

気温と流量がアイスジャム現象に与える影響

Effect of air temperature and discharge on ice jam phenomenon

北見工業大学工学部 ○学生員 渡辺 健斗 (Kento Watanabe)
北見工業大学工学部 正員 吉川 泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)

1. はじめに

寒冷地河川では、アイスジャムが発生する。アイスジャムとは、河水が河道内で堆積する現象であり、河水が流下する結氷期や解氷期に発生する。解氷期に発生するアイスジャムでは、冬期の気温低下に伴い河川内に形成された河水が、春先の気温上昇等により解氷されて下流へと流れ、解氷した河水が河道内で堆積する。アイスジャム現象に関する既往研究^{1,2)}では、アイスジャムによる水深上昇は河水のサイズと関係があることが示されている。また、アイスジャム発生時では、流速が速いほど河水同士が集積し空隙率が小さくなり水深が上昇することが示されている。一方で、形成されたアイスジャムが解消または破壊される現象については、河水の状態他に気温の高低や流量の大小が影響を与えていることが考えられる。しかし、アイスジャム発生時における気温や流量がアイスジャム現象に与える影響については十分には解明されていない。

本研究は、気温や流量がアイスジャム現象に与える影響を明らかにすることを目的として、アイスジャム実験を実施した。

2. アイスジャム実験

2.1 実験水路

実験水路の平面図を図-1に示す。水路延長は12.0m、水路幅は0.6m、水路勾配はゼロ、模型縮尺は1/50とした。アイスジャム発生個所として、既往研究^{1,2)}と同様に、スタイロフォームを用いて50cm×50cm×50cmの四角柱と50cm×89cm×50cmの三角柱を製作し、漸縮角を30°の砂州形状を想定した模型を設置した。模型設置箇所の下流端は、実氷の投入位置(上下変動ゲート)から4m下流とした。なお実氷の投入方法は、上下変動ゲートを水面まで下げ、実氷を人の手で並べてゲート上流に滞留させて、実験開始時に上下変動ゲートを上げて実氷を流下させた。実氷のサイズについては後述する。

水深は、図-1に示した赤い点に圧力センサー(STS社製ATM.1ST)を4箇所を設置して測定した。設置位置は上下変動ゲートから0.6m、1.6m、2.6m、5m下流とした。測定間隔1秒で測定した圧力を水深に換算した。

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3箇所を設置した。漸縮部の水路上部に平面撮影として1台、水路全体を把握するために上下変動ゲートの位置に1台、水深上昇を把握するために右側側面に1台設置した。

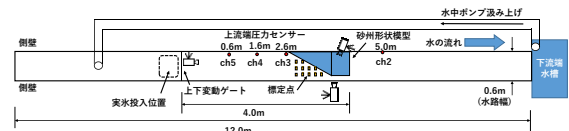


図-1 実験水路の平面図 (漸縮角 30°)

表-1 アイスジャム実験条件

caseA	流量 (m ³ /s)	実氷の平均厚さ (cm)	平均水温 (°C)	平均室温 (°C)
case A-1-1	0.001	2.17	5.77	2.00
1-2	0.001	2.15	8.00	2.48
2-1	0.001	2.19	9.71	14.33
2-2	0.001	2.15	9.86	12.43
caseB	流量 (m ³ /s)	実氷の平均厚さ (cm)	平均水温 (°C)	平均室温 (°C)
case B-1-1	0.002	2.09	6.88	2.02
1-2	0.002	2.07	7.18	2.11
2-1	0.002	2.02	9.99	13.84
2-2	0.002	2.09	10.59	14.16
caseC	流量 (m ³ /s)	実氷の平均厚さ (cm)	平均水温 (°C)	平均室温 (°C)
case C-1-1	0.003	2.12	9.19	1.67
1-2	0.003	2.15	9.34	2.24
2-1	0.003	2.08	10.38	14.10
2-2	0.003	2.07	10.59	14.44

