

多孔板による水深上昇に関する水理実験

Hydraulic experiments on water depth rise by perforated plate

北見工業大学工学部 ○学生員 中西郁弥 (Fumiya Nakanishi)
 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 室井悠希 (Yuki Muroi)

1. はじめに

北海道などの寒冷地河川では、アイスジャムという現象が発生する。アイスジャム現象とは、気温の上昇などにより解氷した河氷が、下流へと流れて河道内で詰まる現象である。このアイスジャム現象によって、発生箇所より下流では水深が低下し、上流では水深が急激に上昇する。アイスジャム現象は災害を引き起こす恐れがある。実際に北海道の河川では、2018年3月に辺別川の上川郡美瑛町内の町道9線橋の上流160mの地点で、河川内において工事を実施していた社員が雪と氷に埋もれて死亡するという事故が発生している。辺別川では、アイスジャム現象が発生しやすい砂州、堰、橋脚部が多く存在する。実氷実験と模型実験を実施した既往研究²⁾³⁾によると、アイスジャムによる水深上昇には、氷模型厚が厚い条件や、氷模型同士が集積するような通水面積が小さくなる条件、言い換えるとアイスジャムの空隙率が小さくなる条件で水深が上昇しやすいことが推察されている。アイスジャム現象が発生した箇所での氷が詰まったときの空隙率と水深上昇の関係についての知見が望まれている。実際に、どの程度の氷が詰まったら、どの程度の水深上昇が起こるのかを明らかにすることは、冬期の河道内作業をする上で有益な知見となる。

本研究では、アイスジャム現象発生時における空隙率と水深上昇の関係について明らかにすることを念頭に、多孔板を用いた水理実験を実施し、空隙率と開口高さを考慮したレイノルズ数、抵抗係数、水深の上昇の関係について検討した。

2. 多孔板を用いた水理実験

実験条件は、辺別川のアイスジャム現象を参考に設定した。

2.1 実験水路と測定機器

実験水路の平面図を図-1に示す。水路延長は14.5m、水路幅は0.3m、水路の高さは0.4mである。模型縮尺は1/100、水路勾配は1/8300とした。水路勾配は、水路床に設置する圧力センサーが流水中に水没するように、初期条件となる等流水深が深くなるように設定した。本実験では、アイスジャム現象が発生した場合の空隙を再現するために、アクリル板に多数の穴を開けた多孔板を製作した。多孔板を水路の下流から1.4mの位置に設置した。設置方法は図-2に示すように、C字クランプ、木製のコの字型の道具、多孔板が水の流れにより流下方向に回転しないように多孔板の下部にL字金具を用いて固定

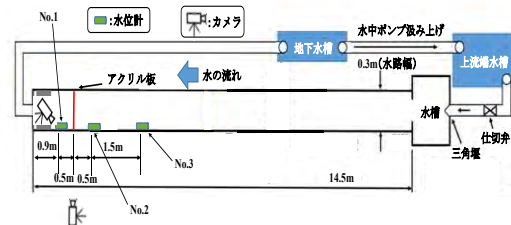


図-1 実験水路の平面図

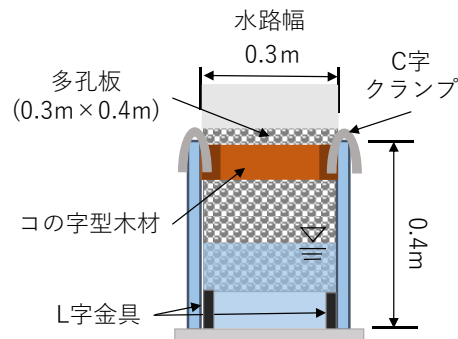


図-2 実験水路の正面図

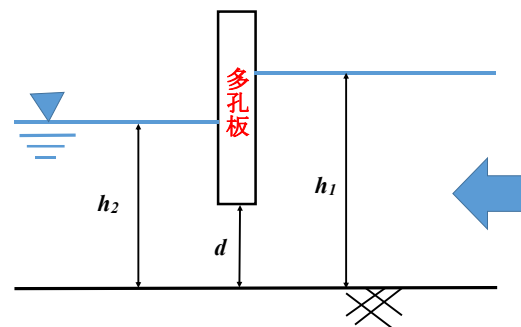


図-3 実験水路の側面図

設置した。

測定機器について記述する。水深を測定するために、圧力センサー(OYO社製 S&DL mini)を、水路の下流端から0.9m、1.9m、3.4mの3箇所に設置した。圧力センサー(以下、水位計)の設置位置は図-1の緑の長方形で示した。下流側の水位計から順にNo.1, No.2, No.3とする。測定した圧力を水深に換算して水深測定値とした。実験時は、水位計を各位置に設置してから水を流して、確認のためにポイントゲージで水深を測定した。その後、多孔板を固定して実験を開始した。

