

河川結氷時における河川津波の流速分布特性

Velocity Distribution of Tsunami Flow Ascending to the Ice-Covered River

北見工業大学社会環境工学科 ○学生員 河上将尊(Masataka Kawakami)

北見工業大学社会環境工学科 正会員 吉川泰弘(Yasuhiko Yoshikawa)

北見工業大学社会環境工学科 正会員 渡邊康玄(Yasuharu Watanabe)

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震において、地震による津波の河川への遡上は、被害を拡大させた。この地震による津波は、北海道の河川にも遡上した。地震発生当時、北海道の河川は結氷しており、津波の遡上による河氷の破壊や河氷の漂流物化による更なる危険性が存在することが明らかとなった。過去には、1952年3月4日に発生した十勝沖地震¹⁾²⁾で結氷した春採川(釧路市)を津波が遡上し、河氷が市街地へ侵入し家屋の損傷や破壊等の被害が起きている。このことから、今後巨大な津波が発生し結氷した河川に遡上した場合、河氷の治水施設への衝突、アイスジャムによる水位上昇などの被害が考えられる。河川結氷時における津波の河川への遡上現象は北海道特有の問題であり、防災・減災対策を実施するためにも、現象の解明が必要な状況にある。

本研究は、河川結氷時に津波が遡上する際の破壊メカニズムの解明を念頭に、結氷時の河川津波の流速分布を明らかにすることを目的としている。水理模型実験を実施し、PIV解析により流下方向および鉛直方向の流速分布の特性を把握した。

2. 水理模型実験の詳細

大久保ら³⁾は、水理実験により結氷した河川に津波が遡上した際の圧力の伝搬について検討を行っている。本実験では、圧力の測定に加えて、流体内に粒子を投入し高速カメラにより流況を撮影している。本研究では、このとき撮影された画像を用いてPIV解析により流速分布の解析を行うこととした。このことから、本研究で用いている実験条件は、大久保らの実験条件と同一となっている。

実験は、全長34m、水路幅0.5m、河床勾配1/1000の矩形断面水路を用いている。上流の給水機構から河川流として水を流し、下流側にあるコンピュータ制御のパドル型造波機で津波を発生させることで、流れに対して津波を遡上させることが可能である。また、圧力を計測するために水路の側壁に水路底面から1.5cmの位置にピエゾメータを設置し、圧力センサーと接続して圧力変化の計測を行っている。圧力の計測位置は、 $x=4.15\text{m}$ 、 6.15m 、 8.15m 、 10.15m 、 12.15m 、 14.15m 、 16.15m 、 18.15m の2m間隔であり8台のピエゾメータを設置している。

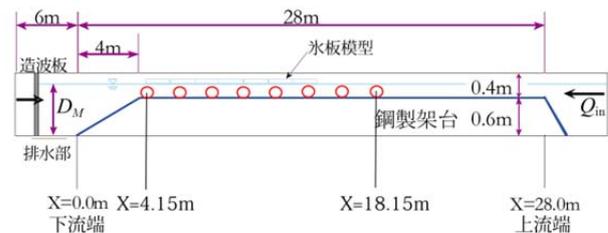


図-1 水路模型図

地震発生時に結氷しており、津波が遡上したことによる河氷の破壊が確認された厚岸町の尾幌川を対象として実験が行われている。縮尺は1/20であり、水路の性能を超えないよう、造波板前水深は $D_M=0.7\text{m}$ としている。また、尾幌川の河口水深が2mであることから実験水路の河口水深 h を10cmと設定している。流量は、地震発生時の現地流量は観測水位から $H-Q$ より $30\text{m}^3/\text{s}$ と算出されている。実験水路での流量はフルードの相似則より $16.8\text{L}/\text{s}$ と算出されている。縮尺1/20では必要水路幅が1.5mとなることから、津波の遡上が尾幌川程度の川幅(30m程度)で且つ直線河道の場合は横断方向にほぼ変化が無いものと考え、川幅の割合で流量を減少させ $5.6\text{L}/\text{s}$ としている。

氷板条件は、完全に結氷しているケース(固定)と氷が浮いているケース(浮遊)、氷がないケース(開水)の3ケースで実験が行われている。また、氷板模型のサイズは幅0.5m、厚さ15mmであり浮遊のケースでは、氷板模型の長さを2m、0.25mと変化させている。固定の場合は、氷板模型の長さを変えても現象は変わらないと考えられる為、2mの条件のみ行われている。氷板模型の材料は、実際に氷と同等の比重であるポリプロピレンが使用されている。