2.2 実験条件

実験条件は、既往研究^{1,2)}と同様に辺別川のアイスジャム現象を対象として設定した。現地データを基に縮尺1/50、流量はcaseA、caseB、caseCの3つを設定した。caseAの流量は現地データを基にフルード相似則によって0.001m³/sとした。caseBとcaseCの流量はそれぞれcaseAの2倍と3倍にした。各caseにおいて気温を1°Cと15°Cの2パターン設定した。なお、本実験は実験室内で実施するため気温は室温となる。河水は実際の氷を製作した。実氷のサイズは、確実に詰まらせるために狭窄部の水路幅10cmの1.5倍とした。厚さは、既往研究^{1,2)}を参考に2cmとした。氷サイズ15cm×15cm×2cmとして、1回の実験で10枚を流下させた。製作方法は、シリコン製の型枠を製作して、型枠内に沸騰させた水を412.65g注ぎ冷凍庫で凍らせた。製作した実氷において品質管理のため、1枚毎に4辺の厚さを測定し平均厚さを求め、さらに10枚の平均厚さを求めた。実験条件を表-1に示す。実験条件は流量3パターン×室温2パターンの計6パターンとした。実際の氷を用いているため、氷のサイズや配置の微細な違いによる結果の違いが想定されるため、各パターンを2回実施し合計12回実施した。

室温の設定について、水温を可能な限り低く設定するために、室温設定を1°Cにして1日以上稼働させてから実験を実施した。15°Cの実験は1°Cの実験を実施した後

に15°Cに設定して1時間稼働させて実験を実施した。表-1に示した平均水温と平均気温は、実験開始から終了までの期間を熱電対で測定し平均した値である。氷が全て流下して水深が一定になった時点で実験終了とした。

3. 実験結果

全ての実験条件で、アイスジャムが発生し、その上流で水深が上昇した。水深上昇を無次元量の水深比で評価した。本検討での水深比は、測定水深を初期水深で割った値とした。初期水深は、氷が水面に無い状態でゲートが水面に触れていない上がった状態における水深である。最大水深比は、1.6m地点(ch4)の最大水深を初期水深で割った値とした。図-2,3,4に水深比の経時変化を示す。

3.1 caseA(0.001m³/s)の実験結果

全ケースにおいて、写真-1 a)のように、実験開始から約60秒後に1枚の氷が水面と並行の状態に狭窄部に詰まり水深が上昇する。この時、水深比は1.1以下になる。一方で後続の氷は上流で滞留している。その後、写真-1 b)のように、狭窄部の数枚の氷が下流へと流下すると、上流で滞留していた後続の氷が狭窄部に堆積する。この時に堆積する先頭の氷の下に、遅れて流下してくる氷が潜り込む。そして先頭の氷を鉛直上方向に持ち上げて、先頭の氷は前傾となる。水深は、この再堆積により再上昇して最大水深を記録する。その後の水深はアイスジャム解消に伴い低下する。最初のアイスジャムは、氷が2枚上下に重なることはないが、2回目のアイスジャムは、氷が溶けて薄くなっているため、写真-1 c)のように上下に重なる時がある。上下に重なる場合は流水面積を小さくするため水深が上昇しやすいと推察できる。caseAの初期水深の平均は4.55cmである。

室温が低い1回目の図-2(A)では、水温が他のパターンより2°C以上低い。そのため、氷が溶けずアイスジャム発生期間が長くなったと推察される。水深比の再上昇期間からアイスジャム崩壊までに、氷が2枚重なり詰まる状態が4回確認された。最大水深比は1.32である。アイスジャムは実験開始から840秒後に解消された。

室温が低い2回目の図-2(B)では、数枚が重なり合って氷が詰まった。詰まっている氷の一部が流下しても後続の氷が流下して堆積状態は維持された。後続の氷が無くなってから詰まりが少しずつ解消されて、緩やかに水深は低下した。最大水深比が1.37である。アイスジャムは実験開始から678秒後に解消された。

室温が高い1回目の図-2(C)では、最大水深比のピーク時期が全ケースで一番遅い。要因として氷の重なり合いが発生しなかったこと、発生しても氷が前傾にならなかったことが挙げられる。最大水深比は1.25である。アイスジャムは実験開始から696秒後に解消された。

室温が高い2回目の図-2(D)では、図-2(B)と類似した水深比の上がり方になっているが、その値は小さい。水深が上がりにくい要因として、室温・水温が高いため氷が薄くなるのが速く、氷が重なる場合に厚みが出なかったことが考えられる。最大水深比は1.25である。アイスジャムは実験開始から560秒後に解消された。



a) caseA-1-1 開始から60秒後



b) caseA-1-1 開始から496秒後



c) caseA-1-1 開始から689秒後

写真-1 caseA



a) caseB-1-2 開始から240秒後



b) caseB-1-2 開始から282秒後

写真-2 caseB



a) caseC-1-1 開始から240秒後



b) caseC-2-2 開始から174秒後



c) caseC-2-1 開始から210秒後

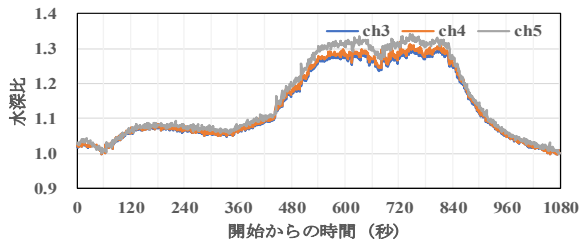
写真-3 caseC

caseAでは、室温が低い場合は、高い場合に比べて最大水深比が高くなる。アイスジャムの持続時間は室温が低いケースで平均702秒、室温が高いケースで平均565秒になる。室温が低い場合は、高い場合に比べて持続時間が24%増加した。