実験状況を把握するために、図-1に示す2台のカメラを設置した。ハンドヘルドカメラ(DJI社製 Osmo



写真-1 空隙率 40%

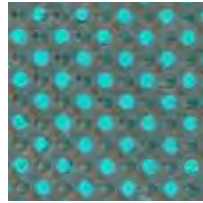


写真-2 空隙率 20%

Pocket)を水路の左側側面が撮影出来るように三脚を用いて設置し、デジタルカメラ(OLYMPUS)を水路の平面的な流況が撮影出来るように滑車台を用いて設置した。

2.2 アイスジャムの空隙率を模した多孔板の製作

アイスジャムの空隙による水深への影響を把握するためには、実氷や模型氷を用いた実験が望ましい。しかし、アイスジャムの空隙率を正確に測定することは困難である。本実験では、アクリル板に多数の穴を空けることで空隙率を再現した。空隙率の定義は、総体積に対する隙間の体積割合である。アクリル板は、 $0.3\text{m} \times 0.4\text{m} \times 0.01\text{m}$ の透明なポリカーボネート板を用いた。

穴の大きさは、アイスジャム発生時に氷が集積し、その隙間は最大で氷の厚さ分の隙間が出来ると想定した。2018年3月9日に辺別川で発生したアイスジャムの氷の厚さは、現地観測の結果、最大約400mmである。本実験では、縮尺1/100のため、穴の大きさは直径4mmとした。アクリル板に穴を空ける加工には、イワシタフライス盤を使用した。

穴の個数については、 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ の正方形を基準として空隙率が40%となるように計算した。空隙率を40%とした理由は、アイスジャム発生時の空隙率が不明であるため、既往研究⁴⁾で用いている晶氷の空隙率の40%を用いた。なお空けた穴の大きさは、手作業のため誤差が生じるが全て直径4mmであると仮定する。基準の板にあける穴の数は79.6個となる。しかし同じ大きさの穴を空けることと、穴を規則正しく配置させるため、基準の正方形に縦9個、横9個の合計81個の穴を写真-1のように空けた。この基準の正方形を縦に8個、横に6個の計48個分配置する方法とした。製作後に、実際の空隙率を計算した結果39.27%であった。

穴の配置は、製作可能な値かつ規則正しく並ぶようにするため、隣接する穴同士の中心間の距離を5.53mmとし、アクリル板の端に最も近い穴の中心から端までの距離は3.0mmとした。

空隙率が20%の実験も実施した。写真-2のように、アクリル板の穴を一つ置きに油粘土で塞ぎ、水の勢いで粘土が取れないように流下方向と反対側のアクリル板の面にガムテープを張り補強した。

2.3 実験条件

水理実験の条件を表-1に示す。流量は $0.014\text{m}^3/\text{s}$ と $0.016\text{m}^3/\text{s}$ の2パターン、空隙率は40%と20%の2パターン、水路床とアクリル板との開口高さは、0.03mと開口高さでのフルード数を0.4、0.6、0.8とした場合の計4パターンの合計16caseを設定した。1caseで3回の実験

表-1 アイスジャム実験の条件

$B=0.3\text{m}$, $i=1/8300$, $n=0.008$

	流量(m^3/s)	フルード数	空隙率(%)	開口高さ(m)
case1	0.016	3.28	40	0.030
case2	0.016	0.40	40	0.122
case3	0.016	0.60	40	0.093
case4	0.016	0.80	40	0.077
case5	0.016	3.28	20	0.030
case6	0.016	0.40	20	0.122
case7	0.016	0.60	20	0.093
case8	0.016	0.80	20	0.077
case9	0.014	2.87	40	0.030
case10	0.014	0.40	40	0.112
case11	0.014	0.60	40	0.085
case12	0.014	0.80	40	0.070
case13	0.014	2.87	20	0.030
case14	0.014	0.40	20	0.112
case15	0.014	0.60	20	0.085
case16	0.014	0.80	20	0.070