津波の条件は、周期 T が10秒、波高 H が1cm、2cm、3cmの3ケースで設定されている。3cm以上の波高になると、使用した水路では津波遡上時に碎波してしまうため $H=3\text{cm}$ までとしている。以上全18ケースの実験が行われている。

実験水路で津波を再現できているのか確かめる。津波は周期が非常に長く、長波の性質を有しているため水深波長比を式(1)~(3)で求め確かめた。

$$C = \sqrt{gh} \quad (1)$$

$$L = CT \quad (2)$$

$$\frac{h}{L} \leq \frac{1}{25} \quad (3)$$

C[m/s]:波速, g[m/s²]:重力加速度で9.8, h[m]:水深, L[m]:波長, T[sec]:周期とした. 本実験条件より, 水深波長比は1/25以下となるため, 津波を再現できていたと言える.

本研究で流速分布を測定するために, 125sp, F2.8, 1024×576pixelの設定の高速カメラ(Photron Fastcam SA3)で造波開始と同時に撮影開始されたものを使用している. 撮影箇所は図-1に示している下流端 x=0.0m から上流側に6m地点と10m地点の2カ所で撮影されている. トレーサー(HP20を使用)は, 6m地点での撮影時には造波する2分30秒前に, 10m地点での撮影時には造波する2分前に投入され, レーザーを上から照射し撮影が行われている. 高速カメラの映像を写真-1に示す.

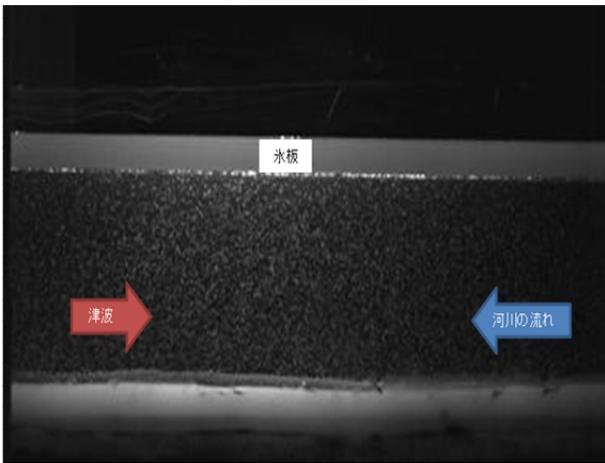


写真-1 高速カメラの映像

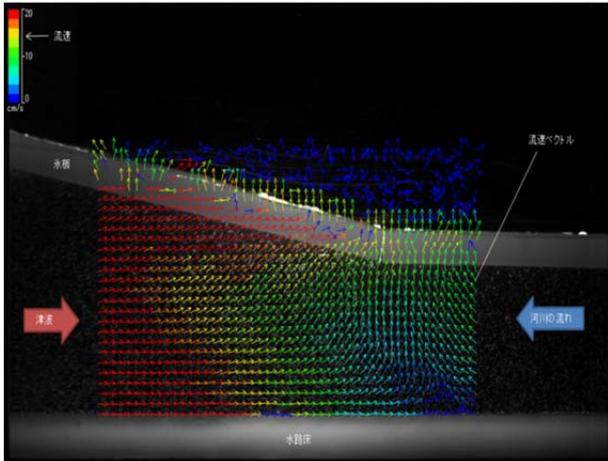


写真-2 PIV解析の一例 (case10-6-3)

3. PIV解析の設定

高速カメラで撮影された画像とPIV解析用ソフトウェア(2次元流体解析ソフトウェア FlowExpert カトウ光研株式会社)により流速分布の把握を行った. 解析を行ったケースは表-1にまとめて示す. 流速ベクトルの計測は, 縦断方向および鉛直方向ともに0.5cm間隔で行った. また, 水路の側壁にシーリング材が付いているため, 河床から1cmは流速を測定することができなかった. 測定時間

は, 6m地点で造波開始から2秒後から, 10m地点で造波開始から5秒後にそれぞれ測定を開始し, とともに25秒間の計測時間とした. 計測時間を25秒にした理由として, 造波を開始して津波が遡上し流れの向きが変わり, 流れが落ち着いてきて造波開始前の向きに流れが戻るまでに要する時間が25秒間であったためである.