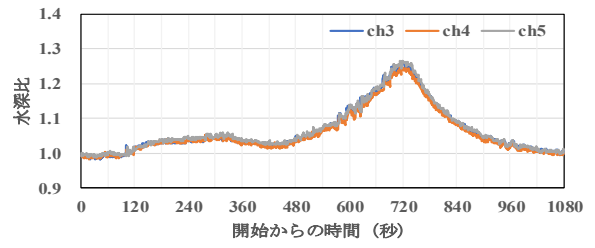
3.2 caseB(0.002m³/s)の実験結果

全ケースにおいて、caseAに比べて、全体的に実験終了までの時間が短い。流量が2倍となり、初期水深が深くなったため、氷が下に潜り込む空間が生まれて重なりやすくなり、水深が上昇する速度が速い。caseBの初期水深の平均は6.56cmである。

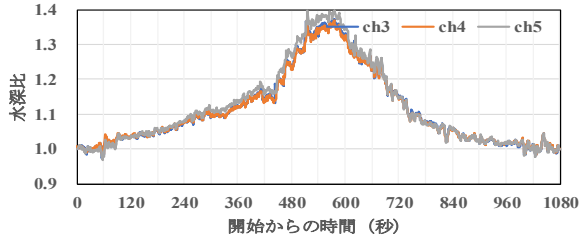
室温が低い1回目の図-3(A)では、他のパターンと違い直ぐに水深が上昇した。最初の1枚の氷が前傾で狭窄部に詰まり、その後、後続の氷が重なった。そして狭窄部の氷が流下して水深が少し低下した後、再度アイスジャムが形成され水深が上昇した。最大水深比は1.25である。



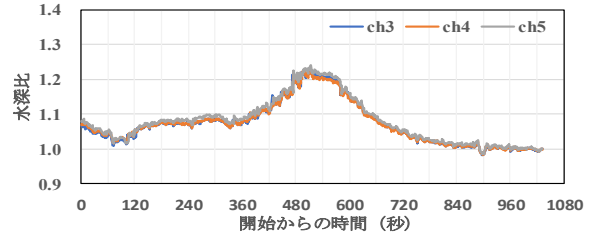
(A) caesA-1-1 流量 0.001m³/s, 室温 2.00°C,水温 5.77°C