を実施し、合計48回の実験を実施した。

流量の設定については、水位計が完全に水没するように、等流水深を大きくする必要がある。そのため流量は実験水路で設定可能な範囲で大きいものである $0.014\text{m}^3/\text{s}$ と $0.016\text{m}^3/\text{s}$ とした。

河川結氷時のフルード数について、既往研究⁵⁾では、河川結氷時の横断結氷率は80%以下であり、その際のフルード数はほとんどの場合で0.4以下である。本実験では、開口高さでのフルード数0.4を基準として0.4、0.6、0.8の3パターンとした。初期条件の等流水深の場合のフルード数は、 $0.016\text{m}^3/\text{s}$ において0.31、 $0.014\text{m}^3/\text{s}$ において0.28である。このため開口高さでのフルード数をこの値以下に設定すると、等流水深よりも開口高さの方が高くなるため、本実験では開口高さでのフルード数は0.4以上の値とした。開口高さ0.030mは限界水深の約半分であり、流れは射流となる。開口高さのフルード数を基準とした開口高さ d [m]は、次式により求めた。

$$d = \left(\frac{Q^2}{Fr^2 B^2 g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

Q [m^3/s]: 流量, B [m]: 水路幅, Fr : フルード数, g [m/s^2]: 重力加速度9.8である。

開口高さと多孔板の関係は図-3のようになる。実験条件の設定では、開口高さの範囲に全ての流量が流れると仮定して、開口高さでのフルード数を設定している。実験水路のマニングの粗度係数は、マニングの平均流速公式を用いて求めた。等流水深は、実験開始前のcase1の水位計No.3の値を用いた。算出したマニングの粗度係数は0.008であった。

表-2 各 case の水深比(h)

case1-1	1.18	case9-1	1.16
case1-2	1.18	case9-2	1.18
case1-3	1.19	case9-3	1.16
case2-1	1.03	case10-1	1.03
case2-2	1.03	case10-2	1.04
case2-3	1.03	case10-3	1.04
case3-1	1.07	case11-1	1.07
case3-2	1.08	case11-2	1.07
case3-3	1.07	case11-3	1.07
case4-1	1.09	case12-1	1.10
case4-2	1.10	case12-2	1.09
case4-3	1.09	case12-3	1.09
case5-1	1.48	case13-1	1.42
case5-2	1.48	case13-2	1.42
case5-3	1.48	case13-3	1.40
case6-1	1.04	case14-1	1.05
case6-2	1.04	case14-2	1.06
case6-3	1.04	case14-3	1.05
case7-1	1.11	case15-1	1.10
case7-2	1.12	case15-2	1.11
case7-3	1.11	case15-3	1.10
case8-1	1.15	case16-1	1.15
case8-2	1.15	case16-2	1.16
case8-3	1.16	case16-3	1.17

Case1~8 : 0.016m³/sCase10~16 : 0.014m³/s

3. 水理実験結果

3.1 水深比(h)

全ての実験条件において初期水深よりも水深は上昇した。上昇した水深を初期水深で割った値を水深比(h)として評価した。各 case の水深比の結果を表-2 に示す。初期水深は、流量が安定している実験開始前の 30 秒間の水深を平均した値とした。この値は流量が 0.016m³/s のとき平均 0.147m, 0.014m³/s のとき平均 0.140m である。上昇した水深は、水深が上昇してから変化の無くなった実験終了前の 30 秒間の水深を平均した値とした。水深比の算出に用いたデータは水位計 No.2 のデータである。水位計 No.3 のデータにおいても No.2 と同等の水深比となった。水位計 No.2, No.3 の両地点での水深比が同等であることから、多孔板による堰上げによる水深の上昇の影響は水位計 No.3 の地点まで及ぶことが分かる。

