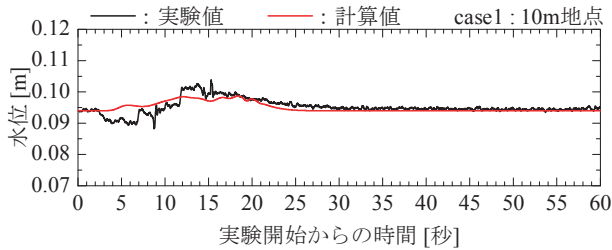


図-4.4 実験値と計算値の水位の比較 (橋脚なし)

図-4.5 実験値と計算値の水位の比較 (橋脚あり)

橋脚ありの図-4.5においては、アイスジャム発生により7m地点で水位が急激に上昇している一方で、6m地点、4m地点の下流では水位が下降しているのが分かる。

橋脚がある場合とない場合のアイスジャム実験における水位の変動と本計算モデルによる水位の変動をみると、定性的には良く一致している。一方で、河氷の空隙率、橋脚の影響の評価方法、氷塊がアーチ状になり固定される現象をどう表現するかなどの課題が明らかとなった。

5. まとめ

本研究により、以下の事が明らかとなった。

- 著者らが導いた河氷流下堆積式を用いることにより、辺別川のアイスジャム発生地点を抽出できることを示した。河氷流下堆積式は、実河川で適用できる可能性を示した。
- 河氷の破壊の現象を明らかにするために、辺別川で現地観測を実施した。現地観測の結果、気温上昇と日射の影響により融雪が促されて流量および水位が上昇し、水位上昇の影響により河氷が破壊されて解氷に至る現象が予見された。今後、観測データの解析を進める予定である。
- 河氷の流下、堆積（アイスジャム）、決壊、流下の現象を対象に、実氷を用いたアイスジャム実験を実施した。実験の結果、実氷の流下、堆積に加えて、アイスジャムの決壊、流下現象を水理実験で再現することが出来た。今後、実験データの解析を進める予定である。
- 数値計算モデルに河氷流下堆積式を組み込み、その再現性を検討した。ポリプロピレン製の氷板模型を用いたアイスジャム実験を実施し、水位の実験値を得た。数値計算モデルによる水位の計算値との比較から、定性的に水位変動を再現可能であることを示した。一方で、河氷の空隙率、橋脚の影響の評価方法、氷塊がアーチ状になり固定される現象をどう表現するかなどの課題が明らかとなった。

6. 謝辞

本研究は、福田水文センターより現地観測のご協力、水工リサーチより水理実験のご協力を頂いた。記して謝意を表します。

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) 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.
- 3) 吉川泰弘，渡邊康玄，早川博，平井康幸：結氷河川における解氷現象と実用的な氷板厚計算式の開発，土木学会論文集B1（水工学），Vol.68，No.1，pp.21-34，2012.
- 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.