(C) caesA-2-1 流量 0.001m³/s, 室温 14.33°C,水温 9.71°C

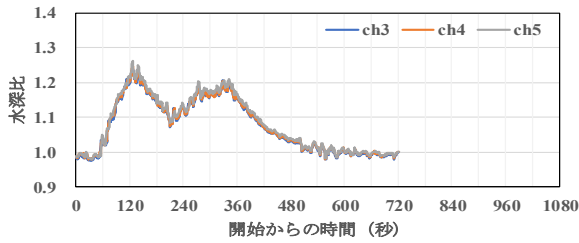


(B) caesA-1-2 流量 0.001m³/s, 室温 2.48°C,水温 8.00°C

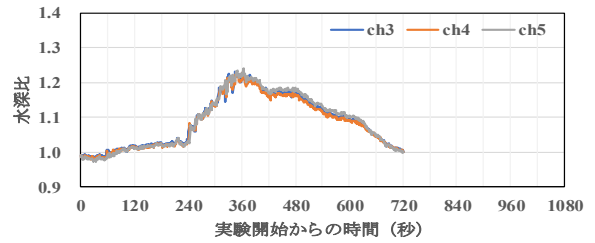


(D) caesA-2-2 流量 0.001m³/s, 室温 12.43°C,水温 9.86°C

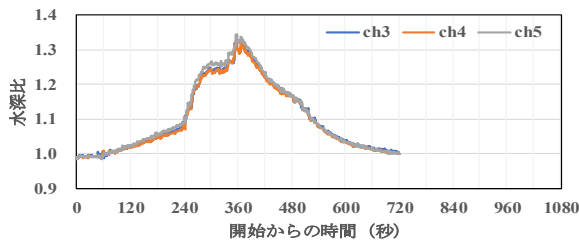
図-2 caseA 水深比の経時変化



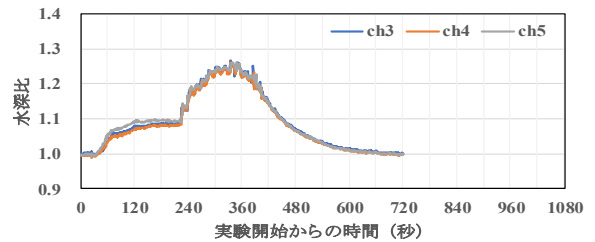
(A) caesB-1-1 流量 0.002m³/s, 室温 2.02°C,水温 6.88°C



(C) caesB-2-1 流量 0.002m³/s, 室温 13.84°C,水温 9.99°C

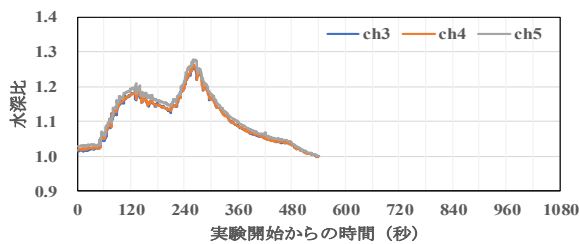


(B) caesB-1-2 流量 0.002m³/s, 室温 2.11°C,水温 7.18°C

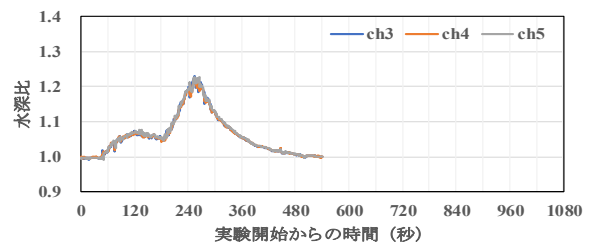


(D) caesB-2-2 流量 0.002m³/s, 室温 14.16°C,水温 10.59°C

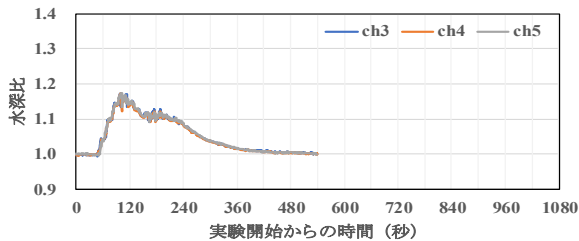
図-3 caseB 水深比の経時変化



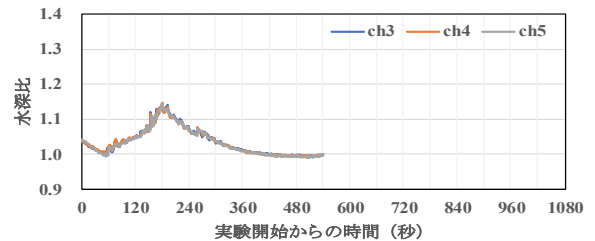
(A) caesC-1-1 流量 0.003m³/s, 室温 1.67°C,水温 9.19°C



(C) caesC-2-1 流量 0.003m³/s, 室温 14.10°C,水温 10.38°C



(B) caesC-1-2 流量 0.003m³/s, 室温 2.24°C,水温 10.38°C



(D) caesC-2-2 流量 0.003m³/s, 室温 14.44°C,水温 10.59°C

図-4 caseC 水深比の経時変化

アイスジャムは実験開始から 500 秒後に解消された。

室温が低い 2 回目の図-3(B)では、写真-2 a)のように数枚が重なり合いアイスジャムを形成し水深上昇後に安定する。その後、写真-2 b)のように後続の氷が再度アイスジャムを形成して最高水深を記録する。アイスジャム解消に伴い水深も低下した。最大水深比は 1.32 である。アイスジャムは実験開始から 486 秒後に解消された。

室温が高い 1 回目の図-3(C)では、水面と平行に氷が滞留する。実験開始から約 225 秒後に後続の氷が潜り込み水深上昇が起こり最大水深を記録する。その後は狭窄部において氷が滞留、流下を繰り返しアイスジャム解消に伴い水深が低下した。最大水深比は 1.22 である。アイスジャムは実験開始から 385 秒後に解消された。