表-2 の各 case の水深比を見ると、流量が大きく空隙率と開口高さが小さい case5 の水深比が大きい。具体的には、流量が 0.016 m³/s と大きく、空隙率が 20%で開口高さが 0.03m と小さいため、通水面積が他の case より小さくなり水深比が大きくなったと考えられる。これは水位計 No.3 の地点でも同様である。一方で、開口高さが 0.03m でも空隙率が 40%であると case1 と case9 のように水深比が大きくなる。本実験の実験条件では、空隙率よりも開口高さの方が水深比に与える影響が大きいことが推察された。本実験で基準とした開口高さのフルード数が 0.4 の時の水深比は 1.03 から 1.06 の間の値となり、水深は上昇しなかった。開口高さのフルード数が 0.4 よりも大きく通水面積を小さくする条件で水深が上昇した。

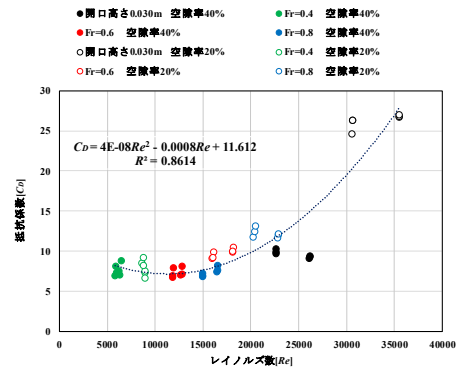


図-4 多孔板の抵抗係数

3.2 抵抗係数(C_D)とレイノルズ数(Re)

実験データを用いて、多孔板の抵抗係数 C_D とレイノルズ数 Re との関係を整理した。空隙率と開口高さの影響は、抵抗を計算する際の代表面積、レイノルズ数を算出する際の代表長さで考慮した。多孔板の前後において静水圧分布を用いた運動量保存則は式(2)となる。多孔板に作用する抵抗は式(3)となる。抵抗係数 C_D は、式(2)および式(3)(4)に実験データを代入して算出した。

$$F = \rho QV_1 - \rho QV_2 + \frac{\rho g B(h_1^2 - h_2^2)}{2} \quad (2)$$

$$F = \frac{\rho C_D A V_1^2}{2} \quad (3)$$

$$A = (h_1 - d)(1 - \lambda)B \quad (4)$$

C_D [無次元]:抵抗係数, ρ [kg/m³]:水の密度, V_1 [m/s]:流速で水位計 No.2 の値から算出した。 h_1 [m]:水深で水位計 No.2 の値を与えた。 V_2 [m/s]:流速で水位計 No.1 の値から算出した。 h_2 [m]:水深で水位計 No.1 の値を与えた。 A [m²]:代表面積, λ :空隙(0 から 1)である。

多孔板の空隙率と開口高さを考慮したレイノルズ数は次式とした。

$$Re = \frac{(h_1 - d)(1 - \lambda)V_1}{\nu} \quad (5)$$

ν [m²/s]:水の動粘性係数で水温に依存する。実験は 2 日間実施し 1 日の平均水温は 19℃と 20℃であり、平均水温から動粘性係数を算出した。

抵抗係数とレイノルズ数との関係を図-4 に示す。図のプロット点において、色の違いはフルード数または開口高さの違い、プロット点の塗り潰しの違いは空隙率の違いである。

図-4 より、水路底面と多孔板が近づく状態となる開口高さが小さくなる、またはフルード数が大きくなるほど、レイノルズ数と抵抗係数が大きい値となる。開口高

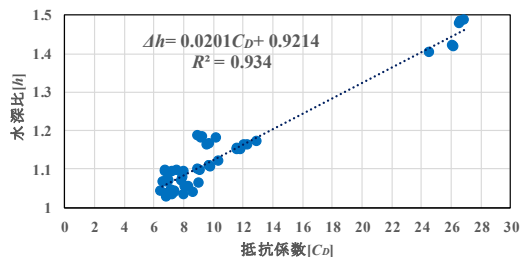


図-5 多孔板設置時の水深比(水位計 No.2)