表 PIV解析のケース

	開水	固定	浮遊 2m
波高H=1cm	case6-1-1	case6-2-1	case6-3-1
波高H=2cm	case6-1-2	case6-2-2	case6-3-2
波高H=3cm	case6-1-3	case6-2-3	case6-3-3
波高H=1cm	case10-1-1	case10-2-1	case10-3-1
波高H=2cm	case10-1-2	case10-2-2	case10-3-2
波高H=3cm	case10-1-3	case10-2-3	case10-3-3
	浮遊 1m	浮遊 0.5m	浮遊 0.25m
波高H=1cm	case6-4-1	case6-5-1	case6-6-1
波高H=2cm	case6-4-2	case6-5-2	case6-6-2
波高H=3cm	case6-4-3	case6-5-3	case6-6-3
波高H=1cm	case10-4-1	case10-5-1	case10-6-1
波高H=2cm	case10-4-2	case10-5-2	case10-6-2
波高H=3cm	case10-4-3	case10-5-3	case10-6-3

※case-撮影箇所-○-波高

4. 解析結果

得られた流速分布の一例として, case6-1-3, case6-2-3, case6-3-3, case6-6-3, case10-1-3, case10-2-1, case10-2-3, case10-3-3, case10-6-3, 計9ケースの結果を図-2に示す. 図における流速は, 河川上流から下流方向をマイナスの値, 津波が遡上し河川下流から上流へ流れる方向をプラスの値として表示している. また, 鉛直方向の流速は水面方向への流れをプラスの値, 水路床方向への流れをマイナスの値として表示している.

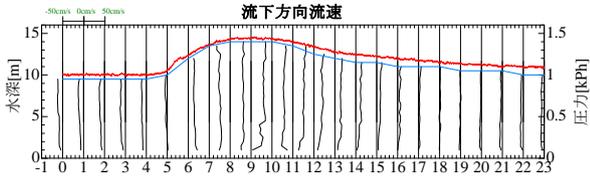
(1)流下方向

流下方向の流速をみると, 氷板があるケースでは水路床だけでなく氷板付近にも粗度の影響があるため, 水路床と氷板付近の流速が遅くなっており, 鉛直方向中央部の流速が速くなっている. そのため, 津波が遡上してきた直後は流れの遅い箇所から津波が進行するため, 水路床と氷板付近の流速が速くなるとともに, 鉛直方向中央部が遅くなる. 数秒経過すると水路床と氷板付近の流速が遅くなり, 中央部が速くなっていることが読み取れる. また, 6m地点と10m地点の撮影箇所を比較すると, 6m地点での水位は時間をかけて上昇しているのに対し, 10m地点では一気に水位が上昇していることがわかる.

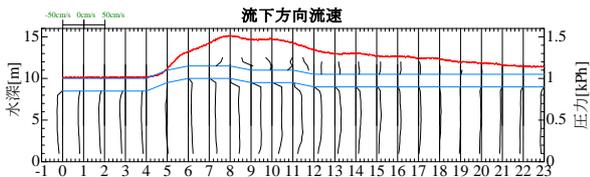
氷板を固定したケースでは津波が遡上した際, 他のケースと比較して流速が遅い. case10-2-3, case6-2-3では, 氷板上にも津波が遡上しており, 氷板上の流れは非常に速い流速で遡上している. また, 上流からの流れがないため, 長い時間遡上していることがわかる. case10-2-1では波高が低いため氷板上の津波の遡上は見られなかった. 氷板を設置しない開水のケースと氷板を浮遊させたケースでの流速に大きな差は確認されなかった.

(2)鉛直方向

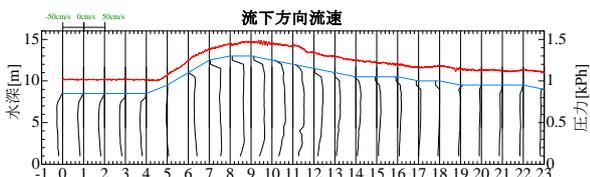
鉛直方向の流速分布については、氷板を浮遊させたケースと氷板を設置しない開水のケースで水位が上昇し始めた際に上向き流速が確認されたが、case10-6-3で計測された5.5cm/sの流速が最大値であり、氷板に大きな影響を与えると考えられるような流速は測定されなかった。他の時間や固定させたケースでは鉛直方向の平均流速はほぼ0である。



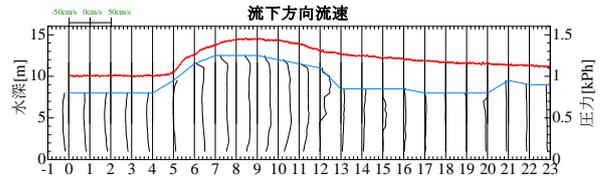
case-6-1-3 (開水, 波高 3cm, 6m 地点のカメラ)