室温の高い 2 回目の図-3(D)では、写真-2 a)のように最初から氷が下に潜り込み数枚でアイスジャムを形成し水深が上昇し、狭窄部の氷が流下するまで安定する。その後、実験開始から 219 秒後に再度アイスジャムを形成して最高水深を記録する。アイスジャム解消に伴い水深も低下した。最大水深比は 1.26 である。アイスジャムは実験開始から 342 秒後に解消された。

caseB では、室温が低い場合、高い場合に比べて再度のアイスジャム形成時でも水深上昇が発生する。アイスジャムの持続時間は、室温が低いケースで平均 438 秒、室温が高いケースで平均 312 秒になる。室温が低い場合は高い場合に比べて持続時間が 40%増加する。

3.3 caseC(0.003m³/s)の実験結果

全ケースにおいて、caseB に比べて、全体的に実験終了までの時間が短く、氷が潜り込む割合が高い。写真-3 a)のように氷が前傾となる角度が大きい。写真-3 b)のように流速が速いため氷が縦になって押し出されることがあった。caseC の初期水深の平均は 8.37 cm である。

室温が低い 1 回目の図-4(A)では、2 度のアイスジャムが形成されたが両方とも水深が上昇中に氷が縦になり流下した。最大水深比は 1.26 である。アイスジャムは実験開始から 265 秒後に解消された。

室温が低い 2 回目の図-4(B)では、図-4(A)と比べて、最初のアイスジャムを形成して水深が上昇し氷が流下するまでの現象は同様である。その後、直ぐに 2 回目の詰まりを確認したが、水深は上昇しなかった。その後は明確な詰まりは確認出来なかった。最大水深比は 1.14 である。アイスジャムは実験開始から 264 秒後に解消された。

室温が高い 1 回目の図-4(C)では、写真-3 c)のように、氷が複雑に重なる。最大水深比は 1.22 である。アイスジャムは実験開始から 264 秒後に解消された。

室温が高い 2 回目の図-4(D)では、氷が詰まることはあったが、氷がその場に留まる時間が短く、他のケースと比べて水深は上昇しなかった。最大水深比は 1.17 である。アイスジャムは実験開始から 232 秒後に解消された。

caseC では、室温が低い場合と高い場合で、水深比に明確な違いはない。図-4(B)と図-4(D)で最大水深比が大きくならなかった原因として、アイスジャム形成時に氷が重ならず縦に立ち、水をせき止める面積が減少したためと考えられる。アイスジャムの持続時間は、室温が低いケ

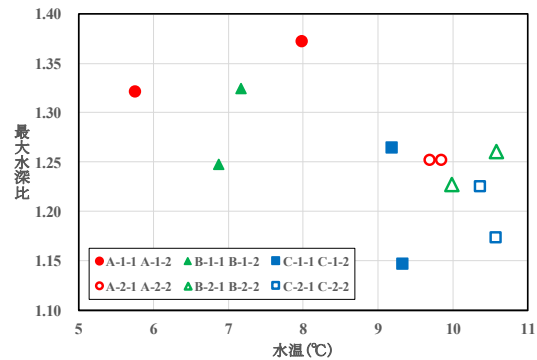


図-5 最大水深比と水温

ースで平均 211 秒、室温が高いケースで平均 182 秒になる。室温が低い場合は高い場合に比べて持続時間が 15%増加する。

3.4 気温・水温がアイスジャムに与える影響について

実験結果から、低い室温は高い室温に比べてアイスジャムの持続時間が増加する。水温と最大水深比の関係を図-5 に示す、水温が低い時のほうが高い時よりも最大水深比が大きい。しかし、最大水深比にバラつきがあるため、今後詳細な検討が必要である。

3.5 流量がアイスジャムに与える影響について

流量が大きいと水深は深くなり、アイスジャム発生時に氷が鉛直下方向に重なりやすくなる。通水面積を小さくするため水深は急激に上昇する。流量が大きくなるに従い、氷が縦に立つ現象が見られた。また、流速が速くなるため狭窄部の氷は早く融解した。本実験において流量が大きい場合、急激に水深が上昇するが、氷の融解の影響で、最大水深比は小さく、最大水深比のピーク時間は短くなり、アイスジャムの持続時間は短くなる。

4. まとめ

本実験結果から以下のことが分かった。

- 気温が低いとアイスジャムの持続時間が長くなり、水温が低いと最大水深比が大きくなる。
- 流量が大きいと、急激に水深が上昇するが、最大水深比のピーク値とピーク時間は小さくなり、アイスジャムの持続時間は短くなる。
- 本実験でのアイスジャム現象では、氷が重なる場合に水深比は高くなる。氷が水面と平行に詰まる場合よりも、斜めに傾斜がついて詰まる場合の方が水深は上昇する。

参考文献

- 1) 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.
- 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.