さが同程度の場合、フルード数が同じ場合は、空隙率が小さくなるとレイノルズ数は大きい値となる。抵抗係数については、 $Fr=0.4$ の場合を除いて、値が大きくなる。 $Fr=0.4$ の場合において、空隙率が小さくなくても抵抗係数が他の case と比べて大きくなる。この実験上の理由として、 $Fr=0.4$ の場合の開口高さは大きく、L 字金具の延長が足りず固定強度が弱くなり多孔板が流下方向に押されて抵抗が小さくなったと考えられる。この原因については、今後検討が必要である。一方で射流条件の開口高さ 0.03m の場合は、常流条件に比べて抵抗係数は大きな値となった。特に空隙率が 20% の場合の抵抗係数は大きな値となった。なお参考までに、図中には抵抗係数とレイノルズ数の近似式を 2 次曲線で示した。近似式は、決定係数 R^2 が 1 に近くなる曲線を選定した。

3.3 抵抗係数(C_D)と水深比(h)

実験データを用いて、抵抗係数 C_D と水深比 h との関係を整理した。抵抗係数と水深比の関係を図-5 に示す。図-5 より、抵抗係数が大きいほど水深比は大きい。特に case5 と case13 の射流条件かつ空隙率が 20% の条件では、他の常流条件のケースと比べて抵抗係数と水深比は大きい。なお case5 と case13 の開口高さは狭く通水面積が小さい条件である。参考までに、図中には抵抗係数と水深比の近似式を 1 次直線で示した。近似式の選定は前述と同様である。水位計 No.3 の地点についても同様に近似式を算出した結果、 $\Delta h=0.0194C_D+0.9313$ で $R^2=0.9403$ であった。

4. まとめ

本研究では、アイスジャム現象発生時における空隙率と水深上昇の関係について明らかにすることを念頭に、多孔板を用いた水理実験を実施した。実験データを用いて、空隙率と開口高さを考慮したレイノルズ数、抵抗係数、水深の上昇を表す水深比の関係について検討した。本実験結果から得られた知見を以下に示す。

- ・流量が大きく空隙率と開口高さが小さい条件の場合、他の case と比べての水深比が大きい。また、空隙率よりも開口高さの方が水深比に与える影響が大きい。一方で開口高さでのフルード数が 0.4 の場合は、水深比は平均 1.04 であり上昇しない。
- ・抵抗係数とレイノルズ数との関係においては、開口高

さが小さい場合またはフルード数が大きい場合は、レイノルズ数と抵抗係数は大きい値となる。開口高さが同程度の場合またはフルード数が同じ場合において空隙率が小さくなると、レイノルズ数は大きい値となる。抵抗係数については、 $Fr=0.4$ の場合を除いて値が大きくなる。射流条件の開口高さ 0.03m の場合は、常流条件に比べて抵抗係数は大きい。特に空隙率が 20% の場合の抵抗係数は大きな値となった。

- ・抵抗係数と水深比との関係においては、抵抗係数が大きいほど水深比は大きい。特に射流条件かつ空隙率が 20% の条件では、他の常流条件のケースと比べて抵抗係数と水深比は大きい。
- ・本実験から、空隙率と開口高さを考慮したレイノルズ数と抵抗係数との関係、抵抗係数と水深比との関係を明らかにした。本研究成果は、レイノルズ数(氷の喫水深、氷の空隙率、流速、水温)が既知であれば、水深比を推定出来る可能性を示している。

参考文献

- 1) 横山洋, 吉川泰弘, 伊波友生: 2018 年 3 月北海道アイスジャム被害報告と今後の被害軽減策, 第 62 回(平成 30 年度)北海道開発技術研究発表会, 2019
- 2) 山田隆司, 吉川泰弘, 堀純斗: 川幅漸縮部における実氷を用いたアイスジャム実験, 土木学会北海道支部, 年次技術研究発表会論文報告集, 第 78 号, B-28, 2022
- 3) 堀純斗, 吉川泰弘, 山田隆司: 川幅漸縮部のアイスジャム実験における氷模型厚と水深変動に関する検討, 土木学会北海道支部, 年次技術研究発表会論文報告集, 第 78 号, B-27, 2022
- 4) 吉川泰弘, 黒田保孝, 橋場雅弘, 入交泰文: 寒冷地河川における晶氷発生計算モデルの開発と取水障害の発生条件, 土木学会, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.71, No.4, I_1327-I_1332, 2015.
- 5) 吉川泰弘: 河氷の形成と流下機構に関する研究, 博士論文 2011 年 9 月