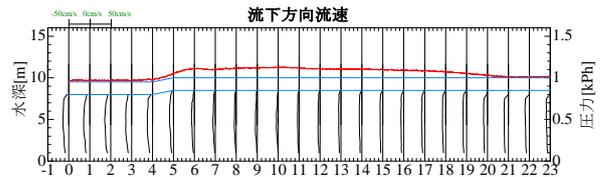
case-6-2-3 (固定, 波高 3cm, 6m 地点のカメラ)



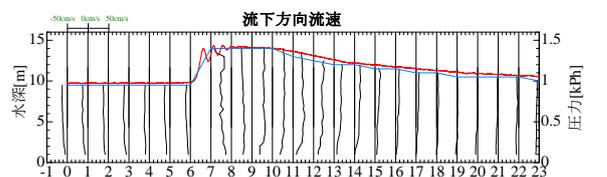
case-6-3-3 (浮遊 2m, 波高 3cm, 6m 地点のカメラ)



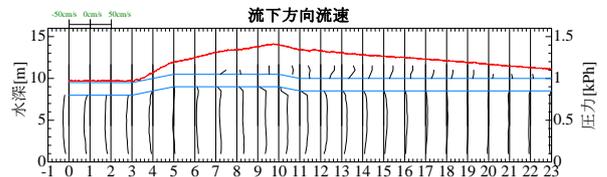
case-6-6-3 (浮遊 0.25m, 波高 3cm, 6m 地点のカメラ)



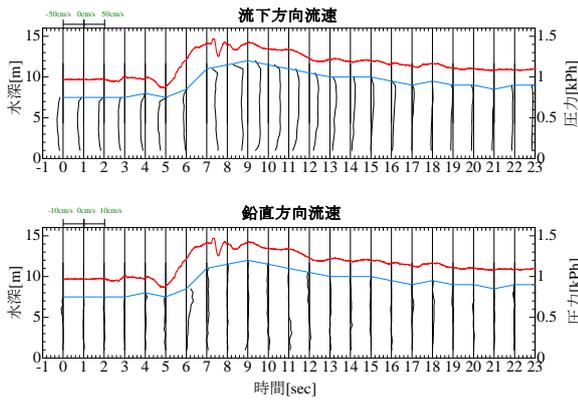
case-10-2-1 (固定, 波高 1cm, 6m 地点のカメラ)



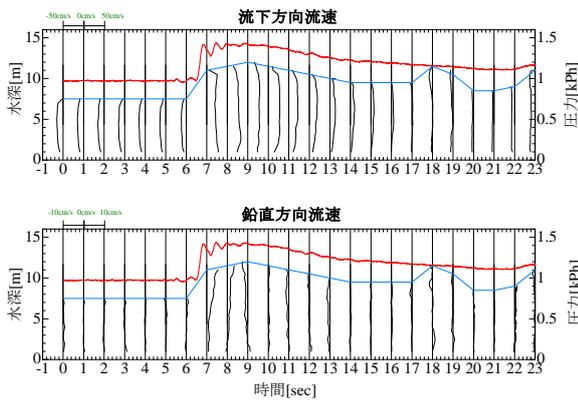
case-10-1-3 (開水, 波高 3cm, 10m 地点のカメラ)



case-10-2-3 (固定, 波高 3cm, 10m 地点のカメラ)



case-10-3-3 (浮遊 2m, 波高 3cm, 10m 地点のカメラ)



case-10-6-3 (浮遊 0.25m, 波高 3cm, 10m 地点のカメラ)

図-2 PIV 解析結果

5. まとめ

結氷時における河川津波の流速分布の特性について、PIV 解析を実施し検討を行った。6m 地点と 10m 地点で水位の上昇時間に違いが出た理由としては、分散波列が起り、10m 地点で流れが集中したため水位が一気に上昇したと考えられる。氷板を固定したケースにおいて、他のケースと比較して氷板下の流速が遅い現象に関しては、原因の特定には至らないが氷板上を津波が遡上していることが原因の 1 つであると考えられる。

謝辞：本研究の実験に際して(独)寒地土木研究所寒地河川チームにご協力を頂きました。河川整備基金 24-1114-001, 科研費基盤研究(B)24360197 の助成を受けました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐伯浩, 秋原真哉, 高橋良正, 堺茂樹: 津波による氷盤の陸上への遡上に関する研究, 寒地技術シンポジウム講演論文集, 第 8 回, pp. 432-436, 1992.
- 2) 大久保敦, 吉川泰弘, 渡邊康玄, 阿部孝章: 結氷河川における津波伝搬機構に関する水理実験, 土木学会北海道支部, 年次技術研究発表会論文報告集, 第 69 号, B-58, 2013.